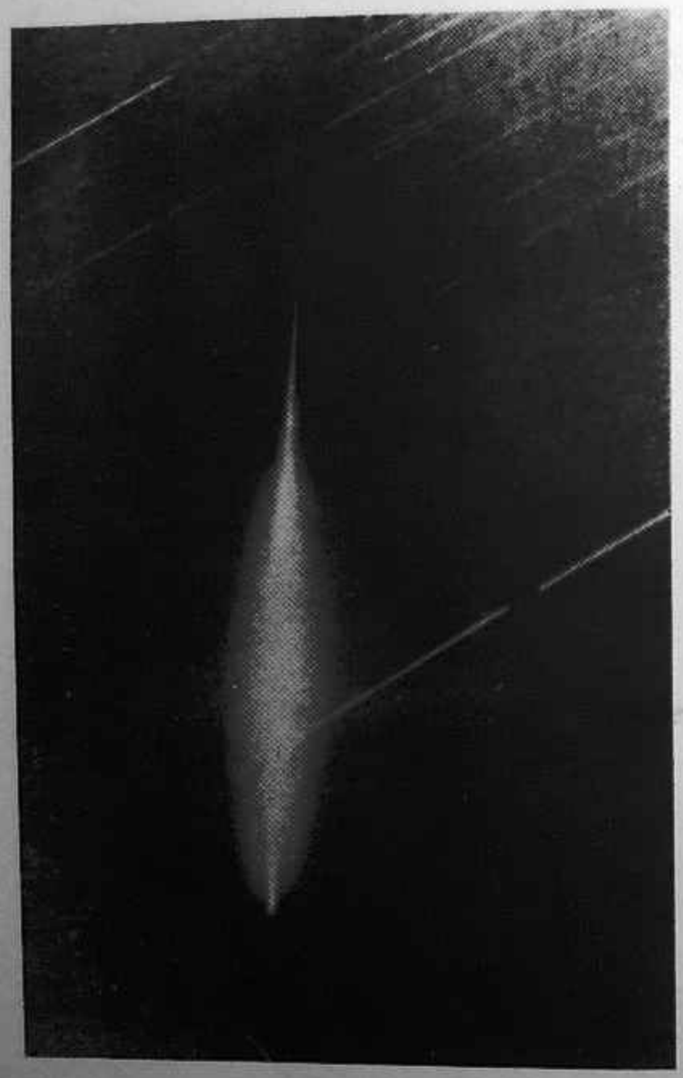
И. С. АСТАПОВИЧ

Метеорные явления в атмосфере Земли



Снимок яркого болида (-11^m), полученный 22 октября 1952 г. Ашхабадской астрофизической лабораторией АН Туркменской ССР.

И. С. АСТАПОВИЧ

А-91

МЕТЕОРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1958

Б ВО714736
14-5-4
555
Ст

АННОТАЦИЯ

В книге изложена история изучения метеоров, методы их исследования (визуальные, фотографические и радиолокационные), результаты исследования обычных, телескопических и ярких метеоров, рассмотрены процессы, возникающие при движении метеорных тел в атмосфере (оптические, акустические, термические, электрические и магнитные), а также при проникновении их в почву (падение метеоритов, образование метеоритных лунок и кратеров, метеорные и метеоритные гиперсейсмы). Рассматриваются астрономические данные при полете метеоров (радианты, высоты, скорости и численность), физические явления (яркость, спектр, цвет, форма, размеры, дробление, вращение и торможение, масса) и явления геофизические (метеорная ионизация, пылевые и газовые следы, данные о метеорной пыли в атмосфере и в почве), изложены элементы физической теории метеоров. Книга является сводным обзором современного состояния вопроса, а также содержит результаты оригинальных исследований последних лет.

Книга рассчитана на научных работников (астрономов и геофизиков), аспирантов, преподавателей, инженеров, студентов, и может быть полезна для целей общего ознакомления с вопросом.

Львівська Державна Публічна Бібліотека УРСР
Інв. 2178226
94108

Астапович Игорь Станиславович.
Метеорные явления в атмосфере Земли.

Редактор *В. А. Бронштэн.*

Технический редактор *С. Н. Ахламов.* Корректор *Е. А. Белицкая.*

Сдано в набор 24/V 1958 г. Подписано к печати 3/XII 1958 г. Бумага 60×92¹/₁₆. Физ. печ. л. 40+2 вклейки. Условн. печ. л. 40,36 Уч.-изд. л. 43,0. Тираж 2000 экз. Т-11568. Цена книги 23 руб. 50 коп. Заказ № 3211.

Государственное издательство физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Леноблархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора 10

Список постоянных обозначений в книге 13

Введение 15

§ 1. Общий обзор метеорных явлений (15). § 2. Учение о метеорной материи. Его отношение к другим наукам (23). § 3. Проблематика исследований (25). § 4. Основные понятия и определения (25). § 5. Основные работы общего содержания. Обзоры и библиографии (26).

Глава 1. **Развитие взглядов на метеорные явления** 30

§ 6. Доисторическое время (30). § 7. Древние века. Эллада. Рим (31). § 8. Средние века. Аравия (34). § 9. Индия (35). § 10. Китай. Другие страны Азии (35). § 11. Европа (37). § 12. Россия (38).

Глава 2. **История научного изучения метеоров** 41

§ 13. Древние века (41). § 14. Средневековье. Наблюдения арабов (42). § 15. Наблюдения в России (42). § 16. Первые научные наблюдения метеоров (43). § 17. Определение высот и скоростей метеоров (46). § 18. Открытие радианта. Определение орбит (48). § 19. Открытие связи метеоров и комет (50). § 20. Дальнейшие исследования. Работы Бредихина (52). § 21. Применение техники к изучению метеоров (54). § 22. Радиофизические методы исследований (55). § 23. Развитие метеорной физики и геофизики (56). § 24. Современное развитие исследований метеоров (57). Хронология важнейших событий в истории изучения метеорных явлений (62).

Глава 3. **Атмосфера Земли как среда метеорных явлений** . . . 67

§ 25. Введение (67). § 26. Пределы атмосферы (67). § 27. Термодинамический парадокс (69). § 28. Экзосфера (70). § 29. Ионосфера (70). § 30. Свечение ночного неба (72). § 31. Стратосфера (73). § 32. Тропосфера (74). § 33. Метеоры как средство изучения атмосферы (76).

Глава 4. **Глаз и его свойства** 77

§ 34. Введение (77). § 35. Оптическая система глаза (77). § 36. Зрачок (78). § 37. Светочувствительный аппарат (78). § 38. Движения глаза (79). § 39. Поле зрения глаза (80). § 40. Зоны видимости (81). § 41. Острота зрения (83). § 42. Контрастная чувствительность (83). § 43. Световая чувствительность (84). § 44. Адаптация (85). § 45. Слепящая яркость (86). § 46. Иррадиация (86). § 47. Лучистость (86). § 48. Инерция зрения (86).

§ 49. Быстрота восприятия (87). § 50. Глубина восприятия (87). § 51. Восприятие движения (87). § 52. Восприятие цвета (88). § 53. Влияние возбудителей (89).

Глава 5. **Влияние условий наблюдения и видимости** 90

§ 54. Роль условий наблюдения (90). § 55. Астрономические условия (90). § 56. Геофизические причины (91). § 57. Географические причины (92). § 58. Метеорологические условия (92). § 59. Геометрические причины (93). § 60. Местные причины (95). § 61. Личные условия (96).

Глава 6. **Общее описание метеоров** 97

§ 62. О характере метеорных явлений (97). § 63. Самые слабые метеоры (99). § 64. Слабые метеоры (99). § 65. Метеоры средней яркости (101). § 66. Яркие метеоры (101). § 67. Болиды (104). § 68. О классификации метеоров (105).

Глава 7. **Общий обзор методов изучения метеоров.** 108

§ 69. Общие соображения (108). § 70. Общая характеристика методов исследования (108).

Глава 8. **Визуальные методы. Телескопические наблюдения.** . . 115

§ 71. Момент полета (115). § 72. Определение положения метеора (115). § 73. Ошибки положения (116). § 74. Применение «циферблата» (118). § 75. Определение продолжительности полета (119). § 76. Определение угловой скорости (119). § 77. Определение углового торможения γ (122). § 78. Определение видимой яркости (123). § 79. Определение цвета (124). § 80. Общие выводы (124). § 81. Организация наблюдений (124). § 82. Журнал наблюдений (125). § 83. Телескопические наблюдения метеоров (126). § 84. Видимость деталей (127). § 85. Проницающая сила (128). § 86. Контрастная различимость (129). § 87. Оптика для наблюдения метеоров (129).

Глава 9. **Фотографические методы изучения метеоров.** 132

§ 88. Введение (132). § 89. Развитие метеорной фотографии (132). § 90. Работы русских астрономов (134). § 91. Новые работы (136). § 92. Оптика для фотографирования метеоров (138). § 93. Метеорный патруль (145). § 94. Фотоматериалы для метеорной фотографии (146). § 95. Проявление (150). § 96. Фиксирование (150). § 97. Другие виды фотографии (150).

Глава 10. **Радиофизические методы исследования метеоров** . . 152

§ 98. Введение (152). § 99. Развитие метода (154). § 100. Методика исследования (158). § 101. Импульсная техника (162). § 102. Пассивные методы (166). § 103. Другие исследования (167).

Глава 11. **Численность метеоров** 171

§ 104. Определения (171). § 105. Суточная и годичная вариации (172). § 106. Широтная вариация (174). § 107. Зенитная вариация (175). § 108. Азимутальная вариация (175). § 109. Теория вариации числа метеоров (176). § 110. Влияние скорости (176). § 111. Полное число метеоров на небосводе (177). § 112. Индекс и ранг активности (178). § 113. Метеорная плотность (179). § 114. Число метеоров до данной яркости для Земли в целом (179). § 115. Распределение метеоров по видимой яркости (183).

Глава 12. **Радианты** 185

§ 116. Введение (185). § 117. Основные определения (188). § 118. Поправки радианта (190). § 119. Графическое решение (196). § 120. Определение радиантов из наблюдений (196). § 121. Фиктивные радианты (199). § 122. Методы нахождения радиантов (199). § 123. Односторонние методы определения радиантов (201). § 124. Двухсторонние методы (202). § 125. Многосторонние методы (202). § 126. Точность определения радиантов (203). § 127. Статистический подход к определению радиантов (204). § 128. Графическое определение радиантов (205). § 129. Аналитическое определение радиантов (205). § 130. Графоаналитические способы (208). § 131. Каталоги радиантов (208). § 132. Распределение видимых траекторий (212).

Глава 13. **Высоты метеоров** 216

§ 133. Введение (216). § 134. Общие соображения (217). § 135. Методы определения высот (217). § 136. Основные определения (218). § 137. Тригонометрические методы. Параллакс метеора (218). § 138. Многосторонние методы (225). § 139. Односторонние методы (227). § 140. Статистические методы (229). § 141. Физические методы (229). § 142. Влияние ошибок наблюдений на определение высот метеоров (230). § 143. Начало свечения метеора (231). § 144. Зависимость высоты от скорости (232). § 145. Зависимость H от яркости (234). § 146. Влияние угла наклона траектории (235). § 147. Зависимость высоты от элонгации радианта (236). § 148. Высота метеоров в функции цвета (236). § 149. Нижние пределы свечения (237). § 150. Данные односторонних методов (237). § 151. Зависимость длины пути от яркости (238). § 152. Зависимость длины пути от наклона (239). § 153. Данные радиометодов (239). § 154. Данные фотографических методов (240). § 155. Высоты метеоров особых классов (240). § 156. Дальнейшие задачи (241).

Глава 14. **Скорости метеоров** 242

§ 157. Введение (242). § 158. Определения (245). § 159. Методы определения скоростей (246). § 160. Безынструментальные способы (246). § 161. Полуинструментальные способы (247). § 162. Физические способы (249). § 163. Астрономические методы (250). § 164. Поправки скорости (252). § 165. Космическая скорость (254). § 166. Результаты изучения скоростей (254).

Глава 15. **Определение орбит метеорных тел** 259

§ 167. Введение (259). § 168. Геоцентрические траектории (259). § 169. Незамкнутые траектории (260). § 170. Общие соображения (261). § 171. Обратная задача (265). § 172. Пример определения орбиты (266). § 173. Данные визуальных методов (267). § 174. Данные фотографических методов (269). § 175. Данные радиометодов (270). § 176. Общее заключение (271).

Глава 16. **Яркость метеоров** 273

§ 177. Введение (273). § 178. Основные определения (273). § 179. Абсолютная яркость метеоров (276). § 180. Определение видимой яркости болидов (278). § 181. Яркость протяженных объектов (279). § 182. Разделение метеоров по яркости (280). § 183. Изменение яркости (280). § 184. Годичная вариация средней яркости метеоров (282). § 185. Суточная вариация средней яркости метеоров (282).

§ 186. Зависимость яркости от угловой скорости (283). § 187. Кривые изменения яркости метеоров (283). § 188. Фотографическая фотометрия (286). § 189. Вспышки и взрывы (289). § 190. Пульсации яркости (292). § 191. Мерцающие метеоры (292). § 192. Длительность свечения (293). § 193. Болометрическая яркость метеора (294). § 194. Радиояркость метеоров (294). § 195. Фотоэлектрические наблюдения метеоров (295).

Глава 17. Спектры метеоров 297

§ 196. Введение (297). § 197. Визуальная спектроскопия (298). § 198. Спектрографирование метеоров (298). § 199. Спектры метеоров (302). § 200. Зависимость от скорости (303). § 201. Связь со спектрами комет и метеоритов (304). § 202. Прочие свойства спектров (305). § 203. Спектроскопические наблюдения телеметеоров (307). § 204. Спектры искусственных метеоров (308). § 205. Спектры метеоров СССР (308).

Глава 18. Цвет, температура и тепловое излучение метеоров . 313

§ 206. Введение (313). § 207. Некоторые понятия из колориметрии (313). § 208. Визуальные методы определения цвета метеоров (314). § 209. Полуинструментальные методы (315). § 210. Инструментальные методы (315). § 211. Понятие температуры метеора (317). § 212. Температура метеорных тел вне Земли (319). § 213. Зависимость температуры от скорости (320). § 214. Распределение метеоров по цвету (321). § 215. Изменение цвета в полете (321). § 216. Изменение цвета с высотой (322). § 217. Азимутальная вариация цвета (322). § 218. Суточная вариация цвета (323). § 219. Годичная вариация цвета (323). § 220. Зависимость продолжительности полета от цвета (324). § 221. Излучение метеора (324). § 222. Метеоротермический эффект (324).

Глава 19. Размеры и форма метеоров 327

§ 223. Форма метеора (327). § 224. Инструментальные данные (329). § 225. Линейные размеры метеоров (332). § 226. Структура метеора (337). § 227. Структура следа (339).

Глава 20. Вращение метеорных тел 340

§ 228. Введение (340). § 229. Данные наблюдений (340). § 230. Явление Магнуса (342). § 231. Прецессия и нутация оси вращения (343).

Глава 21. Дробление метеоров и метеорные комплексы 348

§ 232. Введение (348). § 233. Атмосферные комплексы (350). § 234. Дробление метеоритов (353). § 235. Доатмосферные комплексы (354). § 236. Метеорные близнецы (355). § 237. Болиды как рои метеоров (356). § 238. Туманные метеоры (357). § 239. Метеорные рои (357). § 240. Рои болидов (358). § 241. Метеоритные дожди (358). § 242. Метеорные сгущения (359). § 243. Метеорные облака (360). § 244. Статистика падений метеоров (362).

Глава 22. Торможение метеоров в атмосфере 364

§ 245. Введение (364). § 246. Уравнение торможения (365). § 247. Методы определения торможения (366). § 248. Доатмосферная скорость (374). § 249. Статистические методы определения торможения (375). § 250. Радиометоды определения торможения метеоров (377)

Глава 23. Движение в сопротивляющейся среде 379

§ 251. Постановка задачи (379). § 252. Развитие исследований сопротивления воздуха (380). § 253. Движение метеорного тела в атмосфере (385). § 254. Движение на высшем участке (387). § 255. Движение на верхнем участке (387). § 256. Движение на среднем участке (388). § 257. Движение на нижнем участке (391). § 258. Исследование упавших метеоритов (395). § 259. Искусственные метеоры (398). § 260. Некоторые новые исследования (399).

Глава 24. Элементы физической теории метеоров 404

§ 261. Введение (404). § 262. Обзор развития физической теории метеоров (405). § 263. Современное состояние вопроса (411).

Глава 25. Масса метеорного тела 417

§ 264. Введение (417). § 265. Методы определения масс (418). § 266. Результаты определения масс (421). § 267. Изменение массы в полете (421). § 268. Масса метеорной материи (423). § 269. Изменение радиуса метеорного тела в полете (424). § 270. Уравнение движения метеорного тела (424). § 271. Масса метеоров по радиоопределениям (425). § 272. Общее количество энергии метеоров (425).

Глава 26. Метеорная ионизация 427

§ 273. Введение (427). § 274. Метеорная «корона» (429). § 275. Метеоры и полярные сияния (430). § 276. Возникновение спорадического E_s-слоя (431). § 277. «Вспышки слышимости» радиопередач (431). § 278. Метеорные фединги (432). § 279. Коэффициент рекомбинации (434). § 280. «Вспышки» метеорной ионизации (435). § 281. Ионизация в голове метеора (437). § 282. Ионизация в следе (438). § 283. Коэффициент диффузии D (439). § 284. Коэффициент полезного действия ионизации (440). § 285. Виды ионизации (440).

Глава 27. Газовые следы метеоров 442

§ 286. Введение (442). § 287. Взгляды на природу следов (443). § 288. Определения (444). § 289. Образование следа (446). § 290. «Голубые следы» (448). § 291. «Фиолетовый ореол» (448). § 292. Размеры и объем следов (448). § 293. Природа следов. Общие соображения (448). § 294. Яркость следов (449). § 295. Убывание яркости следа (451). § 296. Продолжительность свечения следа (451). § 297. Стойкие следы (453). § 298. Сферические сгустки (454). § 299. Диффузия следа (454). § 300. Цвет следов (455). § 301. Суточная и годичная вариации (455). § 302. Новые исследования (456).

Глава 28. Электромагнитные явления при полете метеоров . . . 457

§ 303. Введение (457). § 304. Метеороэлектрические явления (457). § 305. Образование озона (459). § 306. Истечение электричества (459). § 307. Метеоромагнитные явления (460). § 308. Метеоромагнитные наблюдения (461). § 309. Радиометеорные явления (464). § 310. Собственное радиоизлучение метеоров (464). § 311. Мощность собственного радиоизлучения метеоров (465). § 312. Распространение метеорного импульса (466). § 313. Электрофонные явления (467). § 314. Электрофонные болиды (468). § 315. Аналогия со звуками полярных сияний и разрядов молний (470). § 316. Аналогия с «бронтофонными» явлениями (471). § 317. Обобщение данных наблюдений (472).

Глава 29. Болиды и их пылевые следы 473

§ 318. Введение (473). § 319. История вопроса (473). § 320. Каталоги болидов (476). § 321. Суточная и годичная вариации болидов (477). § 322. Радианты (477). § 323. Траектории (478). § 324. Сила света болидов (480). § 325. Наблюдения болидов в телескоп (480). § 326. Прочие данные (484). § 327. Пылевые следы болидов (486). § 328. Наблюдения следов (489). § 329. Изучение пылевых следов (492). § 330. Оптические свойства следов (492).

Глава 30. Падение метеоритов 497

§ 331. Общие свойства траекторий (497). § 332. Скорость падения (499). § 333. Метеоритные дожди. Эллипсы рассеяния (501). § 334. «Цепные падения» (503). § 335. Падение метеоритов (504). § 336. Суточная и годичная вариации падений метеоритов (506). § 337. Движение на низшем участке траектории (507). § 338. Форма лунки (воронки) (508). § 339. Длительность углубления (509). § 340. «Пробивная способность» метеоритов (509). § 341. Метеоритные кратеры (510). § 342. Тунгусское и Сихотэ-Алинское падения (515). § 343. Энергия кратерообразования (516).

Глава 31. Акустика болидов и падающих метеоритов 518

§ 344. Введение (518). § 345. Шкала громкостей (519). § 346. Распространение и поглощение звука (520). § 347. Баллистические волны (523). § 348. Звуки болидов (523). § 349. Акустическое поле болида. Изофоны (525). § 350. Мощность звукового излучения болидов (528). § 351. Звуки падения метеорита (530). § 352. Звуковые болиды (531).

Глава 32. Метеоросейсмические явления 533

§ 353. Гипергенные сейсмы (533). § 354. Метеорные и метеоритные гиперсейсмы (533). § 355. Шкала интенсивностей (535). § 356. Метеоросейсмические явления (536). § 357. Связь метеорных изосейсм с изофонами (539).

Глава 33. Телескопические метеоры 540

§ 358. Введение (540). § 359. История вопроса (540). § 360. Наблюдения телеметеоров (544). § 361. Ошибки наблюдений (546). § 362. Яркость телеметеоров (547). § 363. Численность телеметеоров (547). § 364. Распределение по зенитному расстоянию (549). § 365. Распределение направлений (549). § 366. Часовые числа и их вариации; вспышки активности (550). § 367. Суточная вариация телеметеоров (551). § 368. Годичная вариация (551). § 369. Отношение к большим потокам (552). § 370. Радианты (552). § 371. Высоты телеметеоров (554). § 372. Угловые скорости (557). § 373. Угловые длины (557). § 374. Цвет телеметеоров (558). § 375. Очерченность телеметеоров (559). § 376. Угловые поперечники (559). § 377. Искривление траектории (559). § 378. Появление и исчезновение метеоров (559). § 379. Вспышки и взрывы (560). § 380. Двойные и кратные телеметеоры (560). § 381. Спектры телеметеоров (560).

Глава 34. Метеорная и космическая пыль в земной атмосфере . 561

§ 382. Введение (561). § 383. Поглощение света (561). § 384. Выпадение космической пыли (563). § 385. Общий дебит пыли (568). § 386. Туманные метеоры (569). § 387. Рассеяние света (570).

§ 388. Серебристые облака (570). § 389. Внешняя пылевая атмосфера (572). § 390. Излучение света (573). § 391. Метеорный натрий в атмосфере (574).

Глава 35. Метеорная материя на поверхности Земли 576

§ 392. Введение (576). § 393. Выпадение метеорной пыли (с метеорными явлениями) (576). § 394. Падение пыли (без метеорных явлений) (579). § 395. Ископаемая пыль внеземного происхождения (583). § 396. Глубоководные отложения (584). § 397. Результаты сбора пыли (585). Заключение (590).

Литература 591

Именной указатель 627

Предметный указатель 634

«Ум человеческий открыл много диковинного в природе и откроет еще больше, увеличивая тем свою власть над ней...».

В. И. Ленин, Сочинения, изд. 4-е, т. 14, стр. 268.

ОТ АВТОРА

Хотя эта книга написана о метеорах, читатель встретится в ней с самыми разнообразными вопросами: со свойствами глаза и природой землетрясений, данными баллистики и истории знаний, спектрального анализа и картографии, акустики и океанологии. Но таков предмет нашего вопроса: он исключительно многогранен. Изучая метеорные явления, исследователь сталкивается с метеорной материей, веществом, поразительно широко распространенным в мировом пространстве и на нашей планете. Метеорное вещество играет первостепенную роль в космогонии, его вынуждена учитывать внегалактическая астрономия, с ним постоянно имеет дело звездная астрономия. Самым широким образом проявляется метеорная материя в солнечной системе, начиная от так называемой фраунгоферовой короны Солнца и кончая малыми планетами, кометами и кольцом Сатурна. Проще ответить на вопрос, где нет этой материи, чем на вопрос, где она есть.

Вторжение метеорной материи в земную атмосферу вызывает явления, почти бесконечные в своем разнообразии. Каждое из них имеет свою историю изучения и литературу, подчас необозримую (достаточно напомнить о библиографической сводке Брауна только по метеоритам, имеющей 8600 названий). Метеорным явлениям в земной атмосфере и посвящена эта книга.

На протяжении последней четверти века на наших глазах возникали контуры новых наук — метеорной физики и метеорной геофизики, независимых от метеорной астрономии и метеорной астрофизики, сложившихся в прошлом столетии. Движение в земной атмосфере в некоторой мере зависит от свойств метеорной частицы, отчасти известных по изучению метеорных тел, достигших поверхности Земли, — метеоритов. Их изучением занимается еще одна дисциплина — метеоритика, в свою очередь использующая данные петрографии, минералогии, геохимии, рентгеноструктурного анализа, магнитологии, химии изотопов, радиохимии и многих других наук.

Изучение движения метеоров с космическими, «астробаллистическими» скоростями в земной атмосфере невозможно без учета опыта, накопленного газовой динамикой, аэродинамикой и баллистикой. Понять, что в метеоре видят глаз, фотокамера и радиолокатор, можно лишь тогда, когда нам известны их основные свойства, изучаемые соответственно физиологией, оптикой и радиофизикой. Земная атмосфера есть та среда, в которой происходят метеорные явления, и их познание невозможно без знания основных свойств этой среды, изучаемых аэрологией, физикой ионосферы, аэрофизикой, атмосферной акустикой и оптикой, статикой и динамикой атмосферы и другими геофизическими науками. Вот почему возникает видимая пестрота вопросов, затрагиваемых в книге. Мы присутствуем при формировании новой области знания, смежной с рядом уже сложившихся или также еще формирующихся дисциплин. Этот процесс не закончен, он продолжается. Но метеорная наука уже вышла из пеленок и даже период «романтики первых исканий и заблуждений» кажется уже позади.

Эта работа не является курсом метеорной астрономии, физики и геофизики, и потому она не может давать последовательный вывод основных теоретических положений, что надо сделать в другом месте. Она не есть и книга для чтения, так как требует от читателя терпения, внимания и некоторой подготовки. Математик сразу найдет нестрогость формулировок ряда положений, но вместе с тем увидит, что содержание формул и их физический смысл часто изложены обычными словами и ему нетрудно будет перевести их на язык математики. Редко мы можем сказать, что полученных данных достаточно для того, чтобы оправдать их обобщение. Автор стремился дать возможность ознакомиться с физической сущностью метеорных явлений большому кругу читателей.

Данная книга является общим предварительным обзором метеорных явлений в земной атмосфере, включая методы их изучения. Такой обзор может пригодиться специалисту-астроному, подчас не имеющему возможности лично перечитать и обобщить несколько тысяч оригинальных работ, по которым построена эта книга (и лишь малая часть которых приведена в библиографии). Нужен он и геофизику, поскольку явление метеоров происходит в земной атмосфере. Может понадобиться он и физику, поскольку в метеорах природа осуществляет эксперимент, пока не достигнутый в земной лаборатории. Инженер-практик сможет сделать некоторые выводы, которые, может быть, ориентируют его в области будущих исканий.

Совершенно естественно, что в подобной работе, касающейся постоянно ряда вопросов, в которых нельзя быть одновременно специалистом, возможны и ошибки, и досадные промахи. В дальнейшем подобные работы будут, вероятно, создаваться коллективом авторов.

Автору пришлось включить в обзор некоторые оригинальные работы как руководимого им коллектива, так и собственные за последние тридцать лет. В пределах рамок книги в целом изложение не может быть «исчерпывающим», тем более, что все нарастающим темпом идет поток новой литературы; в среднем через день появляется статья или заметка в этой области.

Ныне эта отрасль точного знания располагает рядом первоклассных метеорных обсерваторий, десятками специалистов, своей периодикой и международными конференциями [94]. Новая техника последних лет принесла здесь важные и порой неожиданные результаты. Несомненно, будут новые достижения в ближайшие годы.

Нам приятно отметить, что научное изучение метеоров было заложено впервые в нашей стране — Андреем Татищевым в 1724 г. в Екатеринбурге и академиком Крафтом в 1741 г. в Петербурге; основы науки даны членом-корреспондентом Российской Академии наук Э. Хладни в книге, напечатанной в 1794 г. в Риге и посвященной сибирскому метеориту Палласово Железо, образцы которого легли в основу музейных коллекций метеоритов в России и за рубежом. Этот метеорит был найден в 1749 г. кузнецом Яковом Медведевым. Наблюдения метеоров и их изучение, начатое в Москве с 1852 г. Б. Я. Швейцером, затем вошли в традицию московских астрономов: достаточно назвать А. А. Белопольского, Ф. А. Бредихина, В. К. Цераского, С. Н. Блажко и других. С момента своего основания (1874 г.) Ташкентская обсерватория явилась единственной, где наблюдения метеоров были включены в официальный план работ; здесь работали П. К. Залесский, И. И. Сикора, П. А. Савицкий, Э. К. Эпик, В. А. Мальцев. Четверть века назад для изучения метеоров была основана Сталинабадская обсерватория, ныне один из советских центров исследования в этой области. В 1937 г. в старейшем русском университете — в МГУ — был начат чтением первый университетский курс метеорной астрономии, который потом читался в Саратовском (с 1939 г.), Ленинградском (с 1944 г.) и Ашхабадском (с 1953 г.) университетах. Начиная с 1935 г., в Москве каждые два года проводились всесоюзные конференции исследователей метеоров, а с 1949 г. ежегодные конференции по метеоритам. На крайнем юге СССР, в Ашхабаде, с 1942 г. начаты исследования метеоров, а в 1946 г. для этой цели организована Астрофизическая лаборатория. Большую работу по метеоритам ведет Комитет по метеоритам АН СССР, созданный в 1922 г., которым ныне руководит В. Г. Фесенков. В нашей стране планирование метеорных исследований возложено на Комиссию по кометам и метеорам Астрономического совета АН СССР (председатель В. В. Федынский).

* * *

Автор благодарит проф. В. В. Федынского за критический просмотр текста рукописи и В. А. Бронштэна, способствовавшего значительному улучшению книги. Он заранее признателен всем тем, кто сообщит ему свои критические замечания по данной монографии.

И. С. Астапович

Ашхабад, Астрофизическая лаборатория

СПИСОК ПОСТОЯННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ В КНИГЕ

A — долгота апекса; площадь поверхности отражения радиоволн; коэффициент рекомбинации; прямое восхождение второго конца базиса.
B — поверхностная яркость (стильбы).
C — концентрация радиантов; концентрация пылинок.
D — диаметр объектива; диаметр поля зрения; фотографическая плотность; слой ионосферы; склонение второго конца базиса; расстояние метеоров в рое.
E — энергия; освещенность; блеск (звезд); эффективность; напряженность поля радиоволны; слой ионосферы.
F — сила сопротивления воздуха; слой ионосферы.
G — коэффициент усиления антенны; слепящая яркость; функция сопротивления.
H — высота метеора; H_s — высота следа; H_T — поток тепла.
I — сила света.
K — шкала абсолютной температуры; постоянная Больцмана; контраст.
L — длина пути линейная; L' — проекция ее на земную поверхность.
M — масса метеорного тела; M_0 — масса метеорной материи.
N — электронная или ионная концентрация; шумовой фактор; общее число метеоров; число молекул.
O — непрозрачность.
P — мощность источника; чувствительность приемника; вероятность; давление.
Q — параллактический угол; теплота испарения.
R — радиант; разрешающая способность эмульсии; радиус Земли; расстояние от центра Земли; электросопротивление.
S — площадь зоны видимости; светочувствительность; площадь миделя; станция наблюдения.
T — прозрачность; абсолютная температура.
U — мощность шумов приемника.
W — коэффициент различимости; энергия удара.
Y — спектр каменного метеора.
Z — спектр железного метеора; зенит.
a — азимут; полуось геоцентрической орбиты; скорость звука; антиапекс; радиус земного экватора; коэффициент аккомодации.
b — длина базиса; полярный радиус Земли; малая полуось.
c — скорость света; скорость радиоволны; теплоемкость; c_x — коэффициент сопротивления (формы).
d — диаметр зрачка выхода; видимый диаметр метеора; длина проекции расстояния; горизонтальная дальность.
e — относительная влажность воздуха.
f — циклическая частота; фокусное расстояние.
g — ускорение силы тяжести.
h — угловая высота (угол места); диаметр зрачка глаза; постоянная Планка.

i — индекс метеорной активности; угол наклонения к плоскости горизонта; наклонение орбиты к эклиптике.
j — ускорение сопротивления воздуха (торможение).
k — коэффициент упругости.
l — угловая длина хвоста метеора; линейная длина тел; длина свободного пробега молекул.
m — звездная величина; m_∞ — проницающая сила; $m_н$ — масса атома водорода.
n — число наблюдений; число метеоров; n_h — часовое число, n_m — минутное число.
p — давление воздуха; коэффициент восприятия метеора; положение максимума яркости на траектории; вес наблюдения.
q — скоростной напор.
r — радиус; расстояние до метеора; наклонная дальность; коэффициент восстановления.
s — след; вектор Умова — Пойнтинга.
t — время.
v — скорость; v_k — конечная скорость; v_0 — скорость вступления в атмосферу; $v_{кр}$ — критическая скорость.
z — зенитное расстояние; волновое сопротивление.
α — прямое восхождение; угол Маха; собственный свет сетчатки; коэффициент проницаемости.
β — астрономическая широта; раствор конуса.
γ — отношение теплоемкостей; коэффициент контрастности.
δ — склонение.
ε — ошибка наблюдения; диэлектрическая постоянная; элонгация видимого радианта; ε' — элонгация истинного радианта.
$\varkappa$ — коэффициент отражения; фактор изменения числа метеоров на 1 зв. величину.
λ — длина волны; астрономическая долгота; коэффициент теплопроводности.
μ — показатель преломления; масса молекулы; коэффициент вязкости; μ_0 — молекулярный вес воздуха; μ_m — молекулярный вес метеорного тела.
ν — метеорная плотность; кинематическая вязкость; частота.
π — коэффициент внимания; параллакс метеора.
ρ — радиус видимости; ранг метеорной активности; плотность; радиус-вектор наблюдателя.
σ — видимая площадь метеора; яркость 1 кв. минуты небесной сферы; электропроводность; постоянная излучения.
τ — продолжительность свечения (полета) метеора; длительность радиоимпульса; коэффициент светимости.
φ — широта места наблюдения.
ψ — элонгация метеора от радианта; угол ракурса; угол падающего луча с отраженным; угол между оптическими осями.
Φ — относительное отверстие («светосила»).
Γ — потеря яркости; коэффициент сопротивления.
Λ — коэффициент теплопередачи;
ХиД — шкала Хертера и Дриффильда (чувствительность фотоэмульсий).
Σ — эффективная площадь антенны.
Ма — число Маха.
Re — число Рейнольдса.
Э — эффективность камеры.

...Падучая звезда
По небу темному катилась.
И рассыпалася...

А. С. Пушкин.
«Евгений Онегин», песнь 5.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Общий обзор метеорных явлений. Явление метеоров (в обиходе — «падающих звезд») известно человеку с тех пор, как он смотрит на небо. *Метеоры* (рис. 1) возникают в верхних слоях земной атмосферы при вторжении в нее из межпланетного пространства *метеорных тел* — одной из форм так называемых *малых тел* вселенной, к которым также относят обычно кометы, малые планеты (астероиды), спутники планет и иногда космическую пыль. Проникновение в земную атмосферу метеорного вещества наряду с частицами радиации — фотонами, космическими лучами, потоками корпускул, космической пыли и т. д. — составляет одну сторону материального обмена между Землей и космосом. Другая сторона — это диссипация газов земной атмосферы и испускание тепловой радиации Землей в мировое пространство.

Двигаясь в земной атмосфере со скоростями в десятки километров в секунду, метеорные частицы вызывают явления, которые земная техника пока еще не всегда в состоянии воспроизвести в земных лабораториях. Вот почему необходимо всестороннее изучение метеоров.

Обычный метеор вызван движением частицы, масса которой (доли грамма) способна вызвать разочарование. Однако благодаря основному своему качеству — скорости, метеорная частица развивает мощность в десятки и сотни киловатт, превышающую мощность автомобиля. Тысячи килограммометров энергии движения переходят в звуковую, тепловую, световую, электромагнитную, механическую, химическую и иные виды энергии. Расталкивая встречные частицы воздуха, метеорное тело увеличивает их тепловые скорости, диссоциирует молекулы и даже ионизует атомы; сжимая на своем пути цилиндр воздуха, оно передает ему основную часть своей кинетической энергии, порождая при этом воздушные волны. Разделяя и перемещая электрические заряды, метеор порождает магнитные и электрические явления, производит ионизацию земной атмосферы, тем самым влияя на распространение радиоволн. Воздействуя на воздушную среду, метеорное тело в свою очередь на себе испытывает ее действие: его вещество распыляется и плавится потоками встречного воздуха. За полсекунды метеорная частица испаряется целиком, «падающая звезда» угасает.

Но иногда происходит вторжение более крупного тела, массой в сотни граммов. Его полет может длиться 4—7 секунд, сила света может достигнуть десятков миллионов свечей, встрепенется

Рис. 1. Полет яркого метеора (картина Гётчинсона, Британский музей).

стрелка обычного компаса, послышатся своеобразные шелестяще-свистящие шорохи, от земных предметов, как гигантские змеи, поползут черные тени. Такой метеор мы назовем *болидом* (см. фронтиспис). Яркие болиды могут быть видны даже днем при полном солнечном свете. Ночью можно видеть оболочку болида, переходящую в трепещущий *хвост*; проникая в нижние слои атмосферы, болид

разбрасывает мелкие кусочки — *искры*, а на месте его полета остается туманная полоска — *метеорный след*, состоящий из ионизованного воздуха и распыленного вещества метеорного тела. У *дневных* болидов следы бывают освещены светом Солнца; тогда *пылевой след* виден часами и наблюдение за ним покажет направление и скорость стратосферных течений (рис. 2). Через 3—5 минут после полета

Рис. 2. След болида 12 декабря 1905 г. по Ц. Г. Бадманжанову (Алашань, Китай).

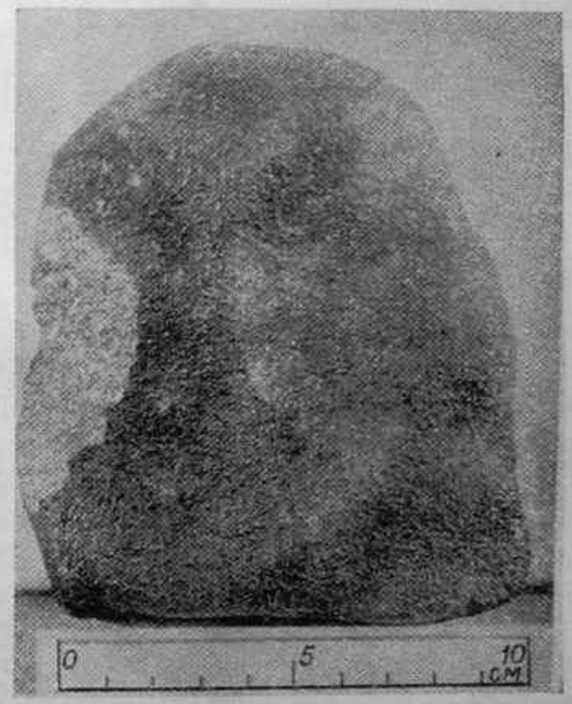


Рис. 3. Каменный метеорит Червоный Кут. Упал 11 июня 1937 г. Вес 1,8 *кг*. Слева — место отколовшейся части.

крупных болидов доходит звуковая волна, как отдаленный удар грома с раскатами. В некоторых случаях она производит сотрясение почвы — *гиперсейсмы*.

Еще более крупные метеорные тела могут вследствие сопротивления воздуха потерять свою космическую скорость до того, как их разрушит «воздушная эрозия». Их скорость снижается до предельного значения, определяемого сопротивлением воздуха; под влиянием земного притяжения оплавившиеся метеорные тела будут падать, как падает всякий тяжелый предмет. Это падение длится обычно 2—3 минуты; со скоростью в десятки метров в секунду, опережаемое свистом, космическое тело в виде черного несветящегося предмета падает на Землю и с этого момента называется *метеоритом* (рис. 3).

История науки знает случаи падения таких крупных метеоритов, что сопротивление воздуха не успевало снизить их скорость до предельной (для данной массы) величины и они ударялись о почву

со скоростями в несколько километров в секунду. Но так как практически уже при скорости $v \cong 4$ *км/сек* энергии движения достаточно, чтобы при ударе любое тело превратить в пар, то большие метеориты, массой в сотни и более тонн, производили при падении взрыв, хотя сами никакими взрывчатыми веществами начинены не были. На месте удара возникает *метеоритный кратер*, которых ныне известно на нашей планете более полутораста (рис. 4).

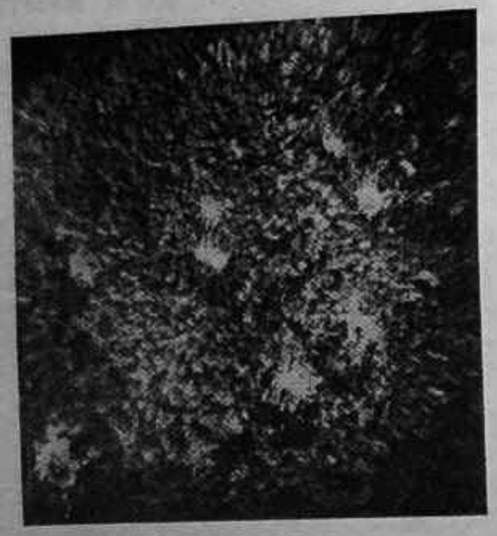


Рис. 4. Метеоритные кратеры в Сихотэ-Алинской тайге. Фотография с воздуха (по Р. Сарыбатырову).

Чем крупнее метеорные тела, тем реже происходит их встреча с Землей. Наоборот, чем они мельче, тем их количество больше. Существуют настолько слабые метеоры, что для наблюдения их надо применять телескоп. Если бы наш глаз обладал «телескопической» проницающей способностью, то каждую ясную ночь мы видели бы на небе ежесекундно сотню мельчайших «телескопических» метеоров. Каждое мгновение над нашей головой бесшумно и незримо для нас происходит звездный дождь, о котором обычно мы и не подозреваем. Мельчайшие метеорные частицы, его вызывающие, настолько многочисленны, что наибольший привнос метеорного вещества на Землю производят именно они, а не гигантские, но редко падающие метеориты. Эти космические пылинки при малых скоростях могут проникать в атмосферу даже без заметного свечения и потому без разрушения. Может быть, их значение окажется гораздо бо́льшим, чем можно предполагать. Продукт разрушения метеоров в атмосфере — метеорная пыль — может быть найдена повсеместно; она обнаружена даже на дне океана (рис. 5) и в геологических отложениях, имеющих возраст сотни миллионов лет.

Рис. 5. Железные шарики из красной глины океанских глубин (по Меррею и Ренару).

Несколько раз в столетие привычная картина звездного неба нарушается на несколько часов явлением *звездного дождя* (рис. 6). Он производит необыкновенное впечатление даже на специалиста: кажется, что небо внезапно «ожило», звезды пришли в движение и

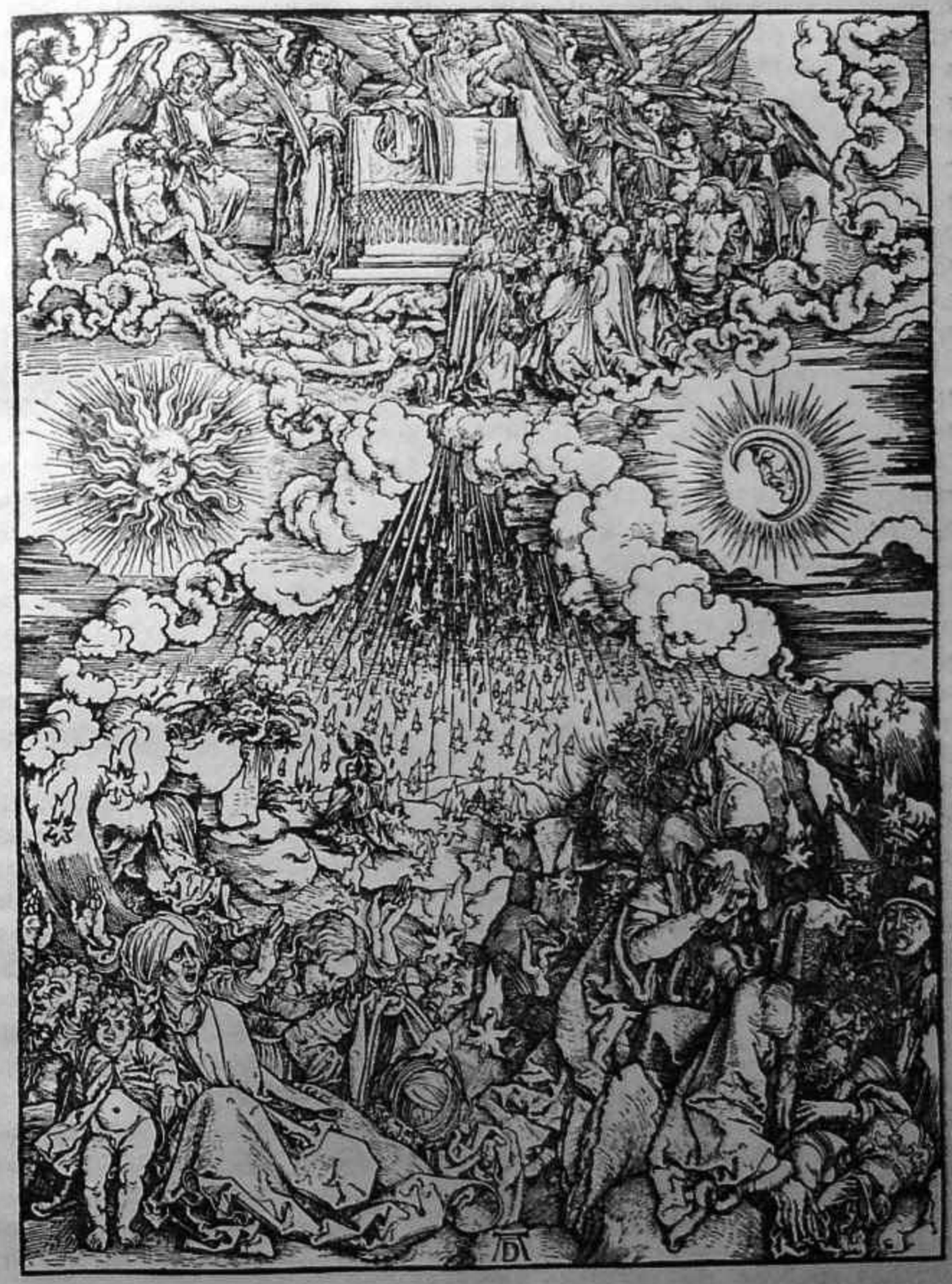


Рис. 6. Дождь падающих звезд в средние века (гравюра Альбрехта Дюрера). Видно явление расхождения метеоров от общей точки радианта.

вихрем несутся в пространстве, как хлопья снега в метель. Если бы они мгновенно остановились, то понадобилось бы несколько часов, чтобы их пересчитать; тем не менее их взаимные расстояния составляют десятки километров. Подобные скопления частиц образуют *потоки* метеорных тел. Метеорная астрономия может доказать общность происхождения частиц одного потока, размером с маковое зерно каждая, даже если бы они были удалены одна от другой на миллиард километров и между ними находились бы тысячи частиц других потоков. Метеорные потоки солнечной системы живут своей интенсивной жизнью: они возникают, развиваются, распадаются из-за воздействия Солнца и планет, и затем полностью иссякают. Одни из них молоды, другие стары, среди них есть гиганты и карлики. Молодые потоки обычно бывают связаны с какой-нибудь кометой, но так как кометы недолговечны, то у старых потоков таких комет нет: поток пережил комету, его породившую или возникшую вместе с ним.

Более крупные метеорные тела, дающие болиды и метеориты, приходят преимущественно из тех областей пространства, которые заняты поясом астероидов. Можно заметить непрерывную последовательность: малые планеты — микропланеты — метеорные тела — метеорные частицы — космическая пыль. Может быть, все они возникли при распаде гипотетической планеты, обращавшейся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера еще несколько сотен миллионов лет назад. Силы, вызвавшие этот распад, действовали медленно, но мощно; возможно, это было приливное воздействие гиганта Юпитера.

Если бы достоверно было установлено, что из Галактики, рядовым членом звездного населения которой является Солнце, попадают к нам метеорные тела, то это свидетельствовало бы о распространенности процесса разрушения небесных тел, идущего параллельно с процессом их возникновения. В образовании звезд крупную роль играет межзвездная метеорная материя, известная астрофизикам в форме пылинок, поперечником в десятую долю микрона и менее. Магнитными полями Галактики эти пылинки ориентированы так, что вызывают поляризацию света звезд, который они при этом также частично поглощают. Их громадные скопления образуют пылевые туманности, то светлые, то темные, в зависимости от наличия поблизости ярких звезд (рис. 7). В этих туманностях найдены узелки (глобулы), из которых, вероятно, образуются зародыши звезд и первичные звезды (протозвезды). Общее количество метеорной материи в Галактике огромно и превосходит массу светящихся звезд. Эта материя требует пристального изучения.

Но астрономии известны сотни миллионов других звездных систем — галактик. В более близких к нам галактиках легко видны клочья такой же темной метеорной материи, какая наблюдается и в нашей Галактике. Во многих случаях темная материя гигантским непрозрачным поясом охватывает экватор других галактик (рис. 8).

Мы вынуждены заключить, что метеорное вещество чрезвычайно распространено в природе, хотя оно и крайне рассеяно. Оно встречается в нашей пище и в воздухе, которым мы дышим, создает пылевой ореол вокруг Солнца, проявляет себя в кольцах Сатурна и в далеких галактиках. Наиболее далекие галактики могут быть

Рис. 7. Пылевая метеорная материя в Млечном Пути (созвездие Змееносца).

обнаружены современными радиометодами на расстоянии до 30 миллиардов световых лет. В этих огромных пределах сверхсистемы

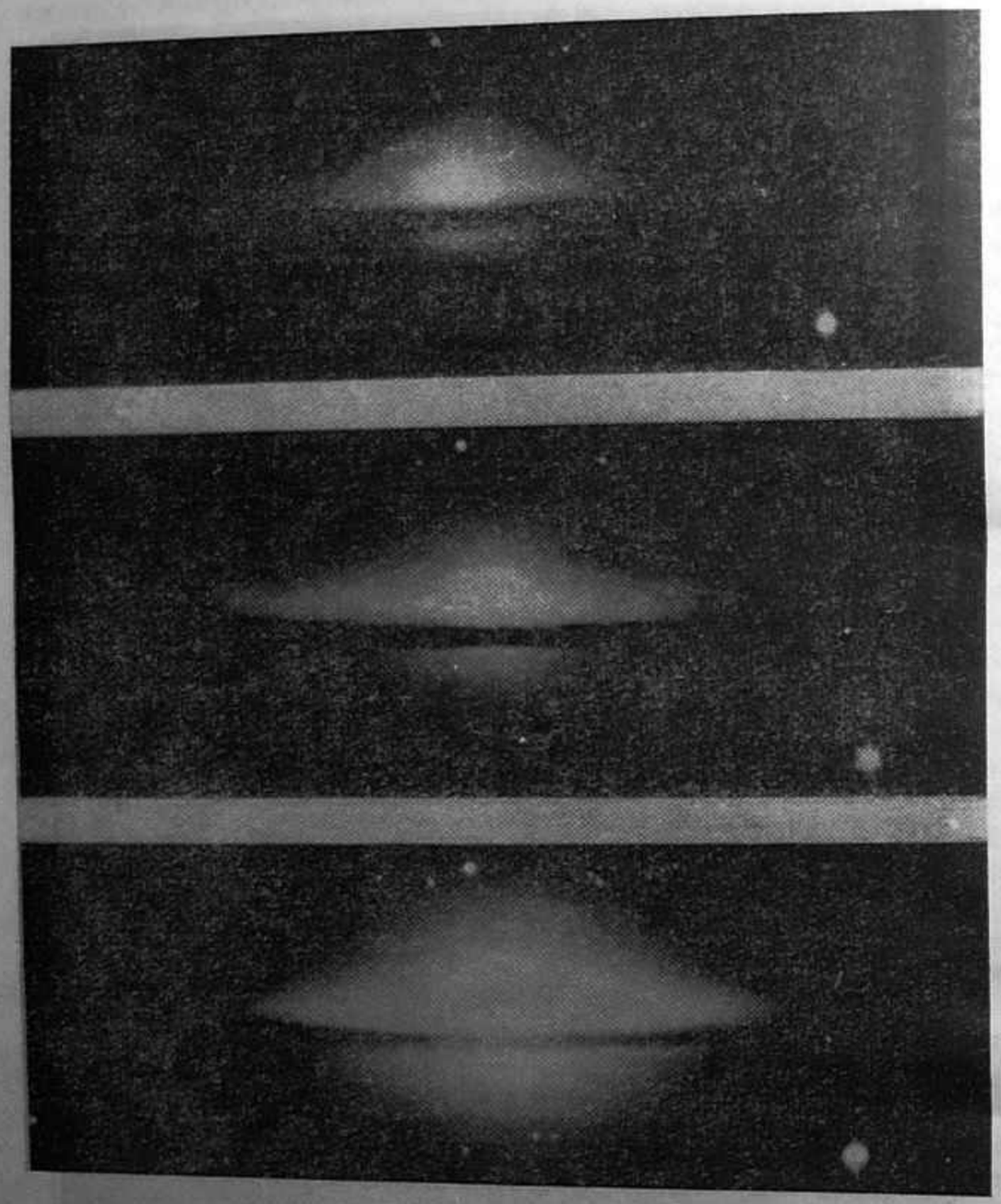


Рис. 8. Метеорная материя темных пылевых туманностей образует непрозрачный пояс во внешней части экватора некоторых галактик.

галактик — Метагалактики — метеорное вещество может являться как продуктом разрушения, так и материалом для формирования различных космических тел.

Упавшие на Землю метеориты являются осязаемыми представителями иных небесных тел, которые мы можем исследовать в наших лабораториях, хотя, быть может, еще недавно они находились от нас за сотни миллионов километров. Астрономы затрачивают большие усилия, чтобы приблизить к себе, хотя бы оптическими средствами, небесные тела, а здесь мы получаем обломки небесных тел на свой рабочий стол. Без знания их свойств не может быть построена современная теория происхождения и развития небесных тел — научная космогония.

Взаимодействие метеорной материи с земной атмосферой, на дне которой мы живем, позволило впервые выяснить ее строение на таких высотах, которые еще недавно были практически так же недоступны, как Марс или недра Земли. Современные ракетные исследования полностью подтвердили данные метеорных наблюдений. Таким образом, метеорные явления дали возможность исследовать верхние слои атмосферы и процессы, в них происходящие. Практическое значение этих работ очевидно.

Эта книга имеет целью систематически изложить наши знания о метеорных явлениях в земной атмосфере, а также о процессах, с ними связанных. Здесь мы не касаемся свойств метеорной материи вне Земли.

§ 2. Учение о метеорной материи. Его отношение к другим наукам. Наука о метеорных явлениях стала особенно быстро развиваться за последние 25—30 лет. В настоящее время можно указать следующие ее подразделения:

1. Метеорная астрофизика — изучение методами астрофизики метеорной материи за пределами нашей планеты.

2. Метеорная астрономия — исследование движения метеорных тел и их систем в поле тяготения небесных тел (и их систем) с помощью методов теоретической астрономии и небесной механики.

3. Метеорная физика — изучение физических явлений, возникающих при взаимодействии движущегося метеорного тела с атмосферой какого-либо небесного тела, например планеты, в частности Земли.

4. Метеорная геофизика — изучение физических явлений, возникших в атмосфере, гидросфере или литосфере планеты (в частности Земли) в результате взаимодействия с ними метеорного тела.

5. Метеоритика — изучение метеорной материи, достигшей поверхности Земли.

Таким образом, например, изучение пылевых туманностей в галактиках, космической пыли в солнечной системе и межзвездном пространстве, метеоритных кратеров на Луне и колец Сатурна входит в задачу метеорной астрофизики. Исследование возмущающего действия приливных сил на скопление метеорных тел, изменения их орбит из-за притяжения планет, учет влияния земного притяжения

на движение метеорного тела, исправление траектории метеора, искаженной движением и вращением Земли, составляет предмет метеорной астрономии. Метеорная физика исследует законы сопротивления воздуха движению метеорного тела, изучает процессы его нагревания, плавления, испарения и распыления, занимается рассмотрением ионизации, излучения и вообще перераспределения энергии метеорного тела. В ее область также входит изучение явлений, сопровождающих падение метеоритов. Далее, ионизация атмосферы, распространение звуковых волн и сейсмических явлений, вызванных полетом метеорного тела, движение метеорных следов, осаждение метеорной пыли, явления кратерообразования и т. п. составляют предмет изучения метеорной геофизики. Наконец, всестороннее исследование состава метеоритов, метеорной и космической пыли составляет задачу метеоритики, в то время как исследование воздушной эрозии, формы метеоритов, образований на их поверхности, дробления в полете и т. п. очевидно относятся к метеорной физике. Явления, связанные с выпадением на Землю космического материала (полет болидов, звездные дожди, падение каменных и железных метеоритных дождей, выпадение космической пыли, порождавшей «черные» и «кровавые» дожди), широко использовались служителями культов для укрепления в массах веры в чудеса и для насаждения религиозных суеверий. Поэтому изучение этих явлений в прошлом имеет связь с областью общественных наук, в частности, с вопросами истории материальной и духовной культуры человека.

Каждый из перечисленных отделов науки о метеорах, как обладающий специфической методикой и определенной областью применения, является самостоятельным, но в то же время, конечно, тесно соприкасается с другими областями науки и техники. Например, метеорная астрофизика использует весь мощный арсенал инструментальной техники, применяемой астрофизикой вообще, метеорная физика касается вопросов аэродинамики, атомной физики, термодинамики, акустики, спектроскопии, сопротивления материалов, внешней баллистики, термохимии и химической кинетики, минералогии и др. Метеорная астрономия связана с кометной и планетной астрономией, со сферической астрономией, картографией, астрогнозией, вычислительной техникой и др., метеорная геофизика — с аэрологией и аэрофизикой, физикой верхней атмосферы, ракетной техникой, радиотехникой, геомагнетизмом, сейсмологией, океанологией, геологией суши и моря, метеорологией, а также с изучением затмений, полярных сияний, серебристых облаков, ионосферы, сумеречных, акустических и приливных явлений в атмосфере и т. д. Наконец, метеоритика соприкасается с химией, минералогией, петрографией, геохимией, физической химией, химической термодинамикой, металлургией, радиохимией, учением об изотопах и т. д. В научную жизнь исследователя метеорной материи вошли специализированные обсерватории и лаборатории, новая техника и современная методика.

В соответствии с поставленной выше задачей эта книга разделяется на пять частей: история вопроса, методы исследования, данные метеорной астрономии, метеорной физики и метеорной геофизики.

§ 3. Проблематика исследований. В настоящее время подлежат разрешению в первую очередь следующие проблемы:

1. Разработка полной и точной теории взаимодействия метеорных тел с атмосферой Земли.
2. Природа телескопических метеоров и микрометеоритов.
3. Определение точных скоростей и орбит достаточно большого числа метеорных тел.
4. Изучение космической пыли на Земле, в солнечной системе и в Галактике.
5. Исследование метеорной активности в геологическом прошлом.
6. Выяснение роли галактической метеорной материи в солнечной системе.
7. Изучение движения и распределения метеорной материи в солнечной системе и в Галактике.
8. Изучение процесса эволюции потоков метеорных тел и их орбит.
9. Исследование взаимоотношения метеорных тел, комет и малых планет.
10. Происхождение метеорной материи, в частности метеоритов.

§ 4. Основные понятия и определения. Малыми телами вселенной условимся называть небесные тела, массы которых достаточно малы по сравнению с массами звезд и планет. К малым телам будем относить спутники планет, астероиды, кометы, *метеорные тела* (более мелкие из которых мы иногда называем *метеорными частицами*), космическую пыль, молекулярные группы. Космические молекулы и атомы в совокупности образуют межпланетный и межзвездный газ. *Метеорит* есть метеорное тело, достигшее поверхности какого-либо небесного тела и движущееся вместе с ним, тем самым утратив самостоятельное движение *). При разрушении метеорного тела в атмосфере образуется *метеорная пыль*, как новая форма метеорной материи. Группу метеорных тел, обладающих общим происхождением и движением, назовем *потоком метеорных тел*; весьма компактная группа есть *рой метеорных тел*. *Метеор* есть явление в атмосфере какой-либо планеты, в частности, Земли, при проникновении в нее одного из малых тел вселенной. Равным образом явлением метеора будет сопровождаться вторжение

*) Крошась на земле, метеориты могут давать *метеоритную пыль*. При падении кратерообразующих метеоритов могут образоваться *силикаглас*, а также метеоритные шарики и, возможно, *тектиты*.

в атмосферу ядра кометы (может быть, Тунгусский метеорит 30 июня 1908 г.) или астероида (возможно, Сихотэ-Алинский метеорит 12 февраля 1947 г.). Таким образом, метеор есть не объект, а процесс, сопутствуемый оптическими, термическими, акустическими, электрическими и многими другими явлениями. Рой метеорных тел в земной атмосфере наблюдается как *метеорный рой*, а поток метеорных тел — как *метеорный поток*. В целях практического удобства принято характеризовать метеор его *видимой яркостью*, оцениваемой в максимуме свечения в шкале *звездных величин*. В этой системе метеоры известны на огромном диапазоне от +16 до —30 звездной величины (зв. вел.), т. е. в отношении 1 к $2{,}5 \cdot 10^{18}$. С этой точки зрения целесообразно делить метеоры на следующие классы:

1. Ультателескопические метеоры: +17 зв. вел. и слабее (ультателеметеоры).
2. Слабые телеметеоры: от +16 до +12 зв. вел.
3. Телеметеоры: от +11 до +7 зв. вел.
4. Обычные метеоры: от +6 до +2 зв. вел.
5. Яркие метеоры: от +1 до —3 зв. вел.
6. Болиды: от —4 до —8 зв. вел.
7. Большие болиды: от —9 до —13 зв. вел.
8. Сверхболиды: от —14 зв. вел. и ярче.

Болиды 7—8 групп могут быть видны днем, почему их можно называть в этом случае дневными болидами. Наблюдаемые в телескоп метеоры ярче 6 зв. вел. не являются собственно телескопическими и их можно называть «псевдотелеметеорами». Термин «метеор» — греческого происхождения (μετέωρος — явление вверху, от μετά — там и ἀείρειν — подымающийся), слово «болид» происходит от греческого βολίς (снаряд, ядро) и латинского bolis (шар). В аристотелевом смысле «метеор» вообще обозначал различные атмосферные явления (в основном «метеорологические», например, осадки). К «огненным метеорам» (ignis) относили огни Эльма, блуждающие огоньки и «падающие звезды», последний термин и поныне встречается на Западе, где еще не установилась научная терминология в этой области (польское «gwiazda spadające», чешское «létavice», венгерское «csillaghullás», немецкое «Sternschnuppe», французское «étoile filante», итальянское «stella cadenta», испанское «estrella cadenta», английское «shooting (falling) star»). Для обозначения метеорного тела некоторые авторы в Америке употребляют слово «метеороид». Устаревшие термины: аэролит, уранолит и др. ныне выходят из употребления. К сожалению, в зарубежной литературе постоянно смешиваются различные понятия: «метеор», «метеорное тело» и «метеорит».

§ 5. Основные работы общего содержания. Обзоры и библиографии. Член-корреспондент Российской Академии наук Э. Ф. Ф. Хладни (1756—1827) в 1794 г. издал в Риге книгу [1], где рассматривает явления, происходящие в атмосфере при вторжении метеорных тел, и доказывает внеземное происхождение метеоритов. В этой книге заложены основы метеоритики, метеорной

Эрнст Хладни (1756—1827) — член-корреспондент Российской Академии наук, основатель науки о метеорах и метеоритах.

физики и метеорной геофизики. Невзирая на насмешки многих западных ученых, издевавшихся над идеей «падения камней с неба», Хладни продолжал пропагандировать свое открытие. В 1819 г. он выпускает в Вене книгу о болидах [5], где приводит литературу вопроса; в течение последующих двух десятилетий Хладни, а затем его последователь К. Э. А. Хофф публикуют дополнения к ней в Annalen der Physik [99, 102]. Био, Кетле, Шаль и Перри [97, 98, 105] также собрали много старинных наблюдений в летописях и хрониках средневековья. Русские летописи с астрономической точки зрения были исследованы Д. О. Святским [71—73].

В. Я. Струве, основатель и первый директор Пулковской обсерватории, филолог по образованию, собрал для этой обсерватории первоклассную библиотеку; одних инкунабул (книг, изданных до 1500 г.) в ней было 79 и в их числе сочинение Альберта Великого «De meteoris», изданное в Венеции в 1488 г. Каталог этой библиотеки, изданный в Петербурге в 1860 г. с предисловием Струве [26], содержит раздел 91 «О звездах и массах, падающих с неба», включающий более 80 работ. Второе издание каталога 1880 г. содержало уже 172 работы. В 1868 г. А. Крапоткин [89] составил «Перечень некоторых статей о болидах», также хранившийся в Пулкове. Во втором томе астрономической библиографии [44] в 1882 г. Гузо и Ланкастер перечисляют литературу того времени на 54 страницах. В двухтомном сочинении о метеоритах (1869—1871) О. Бухнер также приводит обширную литературу о болидах. В это же время (1867 г.) выходит «Meteoric Astronomy» Кирквуда в Филадельфии. По метеоритам исчерпывающая литература была дана в 1898 г. Вюльфингом в специальной монографии [52], дополнявшейся в «Fortschritte der Min., Petr. u. Krist.» в 1911, 1912, 1913, 1916 и 1922 гг., а также в «Каталоге метеоритов Британского музея» Прайора, последнее издание которого вышло в Лондоне под редакцией Хэя в 1953 г. Первый том «Bibliography on Meteorites» из намеченной пятитомной сводки по метеоритам, изданный в 1953 г. известным физиком Гаррисоном Брауном (Чикаго) [38], является монументальным справочником: он охватывает 8600 работ. Гораздо хуже обстоит дело с работами по метеорам: после библиографии Гузо и Ланкастера [44] имеется досадный 17-летний пробел до 1899 г., когда в Берлине начал выходить ежегодный указатель [33] работ по астрономии, в том числе и по метеорам, впрочем, в отношении последних крайне неполный и небрежно составленный. Литература 1882—1899 гг. частично аннотировалась Г. Клейном в издававшемся им журнале астрономо-геофизического направления.

Знаменитые работы Г. Ньютона [14] 1863 г. и Джованни Скиапарелли [108] 1867 г., составившие эпоху в науке о метеорах, почти не содержат библиографических данных.

После классической работы И. А. Клейбера по астрономической теории метеоров 1884 г. [11] и его же книги 1891 г. по определению орбит метеорных тел [12], в 1894 г. появился прекрасный обзор Шульгофа по метеорам [50], но не дающий библиографии, в 1899 г. — малодоступный двухтомник о кометах, болидах и метеорах Феличьяно, изданный на испанском языке в Сан-Пауло [37]. Почти одновременно в астрономическом словаре Валентинера вышел обзор Герца [40], содержащий большой фактический материал наблюдений. В 1903 г. отдельным изданием вышло в Петербурге сочинение Ф. А. Бредихина о происхождении метеорных потоков [13], подытоживающее работу всей его жизни. Первая четверть XX в. характерна отсутствием сколько-нибудь крупных монографий по метеорам

(во Франции, например, их нет и до сих пор, а в Англии не было до 1954 г.). В 1925 г. появляется монография Оливье «Meteors», на которой воспитывались многие исследователи нашего времени [47]. В 1937 г. отдельным изданием вышли «Die Meteore» Гофмейстера [41], помещенные в 17 томе геофизической энциклопедии Handbuch des Geophysik. В 1940 г. в СССР вышла книга И. С. Астаповича и В. В. Федынского «Метеоры» [16]. В то же время было опубликовано несколько кратких обзоров [18, 21, 22, 29]. Ввиду медленности выхода в свет ежегодника [33] во Франции был начат изданием более оперативный ежемесячник [34], прерванный войной на седьмом томе; здесь в 86 разделе хорошо отмечались работы по метеорным вопросам. С 1933 г. отрывочные данные публиковало Американское метеоритное общество в Popular Astronomy [59], но издание этого журнала прекратилось в 1951 г. В этом журнале были специальные отделы метеоров [59] и метеоритов [57]. В 1948 г. в Веймаре вышла книга Гофмейстера о метеорных потоках («Meteorströme»). Тому же вопросу посвящена книга М. Плавеца («Meteorické roje», Прага, 1956). Уиппл, Миллман, Гут, В. В. Федынский и др. в 1954—1958 гг. дали ряд интересных обзоров по отдельным областям науки о метеорах. С 1935 по 1952 г. советская литература весьма полно аннотировалась С. А. Шорыгиным в «Астрономическом журнале» [31], после чего с 1953 г. рефераты ежемесячно публикуются в реферативном журнале «Астрономия и геодезия» Всесоюзного института научной и технической информации [32]. С 1941 г. в Москве издается сборник «Метеоритика» [53], — первое периодическое специализированное издание в этой области; некоторые выпуски его также содержат библиографические сводки. Как известно, библиография нужна не только для того, чтобы указать хорошие работы, но и затем, чтобы предостеречь исследователя от потери времени на чтение плохих. В настоящее время полная библиография работ по метеорам, включая статьи и заметки, превосходит 10 000 названий. В конце нашей монографии приведены лишь важнейшие из них, числом около 1000.

ГЛАВА 1

РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА МЕТЕОРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 6. Доисторическое время. Устанавливая зависимость развития науки от производства, Энгельс указывает, что ранее других наук возникла «астрономия, которая уже из-за времен года абсолютно необходима для пастушеских и земледельческих народов» [62]. До

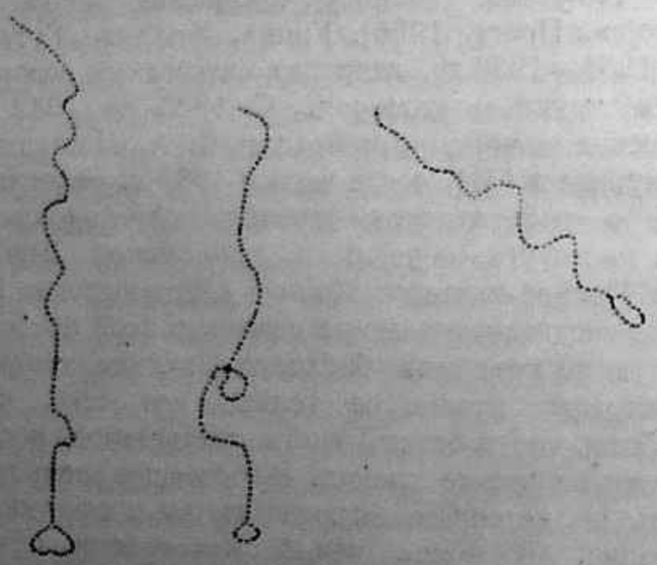


Рис. 9. След болида 5 декабря 1682 г. (по рисунку неизвестного европейского автора).

нас дошли изображения Большой Медведицы, высеченные на скалах, в той конфигурации, какую она имела десятки тысяч лет назад. Языкознание указывает на некоторые слова, связанные с метеорными явлениями, возникшие на заре культуры, когда еще складывалась речь человека. Следя за небом в силу практической необходимости, человек не мог не видеть метеоры. Таким образом, это явление известно не менее, чем на протяжении последних ста тысяч лет. Иногда полет крупных метеоров оставляет на небе яркий след, быстро искривляемый воздушными течениями так, что он принимает вид трещины (греч. «хазма») (рис. 9). Так как при этом доносились раскаты

и падали камни, то, естественно, отсюда возникло библейское представление о «тверди небесной», не слишком толстой и потому способной растрескиваться [72]; при этом сквозь трещину проникал «горний свет». Звезды были отверстиями в этой тверди. Так возникло представление о светлом рае (откуда Адам и Ева были низвергнуты, как падающие звезды, на Землю). Это явление — полет болида со следом — называлось «раскрытием неба», выражением, сохранившимся в Азии и до наших дней; древний митраистический бог метеоритов Зерван изображался с ключами, которыми он раскрывал небо.

На древнеперсидском языке понятия «небо» и «камень» выражаются одним словом (Е. Э. Бертельс). Но поскольку падают не только каменные, но и железные метеориты, то в других случаях одинаково произносились понятия «небо» и «железо», например, «э-ркин-а» на чайском языке (Восточная Грузия), или «эркин» и «эркад» на древнеармянском (Г. П. Сердюченко). В Имеретии существовало мнение, что небосвод состоит из железа (В. Беридзе), а «небо оковывается звездами».

С возникновением религий небо и небесные светила, противопоставлявшиеся Земле, часто являлись объектом поклонения, и неудивительно, что и метеориты, как «частицы неба», стали объектом культа. Их клали в усыпальницы, как пропуск покойнику на небо. Но экономика сильнее религии, и подчас из железных метеоритов, которым поклонялись, делали наконечники копий, иглы и даже мечи и щиты.

§ 7. Древние века. Эллада. Рим. Упоминания о метеорах, почти такие же древние, как и письменность — один из элементов культуры, определивших наступление исторического времени. Иератический папирус Эрмитажа № 116 упоминает о падении звезд в «Сказке о потерпевшем кораблекрушение», записанной 4000 лет назад. Сказание о Золотом Руне истолковывается, как описание яркого болида («золотой баран»), пролетевшего от Геллеспонта до Колхиды, куда его направились искать аргонавты в середине второго тысячелетия до н. э. Известен миф о сыне Солнца — Гелиоса Фаэтоне, помчавшегося по небу в колеснице своего отца мимо Тельца, Центавра, Льва, Скорпиона и Рака, между Змеею и Жертвенником (это — названия созвездий). Испугавшиеся кони понесли, разбросав по небу упряжь и обломки колесницы, а Фаэтон с горящими кудрями упал на Землю, где мать его Алкмена вместо тела нашла камень. Омраченное Солнце в тот день не появлялось на голубом небе. Это — точная картина полета и падения грандиозного метеорита над Грецией в меридиональном направлении в конце второго тысячелетия до н. э. (начало марта), сопровождавшегося выпадением космической пыли, помрачившей Солнце [71]. Разметанная упряжь соответствует остаткам развеянного следа болида.

Тогда же складывался эпос «Илиады», в IV книге которой стих 75—80 гласит «ринулась звезда ... вкруг нее неисчетные сыплются искры». У Гомера есть еще несколько упоминаний о метеорах.

Древний литературный памятник «Книга Еноха» говорит, как ангел «схватил звезду, прежде всех ниспавшую с неба». Стих 4, гл. 34 «Книги Исаии» гласит, что во время светопреставления «свернутся небеса, как свиток книжный, и все воинство их (т. е. звезды) падет, как спадает лист с виноградной лозы и увядший лист со смоковницы». О том же говорится в евангелии от Матфея: «Солнце померкнет, Луна не даст своего света и звезды спадут с неба» (гл. 24, ст. 29). По-видимому, уже тогда подобные помрачения (помимо затмений) были так же известны, как и звездные дожди. Библия сравнивает последние с падением плодов смоковницы, когда ее трясут.

Греческий историк Геродот передает скифскую легенду о священном золоте, падавшем горящим с неба и упавшем в пределах Орды, якобы поэтому названной «Золотой» (не смешивать с Золотой Ордой Батыя XIII—XV вв.).

Описанные выше метеорные следы, изгибающиеся и смещающиеся по небу, вызвали представление о небесных драконах (на Руси — змеях-горынычах, т. е. живущих «го́ре» — вверху). Затмения Солнца и Луны поэтому логически связывались с пожиранием этих светил драконом, а так как было замечено, что они происходят в узлах орбиты, то и сами узлы, как местонахождения дракона, стали обозначаться знаками ☊ и ☋, т. е. стилизованными изображениями метеорных следов. До наших дней дошли также термины «драконический месяц» и «драконический год».

Во второй год 78 олимпиады (около 462 г. до н. э.) в Кассандрии (Фракия) наблюдался «великий огненный шар, подобно зажженному облаку». Когда он упал на берег реки Эгос-Потамос, то жители, опомнившись от удивления и ужаса, нашли «настоящий камень порядочной величины» (Дамах). Об этом писали Аристотель и Плутарх, а Плиний Старший пять веков спустя разыскал большой камень; он был «несколько обгорелый». Двенадцатитомная «Энеида» Вергилия описывает полет другого болида: «Помутилося небо и страшно грянуло влеве; и, быстро упадшая с темные тверди, мрак лучезарной рассекши бравдой, звезда побежала... Видели мы, как она, разразившись над нашею кровлей, светлая, вдаль покатилась и, путь нам означив блистаньем, пала за Идою в рощу ... Долго протянут вдоль неба след пламенел и запахом серным дымилась окрестность» (перев. В. А. Жуковского, 1822 г.).

Мы упоминали о культе метеоритов. Эвзелий Памфил сообщает, что «Астарта, ... путешествуя по земле, нашла звезду, упавшую с неба. Она подобрала ее, сделала святыней и поместила на священный остров Тир». По-гречески выражение «апостол Петр» вообще

означает «посланец неба — камень». Древние евреи называли метеориты бэтилиями (гебраистское Beth-el означает «обитель бога»). Греки поклонялись метеориту, упавшему в 1478 г. (?) до н. э. на Крите *), как символу богини Кибелы, а также помещенным в храм Граций в Орхомене (Аркадия) метеоритам, упавшим в 1200 г. до н. э.; оракул в Дельфах гадал на метеорите; Артемида-Диана в Перге, Паллада из Трои, Венера Кипрская и Диана Эфесская были не статуями богинь, а метеоритами. Храмы с метеоритами имелись в 30 городах Средиземноморья уже во II—III вв. н. э. В Сирии в VI в. до н. э. упал метеорит, почитавшийся, как эмблема бога Солнца, и названный Элагабалом (по-сирийски «эла» — бог, «габал» — создатель) (рис. 10). Стремясь объединить в одних руках власть светскую и духовную, император Бассиан велел перевезти его в Рим, построил метеориту храм, женил этот метеорит на идоле Астарты, себя объявил главным жрецом метеорита, а прочих богов — его

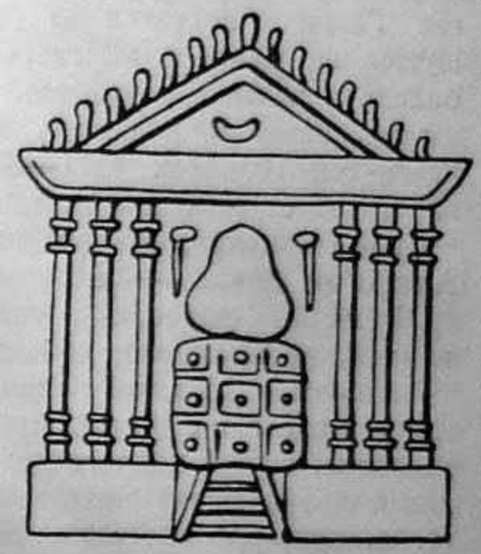


Рис. 10. Метеорит Эмиза, помещенный в храм Луны в Сирии, а затем перевезенный в Рим Гелиогабалом (старинное изображение).

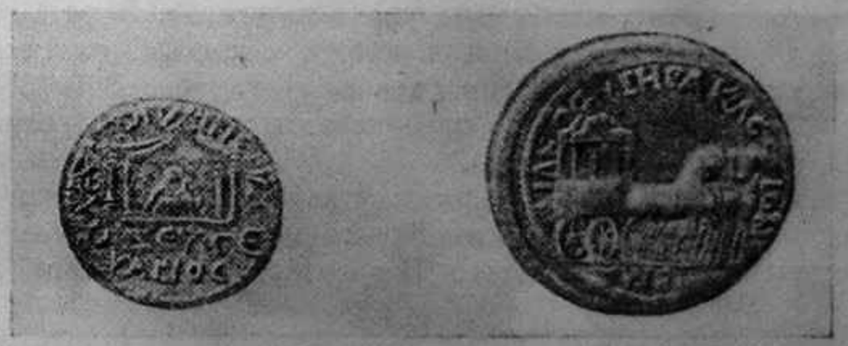


Рис. 11. Медаль Траяна (98—117 г. н. э.) с изображением метеорита, подвешенного на цепях в храме в Селевкии (Сирия), и монета, выбитая Антонием Пием (138—161 г. н. э.) в честь перевозки метеорита Эмиза.

министрами (около 220 г. н. э.). В честь метеоритов не раз выбивались медали (рис. 11).

*) Дата 1478 г. до н. э. весьма сомнительна, приводится по Лакруа, который сам отмечает ее недостоверность. Не следует, однако, забывать, что в XV в. до н. э. на Крите существовало одно из древнегреческих государств.

Державна Публічна БІБЛІОТЕКА УРСР

§ 8. Средние века. Аравия. Наибольшего масштаба поклонение метеоритам достигло у мусульман. Арабские авторы сообщают, что к колодцу Зем-зем, где стоял еще до нашей эры храм Луны, архангел Гавриил доставил из рая ярко-рубиновую звезду, превратившуюся на Земле в камень. Очевидно, имел место полет красного болида и падение метеорита. Его укрепили в углу четырехугольного здания, названного потому Кааба (арабское Ka'abah — куб). Абул Казем-бен-Абдаллах (571—632), известный под именем Мохаммед или Магомет («Восхваляемый»), создавая основы ислама, использовал «Черный Камень», объявив его святыней нового культа, правой рукой Аллаха на Земле — «Геджар-эль-Асвад».

Железные метеориты использовались на практике: в дамасские клинки, по преданию, добавлялось метеоритное железо.

Ангелы в 15 главе Корана говорят: «мы установили созвездия Зодиака и сделали его красивым для наблюдателей, охраняем его от всех дьяволов, которых прогоняем каменьями; подкрадывающегося из них для подслушивания преследует яркий зубчатомелькающий пламень» (т. е. метеор).

Это поверье перешло к ногайцам и татарам. «Бог убил их, заставив звезды упасть на них», говорит 8 сура Корана. Писатель И. Бунин изложил это стихами: «Вдруг ... огненно-красной змеею кто-то прорезал над темной землей небеса. Путник! Не бойся! В пустыне чудесного много: это не вихри, а джины тревожат ее; это архангел, слуга милосердного бога, в демонов ночи метнул золотое копье». Еще до сих пор в глухих углах Турана считается, что падение метеора — это полет копья Аллаха; при этом женщины трижды плюют в его сторону, чтобы оно упало на врагов. Сура 105 Корана упоминает о рое больших птиц, в когтях и клювах несущих раскаленные камни, бросаемые потом на воюющих. Ночи 840, 867 и 878 «Сказок Шехразады» повествуют о небесных стрелах против чертей и джинов (бесы низшего ранга).

Умирающая Римская империя оставила только одно наблюдение над метеорами, объясняя ежегодное августовское падение их «огненными слезами святого Лаврентия», сожженного в 257 г. н. э.

С перемещением очага культуры в Аравию усилилось внимание к метеорам. В 899 г. в Египте отмечено, что «звезды падали, как саранча», от страха «смертный не мог бросить взгляда на небо». Это было возвращение потока Леонид. Он был так обилен 23 октября 903 г., что этот год получил название «года звезд», а в Египте заключенные получили амнистию. В 933 г. «тряслись земля и небо, с которого скатывались яркие звезды». Союти в «Истории Каира» пишет, что 19 октября 1020 г. «звезды летали, как саранча, рассеивающаяся направо и налево; это продолжалось до зари, народ был в ужасе». Здесь виден намек на радиант. В 1060 г. от падения массы метеоров в Аравии «было страшно», в 1202 г. в Каире «народ был в страхе», в Европе молились, считая, что наступило светопреставление. Вместе с тем арабы делали первые научные наблюдения метеоров.

§ 9. Индия. Национальная эпопея «Махабхарата» среди 220 000 стихов содержит описания грандиозных метеорных феноменов. Например, гл. 17, стих 81 гласит: «Явился с небес сверкающий великим блеском диск Сударшана (болид)... Превосходный, с неприту пляющимися краями, он был подобен огню, ужасен и неотразим». В гл. 26, стр. 95 описано падение метеоритов днем с тучами космической пыли: «И вот для богов стали показываться знамения ... Любимый Перун Индры засверкал, полный смятения. Метеоры с пламенем и дымом падали днем, низвергаясь с неба... Подобного не наблюдалось прежде даже в битве между богами и асурами. Дули ветры в сопровождении ударов грома, падали метеоры со всех сторон, и небо, хотя и безоблачное, грохотало великим грохотом... Зловещие и страшные тучи дождили обильно кровью, и пыль, поднимаемая ветром, окутывала короны богов». Присутствие космической пыли делало дождь «кровавым».

30 форварди или 10 апреля 1621 г. в Джаландхар Парганахе (близ Лахора) упал железный метеорит, из которого «завоеватель мира» великий могол Джехангир (1569—1627) велел кузнецу Джауду сделать две сабли, нож и пику. Придворный поэт Хан описал это в стихах. Характеристика сабли «царская вспышка молнии», написанная по-персидски, и вместе с тем читаемая как число, означала 1030, т. е. год падения этого метеорита по летосчислению гиджры.

§ 10. Китай. Другие страны Азии. Наиболее богаты сообщениями о метеорах китайские летописи. Уже 23 марта 687 г. до н. э. произошло какое-то необычайное метеорное явление: «в течение ночи неподвижные звезды не появлялись, ночь была светла; в средине ночи звезды падали дождем» (анналы Ма Туан-лина). Под 211 г. сообщается, что близ Тонкина «упала звезда, превратившаяся в камень». Китайские летописи описывают падение 16 метеоритов за тот период, за который в Греции и Риме описаны только четыре. Древнейшее упоминание о болиде относится к 91 г. до н. э. — он был «больше Солнца». Научные наблюдения метеоров производились по императорскому указу, о чем сказано далее.

На гораздо более низком уровне тогда стояла Япония; первый болид там был отмечен только «во вторую Луну» 637 г. н. э., согласно многотомному сочинению Нихон Шоки эпохи 34 императора Иомеи. В полете болида суеверие японцев видело духа Тенгу с большими крыльями и длинным носом. При появлении метеорных дождей потока Леонид в 967, 1002, 1035 и 1037 гг. императоры объявляли амнистии и выпускали преступников из тюрем.

Другие народы, стоявшие на относительно низком уровне культуры, падение звезд или полет болида связывали с религиозно-мисти-

ческими представлениями (рис. 12). Например, обитатели Таити считали, что метеоры — это души умерших, бегущие за помощью от

Рис. 12. Полет болида, сопровождаемый падением метеорита. Изображен в виде юноши, несущего в руках камень (индейский эпос «Песнь о Гайавате»).

злых духов; в Африке во время полета болида жрецы заклинали его и плевали на него. Даже в 1933 г. во время метеорного дождя Драконид 9 октября негры Судана организовали барабанный бой для «устрашения злого духа, срывающего звезды с неба». Упавшие метеориты в Пакистане засыпáли землей, а в Туркменистане либо выбрасывали подальше, стараясь к ним не прикасаться, либо засыпáли, либо прикрывали кошмой, рассчитывая «через 7 лет найти золото». Следы болидов мексиканцы считали змеями (рис. 13). Индейцы навахэ сохранили легенду по поводу падения гигантского метеорита близ ущелья Дьявола — здесь «с неба сошел бог в огненной колеснице, осветившей небо и скрывшейся под землей».

Рис. 13. Змея, спускающаяся с неба (изображение мексиканских индейцев, 1529 г.).

Библейская легенда о Содоме и Гоморре, уничтоженных огнем с неба, видимо, связана с аравийскими метеоритными кратерами в пустыне Вабар. О падении железных метеоритов в Австралии, образовавших метеоритный кратер Хэнбёри, номады говорят: «Солнце прошло пожаром через скалы дьявола». Другие австралийские кра-

теры Вулф-Крик они называют «камнями летящего солнечного огня». Совершенно так же полвека назад у эвенков при падении Тунгусского метеорита возникла легенда, что «бог грома Огды сошел на их землю». Таким образом, одинаковые причины при одинаковых условиях породили одинаковые представления на разных материках в разные времена.

§ 11. Европа. Феодальному обществу средневековой Европы метеоры казались курьезным и бесполезным явлением природы, каким они для него и были. Средневековые хроникеры записывали известия о наиболее замечательных болидах и звездных дождях. В лучшем случае их относили к одному классу с огнями Эльма, шаровыми молниями и блуждающими огоньками. В населении преобладали представления вроде того, что каждый смертный имеет «свою звезду» на небе, падающую при его смерти. В научных кругах господствовало мнение Аристотеля о метеорах как атмосферных воспламенениях, что сохранилось в самом слове «метеор» (т. е. «явление в воздухе»). Церковь объявляла знамениями неба болиды и их следы,

Рис. 14. Падение метеорита (миниатюра в «Швейцарской хронике», по рукописи 1484 г. Дибольда Шиллинга).

звездные дожди и падение метеоритов (рис. 14): ими грозили и устрашали. Люди, считавшие себя просвещенными, до конца XVIII века относились к подобным явлениям скептически.

Даже эпоха Возрождения никак не отразилась на взглядах на метеоры: они не имели ценности для общества; еще трактат Лаланда 1792 г. по астрономии относит их к атмосферным воспламенениям.

Застой европейской науки отразился в наивно-суеверных взглядах на метеоры. Так, в Фессалии считалось, что ежегодно в горном Пелионе 6 августа раскрывается небо и видны небесные светильники (это поток Персеид). В «Житиях святых» в биографии Феодоты сообщается о двух болидах, пролетевших при утоплении Клавдии и Юлии, память которых чтится церковью 18 мая; один из болидов был звуковым. Во время метеорного дождя 763 г. народ был в панике, метеоры 849 г. названы «ужасными копьями», летевшими с севера и востока. 10—12 апреля 1095 г. активно действовали Лириды, «звезды падали от полуночи до зари», «как частый дождь в течение нескольких ночей». На Клермонском соборе (1095 г.) видели в этом предзнаменование великих переворотов в христианстве (как известно, не происшедших). Через год вновь «звезды летали, как пыль, уносимая ветром, и это продолжалось от утренних петухов до зари». 11 апреля 1122 г. тот же поток Лирид повторился («бесчисленное множество звезд падало на землю в виде дождя»). В XIII веке Данте (гл. 15 «Рая») писал: «... через спокойную и чистую прозрачность пробегает иногда быстрый огонь, заставляя двигаться настороженные очи — так появляется звезда, меняющая место, без того, чтобы там, где она загорелась, терялась бы звезда; это длится недолго».

Когда герцог Бургундский осаждал Париж, ночью 22 сентября 1465 г. внезапный болид устрашил осажденных, думавших, что он вылетел из лагеря неприятеля. Сообщают, что в корабельном журнале Колумба упомянут болид, напугавший суеверных его спутников 14 сентября 1492 г. (накануне открытия Америки).

§ 12. Россия. Первое упоминание о метеорах, заимствованное из Византии, относится к 28 августа 532 г., когда было «звездам течение, с вечера до заутрья, яко мнети всем, яко падають звезды» (Лаврентьевская летопись). Там же сказано, что 30 декабря 764 г. звезды «отторгаху бо ся на землю», в чем одни видели предвестие кончины грешника, а другие — праведника. Отсюда возникли выражения «родиться под счастливой звездой», «верить в свою звезду», «звезда его закатилась». Дождь Леонид 1202 г. в Тверской летописи отмечен так: «потече небо все и бысть чрвлено (красное)... и мнози с небеси звезды отторгахуся». Выражение из другой летописи «были осенью пустые беги» Карамзин трактует, как метеоры. Повторное возвращение Леонид 1533 г. «в граде Москве видеша мнози людие: звезды по небеси протягахуся яко же вервии, летааху с востока на зимьний запад»; радиант потока совпадает с этим направлением, а «мохнатые» метеорные следы — с образом натянутой веревки. В Новгороде Великом то же явление видел пономарь Тарасий: «множество ангел, стреляющих огнеными стрелами, яко дождь силный из тучи».

Ипатьевская летопись описывает болиды («змеи»); 1 марта 1215 г. «гром бысть по заутрени и вси слышаша, змьи видеша летящь»,

в декабре 1411 г. «полете от града от Кашина змий велик зело и страшен, дыша огнем и летяще с востока к западу». В 1091 г. «спаде превелик змей от небес»; болид был звуковым. Когда в 1552 г. Иван Грозный «воевал Казань», то в ночь приступа из стана русских воинов было видно, что из казанской мечети как бы вылетел болид с длинным хвостом; решили, что перед падением города из него вылетел «нечистый». 25 июня 1290 г. у Новой Ерги близ Устюга произошло грандиозное падение каменных метеоритов типа Сихотэ-Алинского: «многим и безчисленным камением поломило лес и дебри, овы древеса ис корени избиша, а иныя вполы положиша». То, что камни не упали на Устюг, церковь приписала «чуду» Прокопия Устюжского и описание события было дано в его биографии в «Житиях святых». В великоустюжском соборе имелась каменная чаша и лампада с надписью, что они вырезаны «из камня, падшего с неба 1290 г. в 25 день июня», а в 1838 г. купец Выдрин учредил каждогоднее молебствие 25 июня по этому случаю и еще лет 30 назад «на тучу» совершался крестный ход. Это считалось необходимым для поддержания веры в чудеса.

19 мая 1421 г. в Новгороде был «дождь мног и град велий и камение являшеся изо облака, спадшее на землю». В 1491 г. во Владимире наблюдался дневной болид, как «ужасно видение и страшно явление и грозно знамение гнева божиа»; духовенство «начаша по всему граду звонити», пока был виден его след. Духовенство же объявило, что дневной метеор 17 апреля 1764 г. в Новгороде это «огнь духа святого». Падение метеоритов 29 ноября 1662 г. в Белозерском крае вызвало своеобразный обряд в народе: из кудели делали шарики, поджигали их и пускали по воздуху, гадая по их полету [1]. Болид 15 августа 1663 г. в Белозерском уезде был объявлен «божьим посещением», от которого однако «собрались в церковь... со слезами и плачем».

«Летопись Сибирская» содержит «воздушные страхи Тобольска» [4], например, звуковой болид 3 июня 1701 г. В 1684 г. в Тобольске метеорит пробил «верх на шее большой главы и оттоле паде на паперть» церкви покровителя Сибири Дмитрия Солунского; конфузное происшествие было замято [68]. В Соликамске болид 20 декабря 1697 г. истолковывался как «знамение страшное» за грехи, «священный чин» города отпустил людей из собора лишь в третьем часу ночи (болид пролетел в 10 час. утра).

По А. П. Щапову [74] в XVII в. метеориты «приписывали воле богородицы... в наказание за грехи людей, употребление табака и нарушение церковных обрядов», а метеоры считали за след ангела, полетевшего за чьей-либо душой. Осетины считали, что звезду человеческой жизни срывает ветер. В. И. Даль приводит поверье «звезда падает — к ветру», встречавшееся на Южной Украине еще в 1925 г. Болиды считались за нечистого, вселявшегося в бесноватых. При полете болидов в XVII в. «ужасались, обстрашались сильно»; большое

число метеоров в июле-августе приписывали страдной поре, когда больше умирает людей. В Подольской губ. метеоры считались свечами сатаны, которые тот тайком ставит на небо, а всевышний, заметив это, палкой сбивает с облака. В Калужской и Тульской губ. полет болида («маньяка») трактовался как низвержение нечистого, на Харьковщине — как полет ведьмы, у вотяков — шайтана; метеоры на Холмской Руси назывались головиками, в Петербургской и Ярославской губ. — ужами. «Люцидарий», изданный передовыми деятелями в XVI в. в целях просвещения, только усугублял путаницу понятий; о метеорах, например, пояснялось, что это «огонь изпущает над звездами искры», когда «буря велия от ветров... воздух одолеет». В 1807 г. А. Стойкович в Харькове из западных источников сообщал [2], что «ниспадающие звезды примечаются наиболее в таких местах, где почти целую зиму на лугах и полях стояла вода». В «Астрономической географии» Делоша (Петербург, 1815 г.) § 182 утверждает, что «летающие звезды не более удивительны, нежели огни св. Эльма»(!). Одно и то же падение метеоров почти одновременно Мушенбрук в Голландии объяснял жарой (Персеиды), а Крафт в Петербурге — стужей 1741 г., когда температура была — 38° С и был построен на Неве «ледяной дом» (Андромедиды). Менее ста лет назад, в 1867 г., Кувье-Гравье в Париже пытался предсказывать погоду по метеорам, различая среди них «мокрые» и «туманные».

Но гораздо более достойно сожаления, когда за рубежом и в наши дни появляются высказывания вроде того, что метеориты есть причина смерчей, циклонов, гроз и т. д. (председатель французской комиссии по изучению бедствий в журнале «Je sais tous», № 271, за июль 1928 г.). Даже березовский городничий (Якутия) за сто лет до этого «высказывания» в рапорте № 547 управляющему Тобольской губернией по поводу «достойного на небе происшествия» — звездного дождя Леонид 1 (13) ноября 1822 г.—писал, что оно «жителям равно скоту никакого вреда не причинило» [68].

ГЛАВА 2

ИСТОРИЯ НАУЧНОГО ИЗУЧЕНИЯ МЕТЕОРОВ

§ 13. Древние века. Попытки научно объяснить явление метеоров и падения метеоритов мы находим уже в первом тысячелетии до н. э., хотя они были примитивны, в соответствии с общим состоянием научных знаний. Древнегреческий философ-материалист Анаксагор из Клазомен (ок. 500—428 г. до н. э.) объяснял, что метеориты, вроде упавшего у Эгос-Потамос, до падения «удерживались наверху из-за быстроты движения», т. е. центробежной силой при вращении неба. Аристотель (384—322 г. до н. э.), «самая всеобъемлющая голова» среди греческих философов (Энгельс), считал метеоры земными испарениями, воспламеняющимися от соприкосновения с «небесным огнем», что отразилось в слове «метеор» (новогреческое μετέωρος — нечто, парящее в воздухе). Ионийская школа, к которой принадлежал Анаксагор, догадывалась о космическом происхождении метеоров, но не могла этого доказать. Математик александрийской школы Аполлоний Пергский (III в. до н. э.) и философ Диоген Аполлонийский считали, что кроме видимых звезд имеются и невидимые, которые «нередко падают на землю и угасают, подобно каменной звезде, упавшей воспламененной близ Эгос-Потамоса». Писатель Плутарх Херонейский (50—125 г. н. э.) в биографии Лизандра пишет: «падающие звезды ... скорее падающие небесные тела ... падают не только на обитаемых местностях земли, но и на великие моря, где их невозможно отыскать». Эпикур в письме к Пифоклу приводит современные ему воззрения на метеоры, «свободные от мифа»; тут и трение звезд с выпадением обломков, если их сдунет ветер, и соединение атомов, способных дать пламя, и воспламененный от трения порыв ветра; «есть и другие объяснения». Из-за авторитета Аристотеля до XIX в. на Западе торжествовала его «метеорологическая» точка зрения на метеоры.

«Славное исключение составляли китайцы: они по крайней мере отмечали это явление, как нечто заслуживающее внимания», — писал И. С. Абельман в 1898 г. [15]. В Европе за пять первых веков н. э. нет ни одного упоминания о метеорах. Народы Азии интересовались ими больше, чем европейцы; Китай называл себя Небесной империей, разным областям которой соответствуют определенные

участки неба; поэтому с 960 г. особый «Отдел небесного порядка или астрономии» следил за кометами и метеорами согласно императорскому повелению. В общем наблюдения производились на протяжении двух с половиной тысячелетий; их список дошел до нас в 191 и 192 книгах энциклопедии историка XIII в. Ма Туан-лина и «Истории Китая» 24 историков. Архивы, в том числе и наблюдений метеоров, публиковались после смены династии. При Манчу были обнародованы архивы династии Мингов, прекратившейся в 1647 г., поэтому известные нам данные охватывают период с 687 г. до н. э. и до этого года. Около 600 наблюдений перевел и издал во Франции Био.

Ценные наблюдения дала Корея, тяготевшая к культуре Китая; Хираяма в 1933 г. опубликовал ее метеорные наблюдения. Начало японских наблюдений относится к VII в. н. э. В двадцать пятом томе сочинения Нихон Шоки описывается падение метеорита в жилище вельможи Ошикацу Йеми. В 1958 г. С. Имото и И. Хасегава опубликовали 118 записей Китая, Кореи и Японии в сообщениях Смитсонианского института по астрофизике (т. 2, № 6).

§ 14. Средневековье. Наблюдения арабов. В Аравии первое описание метеорного дождя относится к 12 октября 902 г. («бесчисленное количество падающих звезд рассеивалось по небу»); это были Леониды. Багдадский ученый Ибн-аль-Джауси (1114—1201) в книге «Мунтазам» сообщает, что 12-го Джуль-каада 323 г. гиджры «звезды падали в Багдаде и Куфе от начала ночи до ее конца»; дата соответствует 14 октября 935 г. (Леониды). Он же упоминает о спорадическом метеорном дожде за час до рассвета 16 января 1060 г., сопровождавшемся громом, о 13 болидах за 925—1060 гг.; один из них был «как Солнце», с громом, второй на рассвете 21 мая 1036 г. даже «превосходил Солнце»; его длительный след напоминал «голубого дракона». Факты «Мунтазама» почерпнуты от более ранних историков, например, Мискаваихи, использовавшего наблюдения астронома Табит ибн-Синана, лично наблюдавшего дождь 935 г. Уроженец Ферганы астроном Аль-Фергани впервые заметил, что метеорами можно пользоваться для определения разности долгот; впоследствии на это указывали Галлей в 1719 г., Линн в 1727 г., Маскелайн в 1782 г., Бенценберг в 1802 г., а Брандес в 1823 г. действительно определил разность долгот Бреславля и Глейвица. Знаменитый Абу-ибн-Сина (Авиценна) в «Книге исцеления» излагает свои естественнонаучные воззрения, в том числе на состав метеоритов, которыми он занимался. Альгазен в XI в. по сумеркам определил высоту атмосферы в 52 000 «шагов».

§ 15. Наблюдения в России. По Карамзину, русские летописцы были «первыми наблюдателями тверди небесной». В Лаврентьевской летописи под 6752 г. (1243 г. н. э.) изложены воззрения безымянного автора на небесные явления, упоминаются «звездные течения»,

там же в 1091 г. отмечен звуковой болид, долго видимый след болида 11 февраля 1110 г. Ипатьевская летопись описывает видимый диск болида в 1144 г. («ярко кругу огненну»); его пылевой след «в образе змья великого и стоял по небу с час дневный и разидеся». Затем болиды отмечены в 1215, 1411, 1476, 1491, 1556, 1564, 1663 и 1698 гг.

В Тобольске 2 августа 1656 г. «звезда погонная ... побежала по небу на запад». «Летопись Сибирская» (Тобольск, 1656—1753) описывает болиды 1674, 1683, 1696, 1701 (дрейф следа), 1705, 1741 гг., причем последний — звуковой («как гром грянул»).

Очень тщательно на Руси описано падение метеоритов; первое из них 25 июня 1290 г.: «найде внезапу над град Устюг облак темен и бысть яко ночь темная ... явишася и восташа ... тучи великия, из них же блистаяся молнино блистание безпрестани и грому убо многу и страшну бывшу ... и земли от того страшного труса непрестанно колебатися и трястись; тогда же бывшу ... зною превелику зело». В двадцати «поприщах» отсюда (почти столько же километров) «поломиша на пустынях (пустырях) многия леса и дебри». В мае 1421 г. в Новгороде «в нощь найде туча дождевая страшна зело и падаша с дождем камение, акы яблока, а иное аки яица»; в Пскове тогда же «видеша облака огненная». В 1662 г. 29 ноября ст. ст. близ Кириллово-Белозерского монастыря «звезда велика, долга скоро вышла ... и потом камение падали с великою яростию великое и малое горячее, а иное с жару рвалоси, а потому знати, что падало горячее — в снегу около оттаивало, от иных, кои больше и в землю уходило и вмерзало». Описание исключительно по точности, логичности и лаконизму. В 1684 г. в Тобольске «гром велий,... из тучи паде камень». Летописец, как и широкие массы народа, был знаком с падением метеоритов, отрицавшимся официальной наукой Запада в XVIII веке, несмотря на отдельные правильные высказывания. Например, Парацельс в 1750 г. писал: «достовернейшим образом установлено, что с неба спускаются камни». Призывы Шейхцера в 1697 г. и Галлея в 1711 г. наблюдать метеоры остались также безрезультатными, в то время как на Руси наблюдения над звездным небом, в том числе за метеорами, еще при царе Алексее Михайловиче возлагались на караульных стрельцов (Д. О. Святский).

§ 16. Первые научные наблюдения метеоров были начаты в России в Екатеринбурге, как показывает «Репорт обсервациях метеорологических учиненных в Екатерин Бурхе генваря с 15 числа 1734 года», найденный в 1952 г. Л. А. Федоровым (рис. 15). Здесь запись метеоров велась Андреем Татищевым. По дошедшим до нас наблюдениям болида 20 июля 1704 г. определена его траектория (рис. 16). Академик Крафт в Петербурге уже 7 декабря 1741 г. отметил небывалое количество метеоров; это оказались Андромедилы.

Кузнец Яков Медведев из деревни Медведевой у Абаканска в 1749 г. нашел сорокапудовую «крицу железа» на водоразделе

рек Убея и Сисима и «с великою трудностью», движимый любознательностью, перевез ее домой, о чем потом узнал П. С. Паллас, совершавший путешествие для описания России. Это «Палласово Железо» везли две зимы санным путем в Петербург (1772—1774 гг.) и образцы его разослали европейским музеям. В некоторых из них

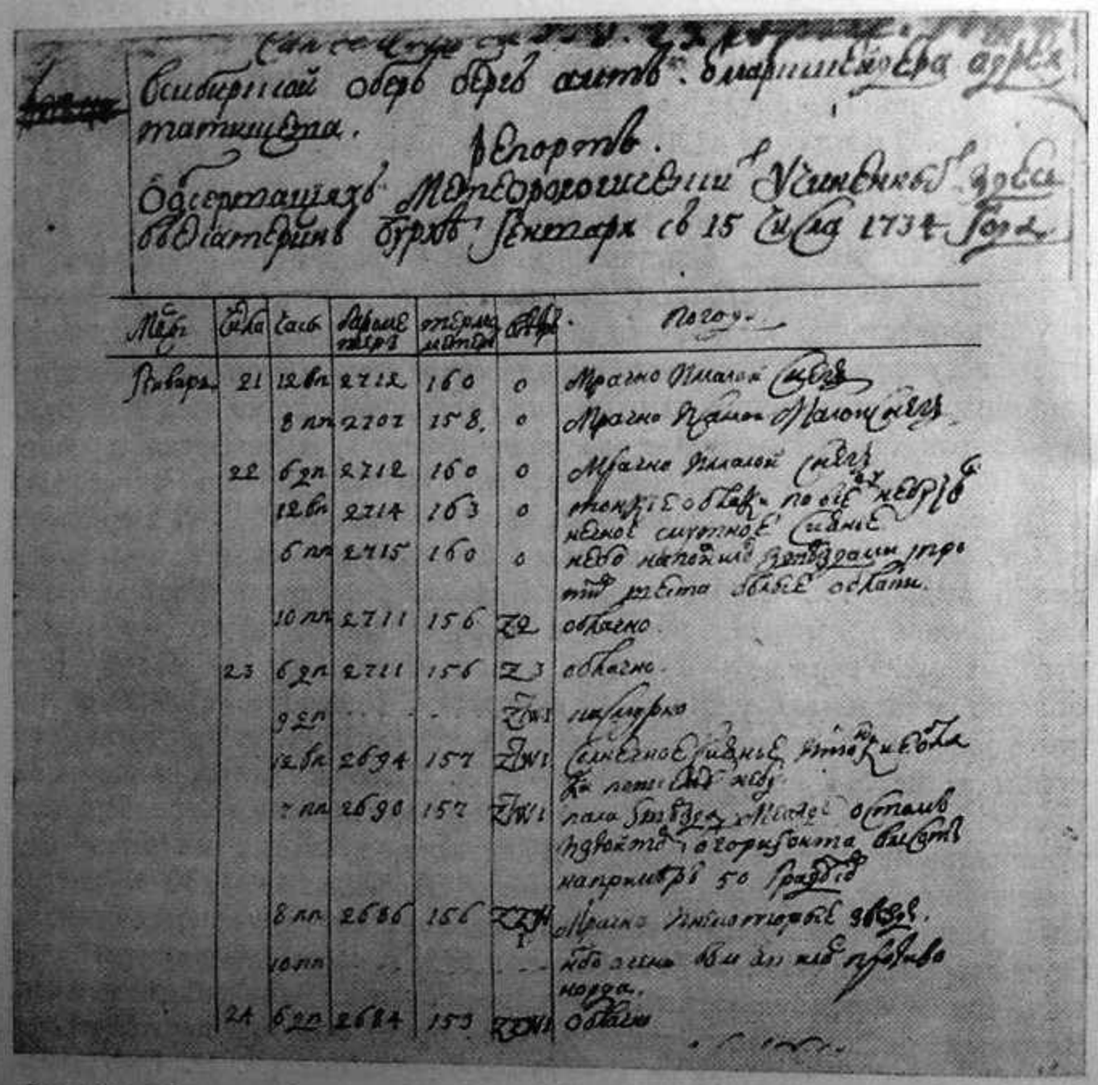


Рис. 15. «Репорт обсервациях метеорологических» А. Татищева (1734 г.). Под 23 января запись о наблюдении «падающей звезды».

они легли в основу метеоритных коллекций. Размышляя над происхождением этой глыбы, немецкий физик Хладни, впоследствии член-корреспондент Российской Академии наук, сделал вывод о ее космическом происхождении, связал с прежде известными падениями и полетом болидов, следствием чего явилось его известное произведение «О происхождении найденной Палласом железной массы», изданное в 1794 г. в Риге [1]. Не видя до 1798 г. ни одного метеорита, силой научной интуиции Хладни сумел доказать возможность

падения метеоритов, общность болидов и метеоров и их космическую природу. Это заставляет считать Хладни основателем метеоритики, метеорной физики и метеорной геофизики. Но для обоснования

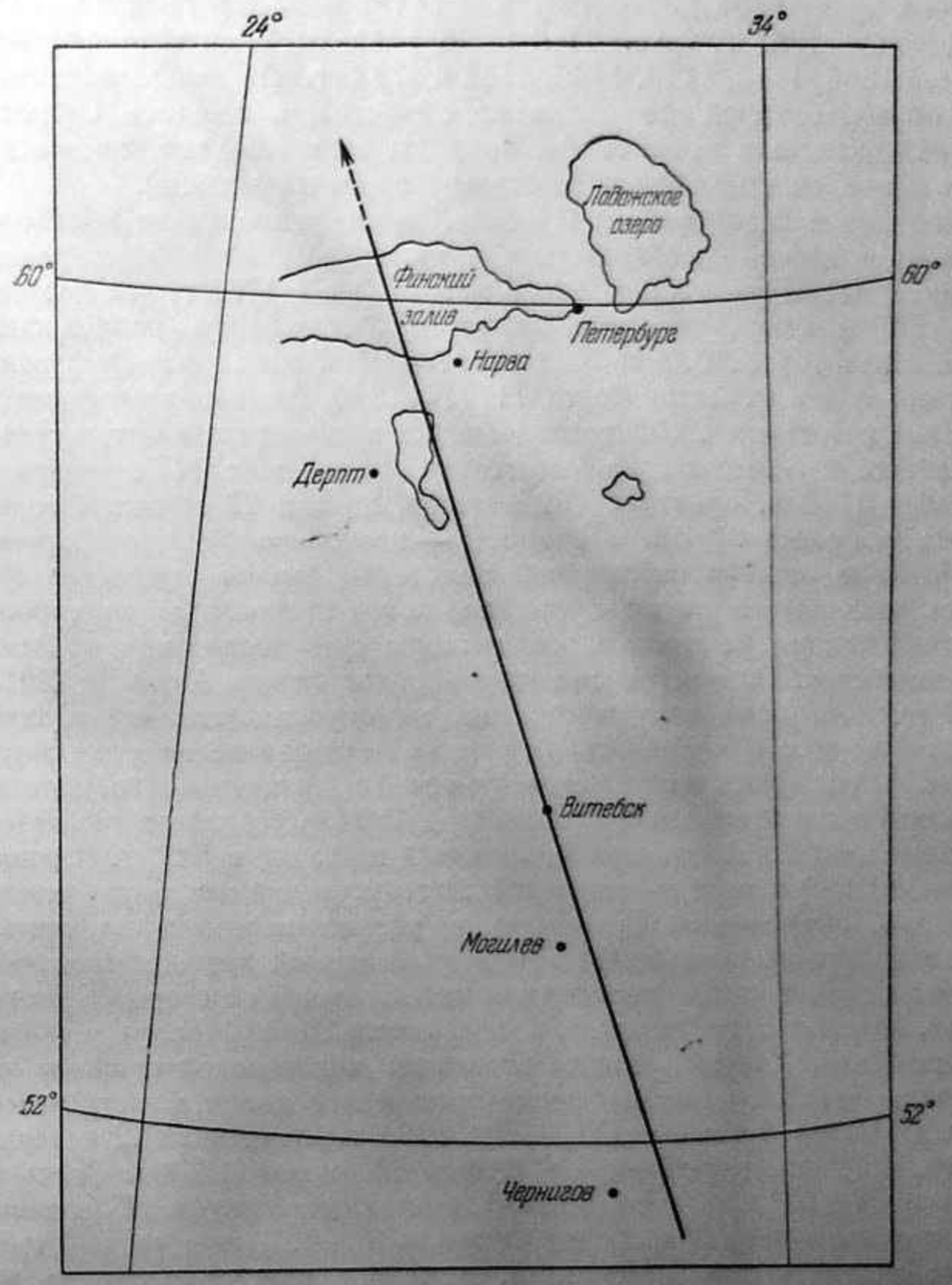


Рис. 16. Путь болида 20 (31) июля 1704 г., пролетевшего более 1100 км, из радианта Сагиттарид; точками отмечены пункты наблюдений.

космической природы метеоров требовались новые наблюдательные факты. Позиции метеорологической теории метеоров были еще очень сильны и являлись общепризнанными.

§ 17. Определение высот и скоростей метеоров. Высота *болидов* была известна в Европе с 1623 г., когда Шикард в отдельной монографии показал, как путем засечки ее можно найти из наблюдений в разных пунктах. Затем Монтанари нашел траекторию болида 1676 г., а Дерфель — 1683 г. (рис. 17). Были найдены высоты и скорости болидов 1686, 1718, 1719, 1745, 1758 и 1783 гг. Они не противоречили идее об атмосферной природе этих объектов, а большие скорости еще не доказывали космической природы этих тел, так как в атмосфере такие скорости были известны (например, молния).

Поэтому в своей работе [1] сам Хладни указывал на необходимость определения высот *метеоров* из наблюдений в двух разных точках. Несложную теорию этого метода уже в 1788 г. дал Кестнер. Обе работы были, вероятно, известны Лихтенбергу, побудившему своих студентов Г. В. Брандеса (1777—1834, впоследствии физик и инженер) и И. Ф. Бенценберга (1777—1846, метеоролог) провести базисные наблюдения. Они расположились в предместьях Геттингена — Клаусберге и Зезебюле, на расстоянии 14 *км* и с 11 сентября по 4 ноября 1798 г. отметили 402 метеора, из них 22 общих. Средняя высота оказалась 98 *км*, а скорость — несколько десятков *км/сек*.

Но из-за ошибок наблюдений некоторые высоты появления оказались ниже высот угасания, что дало повод сторонникам метеорологической теории утверждать, что метеоры суть восходящие от Земли воспламенения. Инженер Бивен и метеоролог Фэри в Англии в 1801—1802 гг. повторили эту работу, но не опубликовали ее, и таким образом вопрос о космической природе метеоров не получил разрешения. Требовалось астрономическое доказательство. Открытие азимутальной вариации Брандесом в 1804 г. (преобладание метеоров в восточной половине неба), годичной вариации в 1823 г. (осенний максимум) и суточной вариации в 1825 г. (утренний максимум), хотя и правильно объясненные Брандесом, не убедило метеорологов, считавших эти явления доказательством именно земной природы метеоров.

Несмотря на поток насмешек и издевательств со стороны многих людей, начиная с американского президента Джефферсона и кончая Гемфри Дэви, Хладни добился признания космической природы метеоритов: через два месяца после выхода его книги выпали метеориты в Италии у Сиены, с 1795 по 1803 г. произошло 12 падений, из них наиболее разительное у Л'Эгля 26 апреля 1803 г. Здесь на площади 4×10 *км*^{2} выпало 2—3 тысячи метеоритов. Посланный министерством внутренних дел Франции Ж. Д. Био в своем отчете писал: «Я почту себя счастливым, если мне удастся поставить вне сомнения одно из наиболее удивительных явлений, которое люди когда-либо наблюдали».

В области изучения метеоров факты накоплялись гораздо медленнее. 12 ноября 1799 г. в Кумане (Венесуэла) Гумбольдт и Бонплан наблюдали знаменитый звездный дождь Леонид, причем старожилы вспомнили о таком же дожде в 1766 г. В США в ночь на 20 апреля

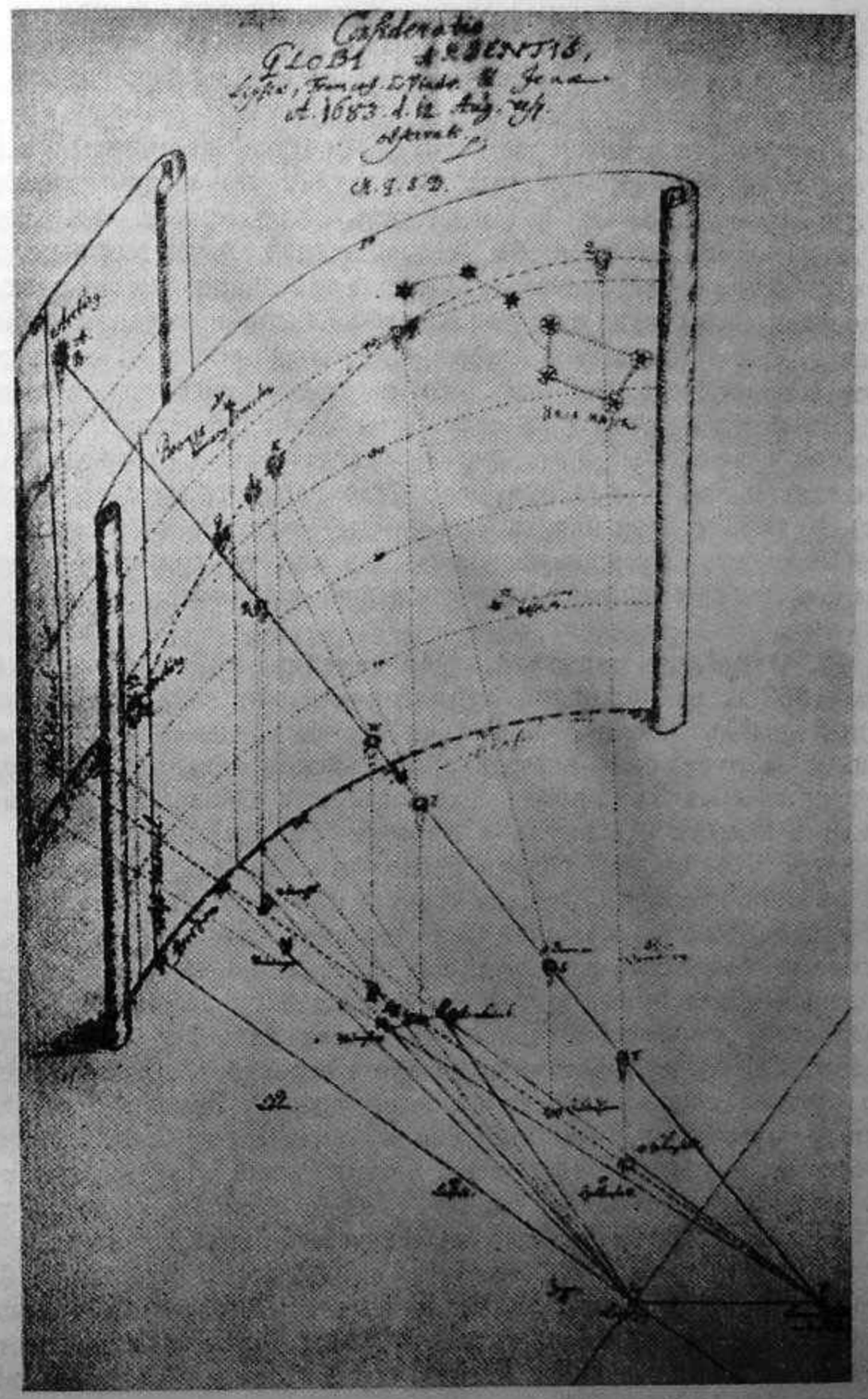


Рис. 17. Одно из первых определений высоты метеора, произведенное Дерфелем по наблюдениям болида 12 августа 1683 г. из Лейпцига, Иены и Франкфурта на Одере (по Циннеру).

1803 г. произошел метеорный дождь Лирид, но Геррик опубликовал данные о нем только в 1839 г., а Гумбольдт свои наблюдения 1799 г. — лишь в 1816 г.; они не оказали в свое время влияния на развитие метеорной астрономии.

Необходимость объяснить, откуда берутся метеориты, вызвала гипотезу «лунаристов»; крупные математики вычисляли траектории полета с Луны на Землю и вероятность попадания на нее. Эти работы 1801—1806 гг. как бы «расчищали путь метеорным телам в межпланетное пространство». Отсюда возникли предпосылки для определения орбит этих тел, так как надо было подчинить их закону тяготения. Это потребовало знания вектора скорости, т. е. направления ее и линейного значения. То и другое требует определения атмосферной траектории. Такие работы были проведены Брандесом и другими в 1817—1823 гг., но не всегда удачно (например, некий Фельденхауэр забыл, что при этом надо наносить пути метеоров на карту). К 1823 г. выяснилось, что новые определения высот и скоростей повторяют прежние значения. Но еще не доставало астрономического понятия направления, даваемого *радиантом*.

§ 18. Открытие радианта. Определение орбит. В ночь 12/13 ноября 1832 г. на обширной территории Азии наблюдался мощный звездный дождь Леонид. В России он был виден от Якутии до Украины, за рубежом — в Аравии, Индийском океане, в Швейцарии, в Англии. Через год поток наблюдался в Западном полушарии, так как в момент максимума в Евразии был день. Метеоров было так много, что просто глазом легко было видеть, как они расходятся от одной «радиирующей» точки или р а д и а н т а. Открытие это было сделано по меньшей мере восемью лицами, но подробное описание и объяснение радианта, как перспективной точки схождения параллельных метеорных путей, не имеющей параллакса, дал Денисон Олмстед, профессор Йэльского колледжа в Нью-Хэвене (Коннектикут, США). Радиант на небесной сфере дает обратное направление вектора скорости метеоров, встречающих Землю.

Стало очевидным, что вне Земли существуют системы дотоле неизвестных метеорных тел. «Это новый планетный мир, который начинает открываться перед нами», заявил Араго в 1836 г., после того как вначале он не придал значения открытию радианта и даже потерял письмо Геррика, сообщавшего ему об этом. Леониды в 1833 г. в Европе не наблюдались, и открытие в США радианта вначале не произвело здесь впечатления. Бахе в 1835 г. даже печатно выступал против идеи эллиптического потока тел. Но «лед недоверия» был сломлен: в 1835 г. Араго открыл радиант Лирид, а Локе и Геррик — Персеид. Последние появлялись ежегодно и вначале допускалось, что их период составляет аликвотную *) часть года, например 0,5 года.

*) Аликвотный — содержащийся целое число раз.

В таком случае поток, казалось, мог наблюдаться в проекции на диск Солнца в другом узле орбиты. В литературе того времени не было недостатка описаний подобных явлений (оказавшихся пылинками в фокусе телескопа или иными земными объектами). Но неправильно понятый факт сыграл положительную роль, укрепив идею эллиптической орбиты потока.

Представители метеорологической теории не сдавались; парижский часовщик Кувье-Гравье, после трудового дня направлявшийся за город и с необычайным рвением следивший за метеорами несколько десятилетий, выпустил две книги (в 1847 и 1859 гг.), послужившие потом, вопреки его воле, подтверждением астрономической теории. Сопоставление периодичности Леонид 1766, 1799 и 1832—1833 гг. позволило Губерту Ньютону, профессору в Нью-Хэвене, п р е д с к а з а т ь их новое появление; в 1866 г. метеорный дождь действительно повторился и аристотелева теория была сдана в архив истории.

Но уже в 1839 г. Богуславский, обработав базисные наблюдения Персеид 10 августа 1838 г. и взяв среднее из их скоростей, нашел очень вытянутую эллиптическую орбиту. В том же году Эрман, складывая по правилам параллелограмма скорости Земли v_t и частицы v_h, для результирующей геоцентрической скорости v_g получил выражение

$$v_g = -v_t \cos\psi \pm \sqrt{v_h^2 - v_t^2 \sin^2\psi},$$

где ψ — угол встречи, но ошибочно удержал только верхний знак и вместо двух решений — с прямым и обратным движением потока, — получил только обратное, что сближало орбиту с кометной *). Хотя уже в 1843 г. Уокер указал на эту ошибку, но так как американские журналы в Европе почти не читались, на складывавшееся мнение о сходстве орбит комет и метеоров это не оказало влияния. Но Эрман сделал важный шаг вперед, допустив, что поток растянут по всей орбите: это снимало требование соизмеримости периодов обращений Земли и роя.

Появление Леонид 1832—1833 гг., помимо того, что дало доказательство внеземного происхождения метеоров, имело и другое принципиальное значение — в вопросе об их связи с кометами. Известный русский ученый-самоучка Ф. А. Семенов (настолько изучивший астрономию, что указывал Араго на его ошибки в предвычислении затмений), наблюдая в Курске 1 (12) ноября 1832 г. Леониды, записал в дневнике: «уж не Биэлова ли комета причиной сего явления?» Это получило на Западе подтверждение через 34 года; дневник Семенова увидел свет только в 1920 г. [92]. В нем можно найти также указание на явление радианта.

*) Данная задача имеет два решения лишь если $\psi > 90°$ и $v_h < v_t$. Для случая $v_h > v_t$ задача имеет одно решение (соответствующее знаку плюс в формуле) как для прямых, так и для обратных движений.

§ 19. Открытие связи метеоров и комет. Богуславский заметил, как сильно неточность в определении скорости влияет на элементы орбиты и потому предложил находить последнюю из периода P возвращения потока, определяя большую полуось орбиты из III закона Кеплера: $a = P^{\frac{2}{3}}$, а скорость — из интеграла площадей:

$$v_h^2 = k^2 M \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right).$$

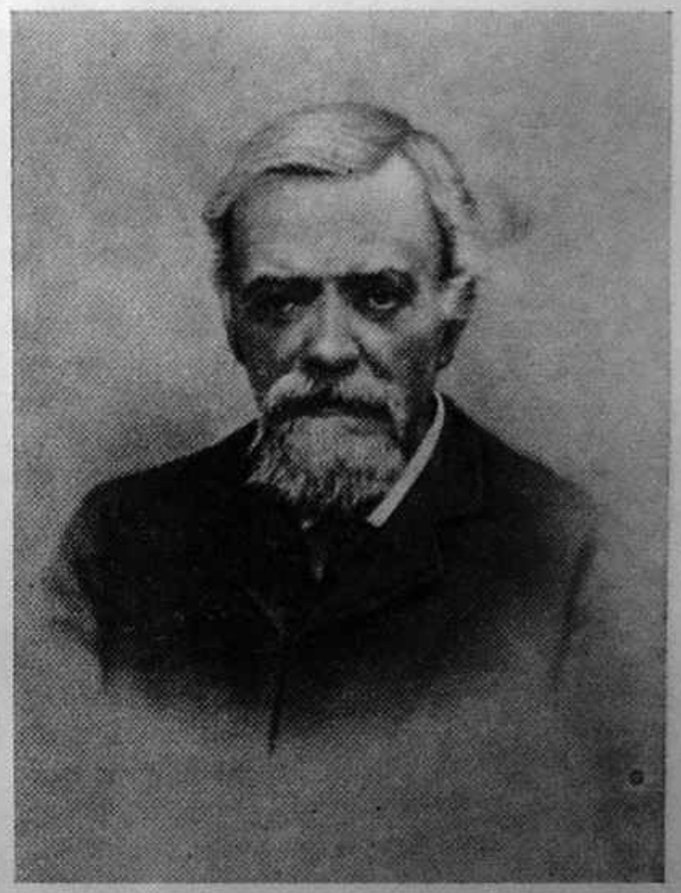
Для Леонид P=33,25 года, а v_h оказалось близким к $v_t \cdot \sqrt{2}$, но прямого доказательства связи с кометами еще не было. Поэтому для нахождения P были собраны и опубликованы старинные наблюдения метеорных дождей Европы и Азии (Шаль, Био, Кетле и др.).

Г. Ньютон из сопоставления дат максимумов Леонид с 25 октября 585 г. по 12 ноября 1833 г. нашел, что смещение их происходит не по тропическому, а по звездному году. Этого одного достаточно для доказательства астрономической теории метеоров, но Ньютон нашел еще, что суточная вариация часовых чисел n_h тем резче, чем меньше соотношение скоростей v_h/v_t; отсюда по наблюдаемой вариационной кривой n_h можно получить «массовую» среднюю скорость v_h. В 1863 г. из наблюдений Кувье-Гравье и Шмидта Ньютон вновь получил $v_h \approx v_t \sqrt{2}$. В мемуаре «О падающих звездах» 1863 г. Ньютон [14] пришел к верному выводу о существовании большого числа случайно расположенных орбит потоков, в целом образующих род диска в плоскости планетных орбит. Возникла опасность, что это противоречит космогонической теории Канта — Лапласа, где случайные направления отсутствуют; вместе с тем передовые ученые не могли отказываться от этой теории, впервые объяснявшей образование солнечной системы без вмешательства божественных сил. Но тогда выступил Леверрье и доказал весьма малую вероятность общего происхождения планет и метеорных тел и расчетом показал захват Леонид Ураном в 126 г. н. э.

В 1862 г. начинавший свою работу Джованни Скиапарелли заметил, что появившаяся тогда комета 1862 III имеет ту же орбиту, что и поток Персеид. Это было важным открытием. В 1866 г. появилась комета 1866 I, элементы которой были присланы Петерсу, как редактору «Astronomische Nachrichten»; одновременно сюда же Скиапарелли прислал вычисленную им в связи с максимумом 12/13 ноября 1866 г. орбиту Леонид. Петерс сразу увидел, что обе орбиты совпадают и поспешил это напечатать, но элементы кометы стали также известны Скиапарелли и Оппольцеру, которые независимо сделали то же сопоставление. Все это произошло на протяжении пяти дней.

Связь комет и метеоров стала доказанной. Но ждать появлений новых комет было утомительно. В 1867 г. австрийский академик Э. Вейсс обратил задачу: по элементам орбиты кометы он вычислял

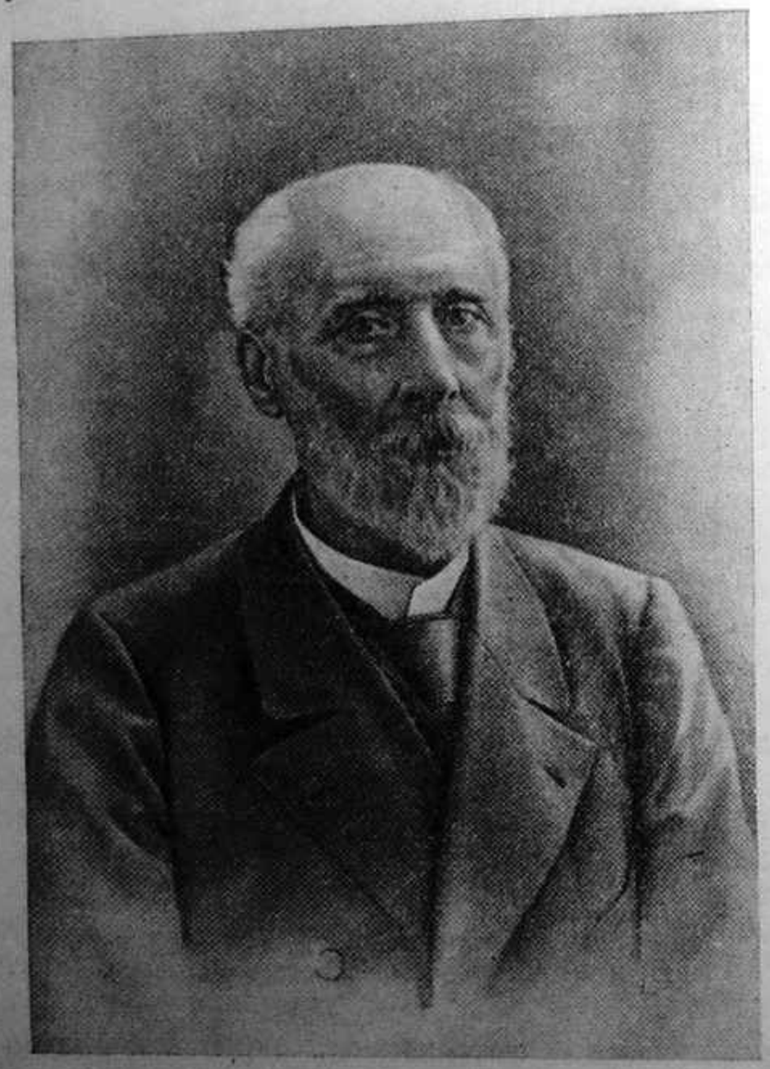
«кометные» радианты и сравнивал их с наблюденными. Он сразу увидел связь Лирид с кометой 1861 I; вычислявший ее орбиту Папе тогда же указал, что она очень близка к земной в *аппульсе* (точке минимального расстояния).



Джованни Скиапарелли (1835—1910)—крупнейший итальянский исследователь метеоров.

Вейсс также указал на связь кометы, открытой капитаном австрийской армии (по национальности чехом) Биэлой, с радиантом в Андромеде. 27 ноября 1872 г. этот радиант дал метеорный дождь, наблюдавшийся от России до США. Уже несколько часов спустя Клинкерфюс вычислил орбиту потока, совпавшую с орбитой кометы, и телеграфировал Погсону в Мадрас: «Биэла коснулась Земли 27 ноября ищите близ Тэты Центавра», т. е. в антирадианте. Там действительно две ночи было видно кометоподобное тело, хотя и не сама комета, но какая-то ее часть. Природа дала буквально «блестящее» доказательство связи комет и метеорных частиц. В курсах теоретической астрономии впервые появились методы вычисления метеорных орбит, прежде всего в курсе самого Клинкерфюса. Но перед исследователями возникли новые проблемы.

§ 20. Дальнейшие исследования. Работы Бредихина. За период 1833—1866 гг. было определено свыше ста радиантов. Например, директор Московской обсерватории Б. Я. Швейцер силами офицеров Межевого корпуса Ларионова, Лесневского, Печковского и Рашкова 8—11 августа 1852 г. провел наблюдения Персеид на обсерватории



Ф. А. Бредихин (1831—1904) — знаменитый русский астроном, исследователь метеоров.

Константиновского межевого института [7,96]. Метеоры заносились на звездные карты, обратное продолжение их путей дало радианты в Персее, Лебеде, Кассиопее и у Лиры. За четыре ночи было отмечено 687 метеоров, в том числе стационарный персеид ярче Венеры, не сместившийся «ни по какому пути», т. е. летевший по лучу зрения и тем самым сразу дающий радиант. В 1871 г. Скиапарелли напечатал список 189 радиантов по 7000 наблюдениям Цециоли 1867—1869 гг. [108]. Гейс в Аахене опубликовал каталог 84 радиантов [100]; к 1899 г. в каталоге Деннинга общее число радиантов

дошло уже до 4367. Но еще в 80-х годах XIX в. стало ясно, что число потоков гораздо больше числа комет. Это также требовало объяснения.

С 1862 г. начал свои классические исследования кометных хвостов Ф. А. Бредихин (Москва). Он нашел, что в зависимости от массы составляющих их частиц эти хвосты можно разделить на три типа,

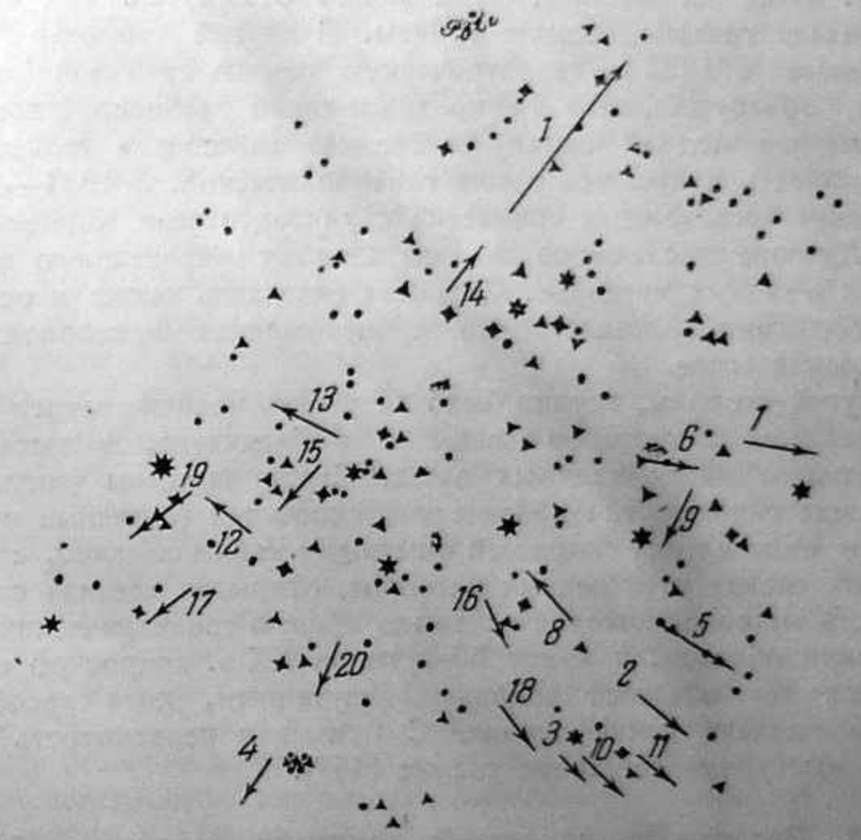


Рис. 18. Метеоры потока Персеид, нанесенные на звездную карту акад. Ф. А. Бредихиным 9 августа 1874 г.

причем состоящие из более крупных пылевых частиц были отнесены к аномальным хвостам. Бредихин показал, что одна комета, выбрасывая много раз рои таких частиц, может породить много разных потоков. Для проверки теории Бредихин проводил наблюдения в 1890—1894 гг. близ Кинешмы, в результате которых он объяснил ряд особенностей строения крупных потоков и исследовал «малые» потоки (рис. 18). Под знаком работ Бредихина [85] прошло развитие метеорной астрономии в последней четверти XIX века.

В 1894 г. вышло прекрасное руководство И. А. Клейбера (Петербург) по определению орбит метеорных потоков [12] с приложением 918 орбит, вычисленных А. Вильевым как параболы, так как скорости их оставались неизвестными.

Особое место заняли болиды: благодаря большой яркости они привлекали внимание наблюдателей из разных пунктов, что позволяло найти их траектории, а масштаб феномена позволял замечать явления, у обычных метеоров незаметные (например, звуки, искры, дробление и т. д.), в частности определять линейную скорость. Ниссль в Брно, Вейсс в Вене, А. Гершель в Англии и Пти во Франции нашли много атмосферных траекторий болидов; Гофмейстер в 1925 г. издал их каталог, куда вошло 611 путей. Три четверти из них давали гиперболические орбиты. С другой стороны Гофмейстер, развивая с 1922 г. геометрическую теорию суточной вариации метеоров, обнаружил, что (в предположении равновероятного распределения направлений частиц) их средняя «массовая» гелиоцентрическая скорость получается также гиперболической. В 1931—1933 г. Гарвардская обсерватория совместно с университетом Корнелля провела в Аризоне экспедицию по визуальному определению высот и скоростей обычных метеоров. Скорости оказались также в основном гиперболическими. Казалось, что происхождение метеорной материи — галактическое.

С другой стороны, трудно было допустить наличие такого огромного количеста метеорного вещества в Галактике, в тысячи раз превышающего массу видимых звезд. Стали известны факты, противоречащие гипотезе гиперболических скоростей (базисные и односторонние определения скоростей опытными наблюдателями, «дефект» метеорных следов у встречных метеоров, открытие влияния скорости на яркость метеора, которое искажало кривую геометрической вариации). Таким образом, к концу 30-х годов XX в. вопрос об орбитах метеорных тел оказался довольно запутанным, хотя преобладала «гиперболическая» точка зрения. С призывом пересмотреть вопрос впервые выступили советские ученые [457].

§ 21. Применение техники к изучению метеоров. 27 ноября 1885 г. во время метеорного дождя Андромедид Вейнек в Праге получил первую фотографию метеора. Затем несколько удачных, хотя и случайных снимков получил Вольф в Гейдельберге и др. В 1894 г. Элькин в Нью-Хэвене начал систематическое фотографирование метеоров с помощью системы веерообразно расположенных камер — метеорного патруля. Для определения скорости он использовал принцип Ценкера — Фитцджеральда (периодическое прикрывание объектива лопастями обтюратора, вращающегося перед объективом). К 1909 г. было получено 117 пар снимков. Астрофизик Ташкентской обсерватории И. И. Сикора успешно фотографировал, начиная 1901 г., метеоры из двух и даже из трех точек, получая их точные траектории. Уже в 1898 г. П. К. Штернберг в Москве применил периодический затвор для определения скоростей, а С. Н. Блажко в 1904 г. построил первый метеорный спектрограф, с помощью которого получил первые спектры метеоров в 1904 и 1907 гг. [84] (до этого

имелся только один случайный спектр в Арекипе, Перу). В. К. Цераский изобрел остроумное приспособление для определения угловых скоростей метеоров.

В 1932 г. Московское отделение Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО) под руководством В. В. Федынского возобновило инструментальные исследования метеоров. Был построен светосильный патруль и 14 августа 1932 г., а затем 12 августа 1934 г. были получены первые снимки метеоров с обтюратором, давшие точные скорости Персеид и Кассиопеид [95], а также спектр метеора, содержащий 47 линий. В 1936—1938 гг. южные экспедиции Московского отделения ВАГО получили около 40 снимков метеоров, в том числе ряд парных, а также несколько спектров. Была выработана методика фотографирования, которая легла затем в основу организации патрульного фотографирования метеоров на Сталинабадской обсерватории. В 1933—1938 гг. в Сталинабаде производилось систематическое исследование метеорных следов с помощью телескопов, а с 1938 г. там же начал работать метеорный патруль из 28 камер (в том числе 7 спектральных).

В связи с возвращением Леонид в 1932—1933 гг. П. М. Миллман на Гарвардской обсерватории предпринял спектрографирование метеоров; оно проводилось и в Аризонской экспедиции 1931—1933 гг. В итоге Миллман дал две классические работы по изучению 23 метеорных спектров, включая московские [500]. По инициативе Миллмана и Ф. Уиппла работа камер службы неба Гарвардской обсерватории была так согласована, чтобы можно было получать снимки метеоров с обтюратором из двух пунктов.

С 1937 по 1949 г. было получено несколько десятков снимков, на основе которых Уиппл в 1939—1943 гг. нашел, что фотографические скорости метеоров не превосходят параболического предела. В 1943 г. Портер переработал визуальные определения скоростей английских наблюдателей и пришел к тому же заключению.

Физическая теория метеоров, развитая Эпиком в 1933—1937 гг. и Хоппе в 1936—1937 гг., объяснила причину «гиперболизации» скоростей в методе суточной вариации, а явление сплюснутости небосвода явилось, как показал И. С. Астапович [83], причиной переоценки видимых, а отсюда и линейных высот и скоростей болидов. Открытие в Ленинграде низких высот телескопических метеоров в 1930 г. (43—45 *км*) объяснило [169], почему в Аризонской экспедиции процент гиперболических скоростей возрастал с ослаблением яркости метеоров. Так, последовательно, хотя и с опозданием, вскрывались систематические ошибки трех независимых методов, приводившие к гиперболическим скоростям. Новое подтверждение справедливости пересмотра прежних данных дало применение методов радиолокации.

§ 22. Радиофизические методы исследований. Во время второй мировой войны мощное развитие получила радиолокация,

оказавшаяся удобным средством для изучения метеорной ионизации, а также для определения высот (1944 г.), радиантов (1947 г.) и скоростей (1946—1954 гг.) метеоров. Она позволила проводить наблюдения в пасмурную погоду и даже днем. В разработке новой методики участвовали Эпплтон, Ловелл, Кайзер, Дэвис, Клегг, Стьюарт, Эллиэтт в Англии, Миллман и Мак-Кинли в Канаде, Маннинг, Виллард и Петерсон в США, П. О. Чечик, К. В. Костылев, Б. Л. Кащеев, Е. И. Фиалко в СССР. Данные радиометодов оказались в согласии с лучшими визуальными определениями скоростей в СССР и в Англии и с фотографическими исследованиями: метеорное вещество в основной массе оказалось принадлежащим солнечной системе.

§ 23. Развитие метеорной физики и геофизики. В середине XIX в. в связи с развитием физики начали выделяться, как самостоятельные дисциплины, геофизика и астрофизика. Повысился интерес и к физическим явлениям в земной атмосфере при вторжении в нее метеорных тел. Гайдингеру принадлежат первые после Хладни обобщения в этом вопросе (1862—1864 гг.). Первую механическую теорию движения метеора в атмосфере дал Скиапарелли в 1867 г. [108]. Тогда же впервые была найдена масса метеорного тела [691, 693]. Основы физической теории метеоров заложили в 1922 г. Линдеман и Добсон в Англии и в 1924 г. Н. М. Штауде и В. П. Ветчинкин в СССР; ныне она развивается трудами Уиппла, Яккиа, Кайзера, Хоппе, Эпика, К. П. Станюковича, Б. Ю. Левина и других. В области метеорной геофизики получили объяснения звуковые явления (Мах, Эсклангон), метеорная ионизация (Эпплтон, Херлофсон, Кайзер, Кук), явления кратерообразования (В. В. Федынский, К. П. Станюкович). Совершенно исключительные падения Тунгусского (1908 г.) и Сихотэ-Алинского (1947 г.) метеоритов дали неоценимый материал к пониманию явлений, далеко выходящих за рамки лабораторных опытов. Начато тщательное изучение условий плавления метеоритов в атмосфере (Е. Л. Кринов), изменения их в почве (Найнинджер), исследование дрейфа и диффузии метеорных следов в стратосфере (Оливье, Боушка, В. В. Федынский, И. С. Астапович); по торможению метеоров получены данные о плотности воздуха на высотах 70—120 *км* (Уиппл, Яккиа), впоследствии подтвержденные ракетными зондажами. Из некогда отсталой области знания, предоставленной часто любителям, учение о метеорах ныне превратилось в обширную специальность. Достаточно сказать, что в симпозиуме по физике метеоров (Джодрелл Бэнк, Англия, 1954 г.) участвовало сто делегатов из десятков стран. Созданы специальные метеорные обсерватории: в Англии при Манчестерском, а в США — при Гарвардском и Стэнфордском университетах, в Оттаве и Торонто (Канада), в Ашхабаде и Сталинабаде (СССР), снабженные специальным фото- и радиооборудованием, где заняты сотни научных работников; кроме того, метеорная материя изучается в ряде университетов, научных институтов, музеев,

станций и лабораторий; в высшей школе читаются специальные курсы метеорной астрономии, по этой проблеме созываются многолюдные научные конференции; в СССР огромными тиражами выпускается научно-популярная литература, читаются тысячи лекций о метеорных явлениях.

§ 24. Современное развитие исследований метеоров. В СССР изучение метеоров со времен Бредихина составляло традицию Московской университетской обсерватории; в 1931 г. с организацией Государственного астрономического института им. Штернберга при МГУ

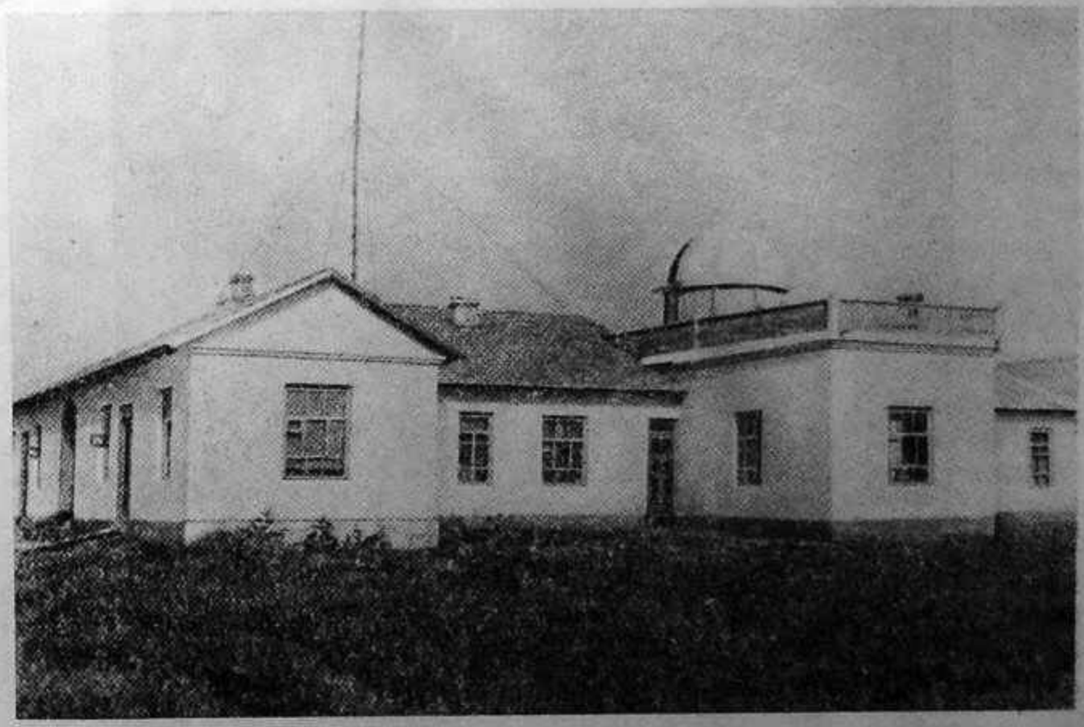


Рис. 19. Сталинабадская астрономическая обсерватория (основана в 1933 г.)

получают развитие теоретические работы по вопросам устойчивости, движения и распределения метеорных тел (Н. Д. Моисеев и др.). В 1935 г. в нем возникает Отдел комет и метеоров, там же в 1935, 1937, 1939 гг. проводятся первые три всесоюзные конференции исследователей метеоров и комет. В 1937 г. на механико-математическом факультете МГУ был начат чтением первый курс метеорной астрономии (И. С. Астапович), в 1939 г. он же подобный курс читал в Саратовском, а с 1953 г. в Ашхабадском университетах.

В Ленинградском университете изучение метеоров велось еще с XIX в. по почину С. П. Глазенапа И. А. Клейбером (1860—1898 гг.), И. С. Абельманом (1867—1899 гг.), С. Г. Натансоном (1890—1944 гг.); в 1930—1940 гг. Н. Н. Сытинская выполнила ряд важных работ по фотометрии метеоров. При помощи ЛГУ была основана в 1933 г.

Сталинабадская обсерватория (рис. 19), проводящая с 1938 г. фотографические наблюдения (Л. А. Катасев), телескопические наблюдения (А. М. Бахарев) и с 1956 г. радионаблюдения метеоров [86].

Первым научным учреждением, где метеоры официально входили в программу исследований, была Ташкентская обсерватория: с 1874 г.

Рис. 20. Ашхабадская астрофизическая лаборатория (основана в 1946 г.).

П. К. Залесским и с 1884 г. И. И. Померанцевым здесь велось определение радиантов, с начала XX в. здесь работал И. И. Сикора, в 1906—1926 гг. проведено тригонометрическое определение 386 визуальных высот, с 1931 по 1934 г. по метеорной геофизике работал В. А. Мальцев.

С 1942 г. изучение метеоров начато в Ашхабаде, где с 1946 г. работает Астрофизическая лаборатория (в системе Академии наук

Туркменской ССР) (рис. 20), которая под руководством И. С. Астаповича ведет фотографические, радиолокационные, телескопические и визуальные исследования. С 1957 г. систематические исследования метеоров ведутся обсерваториями и научными институтами в Харькове, Казани, Томске, Киеве, Одессе. Кроме того, эпизодические исследования метеоров выполняли обсерватории в Тарту, Ереване, Абастумани, Саратове, Львове, Алма-Ате.

Работу любителей астрономии по метеорам в СССР с 1914 г. объединял отдел падающих звезд Русского общества любителей мироведения (РОЛМ, Ленинград) в лице Н. М. Субботиной, Н. М. Штауде, В. А. Мальцева; в Москве с 1921 г. ту же функцию выполнял метеорный отдел Коллектива наблюдателей Московского общества любителей астрономии (МОЛА), с 1926 г. под руководством В. В. Федынского. Обе организации в 1931 г. вошли во Всесоюзное астрономо-геодезическое общество (ВАГО), как его отделения. Уже I съезд РОЛМ в 1922 г. ставил вопрос об экспедиции для наблюдения южных радиантов, фотографирования метеоров, их наблюдений с воздуха, исследования их следов и определения скоростей, на полтора десятилетия предвосхищая идеи Запада. На II съезде РОЛМ в 1928 г. рассматривалась современная проблематика. I съезд ВАГО (Москва, 1934 г.) и I Всесоюзная конференция по изучению стратосферы (Ленинград, 1934 г.) подчеркнули важность метеорных методов исследования верхних слоев атмосферы и высказались за развитие инструментальной методики. Эта методика развивалась в Московском отделении ВАГО в работах 1932—1938 гг. (см. гл. 9), а после Великой Отечественной войны — путем организации систематического фотографирования метеоров экспедициями МОВАГО в Ашхабаде (совместно с Ашхабадской астрофизической лабораторией), в Симферополе, а также в Москве.

С 1949 г. фотографирование метеоров успешно ведется также в Симферопольском отделении ВАГО, где получен, кроме того, ряд спектров метеоров. В 1956 г. там сооружена метеорная станция, имеющая два наблюдательных пункта с базисом 21 *км*. Метеорные наблюдения развиваются и в других отделениях ВАГО.

Учет, сбор и хранение метеоритов в 1921 г. были возложены на Метеоритную экспедицию АН СССР, преобразованную при содействии В. И. Вернадского и А. Е. Ферсмана в Метеоритный отдел Минералогического музея АН СССР (1923 г.) Этот отдел при энергичном участии Л. А. Кулика превратился затем в Комиссию, а потом в Комитет по метеоритам АН СССР (КМЕТ). КМЕТ с 1949 г. ежегодно проводит под руководством В. Г. Фесенкова и Е. Л. Кринова всесоюзные конференции по метеоритике. Комитеты по метеоритам имеются в Свердловске, Омске, Сталинабаде, Ашхабаде, Минске и Киеве.

Коллекции метеоритов имеются в Москве, Ленинграде, Киеве, Одессе, Казани, Свердловске, Харькове, Саратове, Минске, Тарту и других городах СССР.

В Соединенных Штатах Америки исследование метеоров начато со времен Олмстеда и Г. Ньютона. Оно велось на обсерваториях Йельского, затем Гарвардского университетов; по инициативе Шепли был проведен ряд важных мероприятий (Аризонская экспедиция, патрулирование неба). В 1943 г. Ф. Уиппл обобщил результаты фотографических исследований на Гарвардской обсерватории. После второй мировой войны эта обсерватория совместно с военным министерством США и Массачузетским технологическим институтом организовала южную наблюдательную базу в Уайт-Сэндс (Нью-Мексико). Были изготовлены (1949—1952 гг.) сверхсветосильные камеры «Супершмидт» Бэкера, позволяющие получать фотографии метеоров до +3 вел., две из них установлены в Кэмбридже (Массачузетс), две — в Уайт-Сэндс и две — в Канаде. Проведена многолетняя серия (1951—1956 гг.) важных работ по физической теории метеоров (Уиппл, Яккиа, Кук и др.) и по физике стратосферы (Уиппл). Радиоисследования метеоров с 1950 г. проводит Стэнфордский университет на специальной метеорной радиообсерватории. Американское метеорное общество, основанное в 1911 г. Ч. Оливье, объединило работы любителей; отчеты его опубликованы в 1911—1929 гг. (обсерватории Флауер и Мак-Кормик, Пенсильвания). В 1930 г. Уайли (Айова) для сбора наблюдений над болидами организовал Метеорную ассоциацию Среднего Запада, Найнинджер в 1932 г. — Общество по изучению метеоритов, после войны преобразованное в Американское метеоритное общество. Ла Паз тогда же при университете в Альбукерке (Нью-Мексико) создал Институт метеоритики, а Найнинджер в 1946 г. близ Аризонского метеоритного кратера—метеоритный музей.

В Канаде радиолокационные исследования успешно проводят в Торонто П. Миллман и Д. Мак-Кинли (1947 г.). Работу любителей координирует Королевское астрономическое общество Канады под руководством П. Миллмана.

В Англии наиболее успешно развиваются радиоисследования метеоров, начатые по инициативе Эпплтона еще в 1943—1944 гг. Их проводит Манчестерский университет на специальной экспериментальной станции в Джодрелл Бэнк под руководством Ловелла. Здесь определяются скорости и радианты, исследуется метеорная ионизация и т. д. [94]. Традиционные определения высот, скоростей и радиантов визуальным методом проводит Метеорная секция Британской астрономической ассоциации; начатые А. Гершелем и Бакгаузом, продолженные Деннингом и Кингом, они ведутся Прентисом под руководством Портера. После войны теоретические исследования и испытание фотографических методов начато Э. Эпиком в Дублине (Ирландия), на обсерватории Арма.

Весьма активны чехословацкие астрономы: после И. И. Сикоры, Ф. Нушля и И. Свободы (погибшего в фашистском застенке в 1942 г.) Ф. Линк организовал в 1952 г. базисное фотографирование метеоров специальными патрулями с обтюратором. Под руководством В. Гута

много лет ведется улучшение методики обработки визуальных и фотографических наблюдений, исследование траекторий метеоров, Кресаком и Возаровой — наблюдения телеметеоров. Гут возглавляет обсерваторию Скальнате Плесо (Ломницкий Щит, Высокие Татры), где было проведено много интересных работ (рис. 21). С 1952 г. он являлся председателем Комиссии № 22 по метеорам Международного астрономического союза (МАС), координирующей работу по метеорам в международном масштабе. В 1958 г. председателем Комиссии № 22

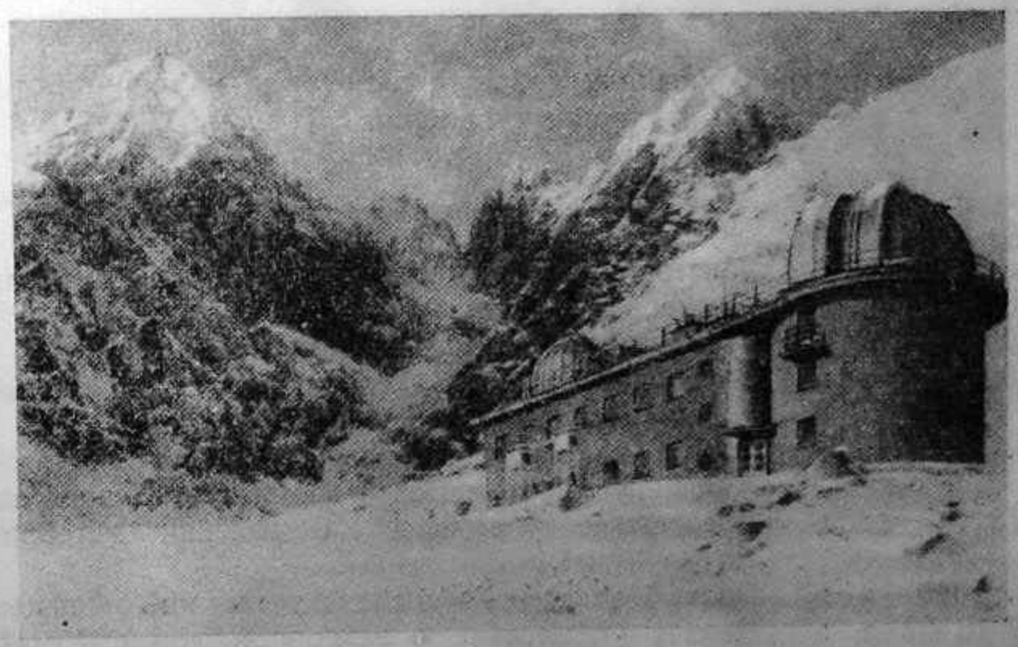


Рис. 21. Чехословацкая обсерватория Скальнате Плесо в Карпатах, где ведутся исследования метеоров.

избран В. В. Федынский (Москва). Ряд интересных работ дали М. Плавец, А. Бечварж, И. Боушка, В. Бумба, З. Цеплеха.

В Японии более 20 лет существует Восточное астрономическое общество в Киото, организованное И. Ямамото; его метеорным отделом руководит Козиро Комаки, найдены сотни радиантов, проводится фотографирование метеоров с патрулем. В Бельгии активно работает метеорное бюро Астрономического общества в Антверпене (де Ягер), в Дании — обсерватория им. Олафа Рёмера в г. Аарусе, где А. Нильсен занимается изучением болидов. В Швеции имеется метеорный отдел Астрономического общества и обсерватория в Лунде (Б. Линдблад), в Австрии — Астрономическое бюро в Вене. В Германии работы по метеорам возглавляет старейший в Европе исследователь метеоров К. Гофмейстер, который основную часть работ провел на организованной им обсерватории в Зоннеберге (Тюрингия, ГДР). Он провел также ряд экспедиций в низкие широты и в 1937—1938 гг. в Виндхук (Юго-Западная Африка). В Новой Зеландии более четверти

века работает метеорный отдел Новозеландского астрономического общества в Окленде (Р. А. Мак-Интош и др.), в Индии — Мохаммед-Хан в Османском университете (Бегумпет). Имеется метеорная группа в Южно-Африканском астрономическом обществе (Капштадт). В последние годы радионаблюдения метеоров начаты в Австралии Уэллсом.

Из этого краткого исторического очерка видно, как возникла, развилась и окрепла наука о метеорной материи и связанных с нею явлениях, первые научные основы которой были заложены в нашей стране.

Хронология важнейших событий в истории изучения метеорных явлений

Годы	Исторические факты
Ок. 50 000—30 000 до н. э.	Доисторический человек каменного века кладет метеорит в усыпальницу.
3 400 » »	Бусы из метеоритного железа в Египте.
3 000 » »	Метеориты кладутся в гробницы умершим царям, как пропуск на небо.
Ок. 2 000 » »	Первая сохранившаяся запись о падении звезд (папирус Голенищева в Эрмитаже, Ленинград).
1478 (?) » »	Древнейшее упоминание о падении метеорита (о-в Крит).
Ок. 1000 » »	Полет болида над Грецией порождает миф о Фаэтоне.
687 III 23 » »	Первое упоминание о метеорном дожде (Китай).
467 » »	Падение метеорита во Фракии у Эгос-Потамос (близ Галлиполи).
V век » »	Догадки философов ионийской школы о космической природе метеоров.
IV век » »	Аристотель создает метеорологическую теорию метеоров.
91 » »	Древнейшее упоминание о болиде (Китай).
530 н. э.	Впервые в Европе описан полет болида (хроника монастыря Сен-Дени, Франция).
532 VIII 28	Звездный дождь в Европе (согласно Лаврентьевской летописи).
Ок. 620	Метеорит «Черный Камень» в Каабе (Мекка) объявлен Магометом святыней мусульман.
935 X	Арабский астроном Табит в Багдаде наблюдает дождь Леонид.
960	Начало систематических наблюдений метеоров в Китае согласно императорскому указу.
1091	Описан полет звукового болида на Киевской Руси.
1110 II 11	Первое на Руси описание следа болида.

Годы	Исторические факты
1202	Тверская летопись упоминает о метеорном дожде Леонид и вызванном им свечении неба.
1290 VI 25	Грандиозный дождь каменных метеоритов у Устюга Великого.
1491	Полет дневного болида во Владимире.
1492 XI 7	В Эльзасе упал метеорит, сохранившийся до нашего времени.
1624	Вильгельм Шикард, друг Кеплера, выпускает книгу о болиде 7 XI 1623 г. с определением его траектории.
1656 VIII 2	В Тобольске описан полет дневного болида.
1662 XI 29	Падение метеоритов у Кириллово-Белозерского монастыря.
1676	Монтанари в Италии определяет траекторию болида 31 марта 1676 г. и выпускает о нем монографию.
1704 VII 20	Шереметев под Нарвой наблюдает полет болида, пролетевшего 1000 *км* от Украины до Швеции.
1734 I 15	Андрей Татищев в Екатеринбурге (Урал) производит первые научные наблюдения метеоров.
1741 XII 7	Русский академик Крафт наблюдает максимум потока Андромедид в Петербурге.
1749	Кузнец Медведев близ Абаканска перевозит железокаменный метеорит с вершины горы; академик Паллас отправляет его в Петербург.
1783 VIII 23	Над Европой пролетает сверхболид («земная комета»), возбудивший интерес к метеорам.
1790	«Только люди, совсем невежественные в естествознании, могут верить, что камни падают с неба» (Штютц, директор музея в Вене).
1790	Парижская Академия наук заявляет о «невозможности» падения метеоритов.
1794	Член-корреспондент Российской Академии наук Хладни издает книгу о метеоритах, закладывая основы метеоритики, метеорной физики и метеорной геофизики.
1795	Шретер (Германия) описывает первый телескопический метеор.
1798	Брандес и Бенценберг в Геттингене определяют впервые высоту метеоров.
1799 XI 12	Гумбольдт и Бонплан наблюдают в Южной Америке метеорный дождь Леонид.
1803 IV 26	Падение дождя метеоритов в Нормандии у Л'Эгля окончательно доказывает справедливость идей Хладни.

Годы	Исторические факты
1819	В Вене выходит книга Хладни «О болидах».
1825	Брандес открывает суточную вариацию метеоров и объясняет ее.
1832 XI 13	Семенов в Курске наблюдает метеорный дождь Леонид и высказывает идею о связи метеоров с кометами.
1833 XI 13	Олмстед открывает явление радианта метеорного потока Леонид.
1834	Джон Локе открывает радиант Персеид.
1839	Перевощиков публикует в «Отечественных записках» обзор по метеорной астрономии.
1840	Богуславский вычисляет первую орбиту (Персеиды).
1863	Г. Ньютон публикует мемуар «О падающих звездах».
1862—1866	Скиапарелли и Ньютон доказывают связь комет и метеоров.
1866 XI 13	Звездный дождь Леонид окончательно опровергает метеорологическую теорию метеоров Аристотеля.
1872 XI 27	Метеорный дождь Андромедид, связанный с распадом кометы 1852 II Биэлы.
1873	Норденшельд открывает метеорную пыль на снегах Арктики.
1881	Шафарик в Праге дает первую классификацию телеметеоров.
1882	Клейбер получает золотую медаль Петербургского университета за книгу «Астрономическая теория падающих звезд».
1885 XI 27	Вейнек в Праге получает первую фотографию метеора.
1889	Геолог А. П. Павлов читает первую в России публичную лекцию о метеоритах в Московском политехническом музее.
1891	Клейбер печатает книгу «Определение орбит метеорных потоков».
1892	Работа Бредихина «О выделении метеоров из комет».
1893	Открытие Барринджером первого метеоритного кратера (в Аризоне).
1894	Белопольский в Пулкове доказывает строение колец Сатурна из метеорной материи.
1894	Элькин начинает систематическое базисное фотографирование метеоров с применением обтюратора для определения их скоростей.
1899	Тихов наблюдает Леониды с воздушного шара.
1899	Венская Академия наук направляет в Индию экспедицию для наблюдения Леонид.

Годы	Исторические факты
1900	Шарбе и Покровский в Юрьеве определяют первые в России высоты метеоров из базисных наблюдений.
1901	Сикора в Ташкенте начинает работы по фотографическому изучению метеоров.
1904	Начало первых спектрографических наблюдений метеоров (Блажко на Московской обсерватории).
1905	Первое исследование акустического поля метеорита Телеутское Озеро Мамонтовым.
1907	Исследования траекторий метеоритов Леоновка и Томаковка (Украина) Блажко и Тиховым.
1907	Траубридж в Торонто (Канада) выясняет природу газовых и пылевых следов.
1908 VI 30	Падение Тунгусского метеорита.
1914	Свобода в Праге доказывает связь Орионид с кометой Галлея.
1916	Деннинг и Оливье находят связь Боотид с кометой Понса — Виннеке.
1919	Покровский и Шайн в Перми издают полный каталог кометных радиантов.
1922	Физическая теория метеоров Линдемана и Добсона.
1925	Работа Эсклангона (Париж) по акустике болидов.
1925	Открытие в Николаеве электрофонных явлений при полете метеоров.
1927	Открытие первого в Европе метеоритного кратера Каалиярв (Эстония).
1930	Московский радиоинженер Н. А. Иванов открывает роль метеорной ионизации в радиослышимости.
1930	Открытие в Ленинграде низких высот телескопических метеоров.
1931—1933	Аризонская метеорная экспедиция.
1933 X 9	Метеорный дождь кометы Джакобини — Циннера (Дракониды).
1935	Первая конференция по кометам и метеорам (Москва).
1940	Уиппл устанавливает фотографически связь Таурид с кометой Энке.
1944—1947	Начало применения радиометодов к изучению метеоров в СССР, США и Англии.
1944	Открытие собственного радиоизлучения метеоров (Ашхабад).
1946	Метеорный дождь Драконид.
1947 II 12	Падение Сихотэ-Алинского метеорита.
1949	Первая Всесоюзная метеоритная конференция в Москве.

Годы	Исторические факты
1949	Первая базисная фотография газового метеорного следа (Ашхабад).
1951	Теория «микрометеоритов» Уиппла.
1952	Нахождение космического никеля в океанических отложениях.
1954 X	Первые цветные фотографии метеоров и их спектров (Ашхабад).
1954	Гринхоу и Дэвис в Англии радиометодом определяют дрейф метеорных следов, скорости и радианты метеоров.
1957—1958	Регистрация метеорной активности с помощью аппаратуры на ракетах и искусственных спутниках Земли (СССР, США).
1957—1958	Систематические наблюдения метеоров в мировом масштабе по программе МГГ.

ГЛАВА 3

АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ КАК СРЕДА МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

§ 25. Введение. Встречаясь с Землей, метеорные тела вторгаются в земную атмосферу и воздействуют на нее. Атмосфера в свою очередь воздействует на метеорные тела, обычно разрушая их. Этот процесс взаимодействия мы условились называть м е т е о р о м. Он возможен также в атмосферах Марса, Венеры и других планет, а также спутников планет, имеющих атмосферу (например, Титана).

Мы не знаем, какие формы приняла бы метеорная астрономия на планете, лишенной атмосферы. Здесь необходимо напомнить основные факты о строении земной атмосферы, являющейся средой метеорных явлений (рис. 22).

§ 26. Пределы атмосферы. Если бы земная атмосфера простиралась до Луны, имея постоянную плотность ρ, то значение ρ было бы около 10^{-22} $г \cdot см^{-3}$, чему соответствует несколько тысяч атомов на литр объема. Но это значение ρ имеет место на высоте $H = 2$—3 тыс. $км$ над поверхностью Земли, которую мы примем за физический предел атмосферы, так как 10^{-22} $г \cdot см^{-3}$ близко к средней плотности межпланетного вещества на расстоянии Земли. Каждая частица воздуха здесь является спутником Земли и движется вокруг нее по законам Кеплера между двумя соударениями с другими частицами, происходящими раз в несколько минут или дней (в зависимости от высоты).

В о з д е й с т в и е к о р п у с к у л. Внешний слой земной атмосферы постоянно подвергается воздействию космических причин — солнечного нагрева и корпускулярных потоков Солнца, привносящих электростатический заряд. Вместе с полярными сияниями, вызываемыми корпускулярными потоками, самые верхние слои атмосферы могут приподниматься, например с 900 до 1300 $км$. Полагают, что высокие формы полярного сияния — лучи и дуги — вызваны электронами, а формы «занавеси» — протонами, проникающими до высот $H = 100$ $км$ (рис. 23). Не раз замечали, что в том месте, где полярное сияние было особенно ярким, возникало слабо светящееся облачко (остаток «драпри»), видимое несколько минут и дрейфующее под влиянием воздушных течений, подобно газовым следам метеоров. Очень

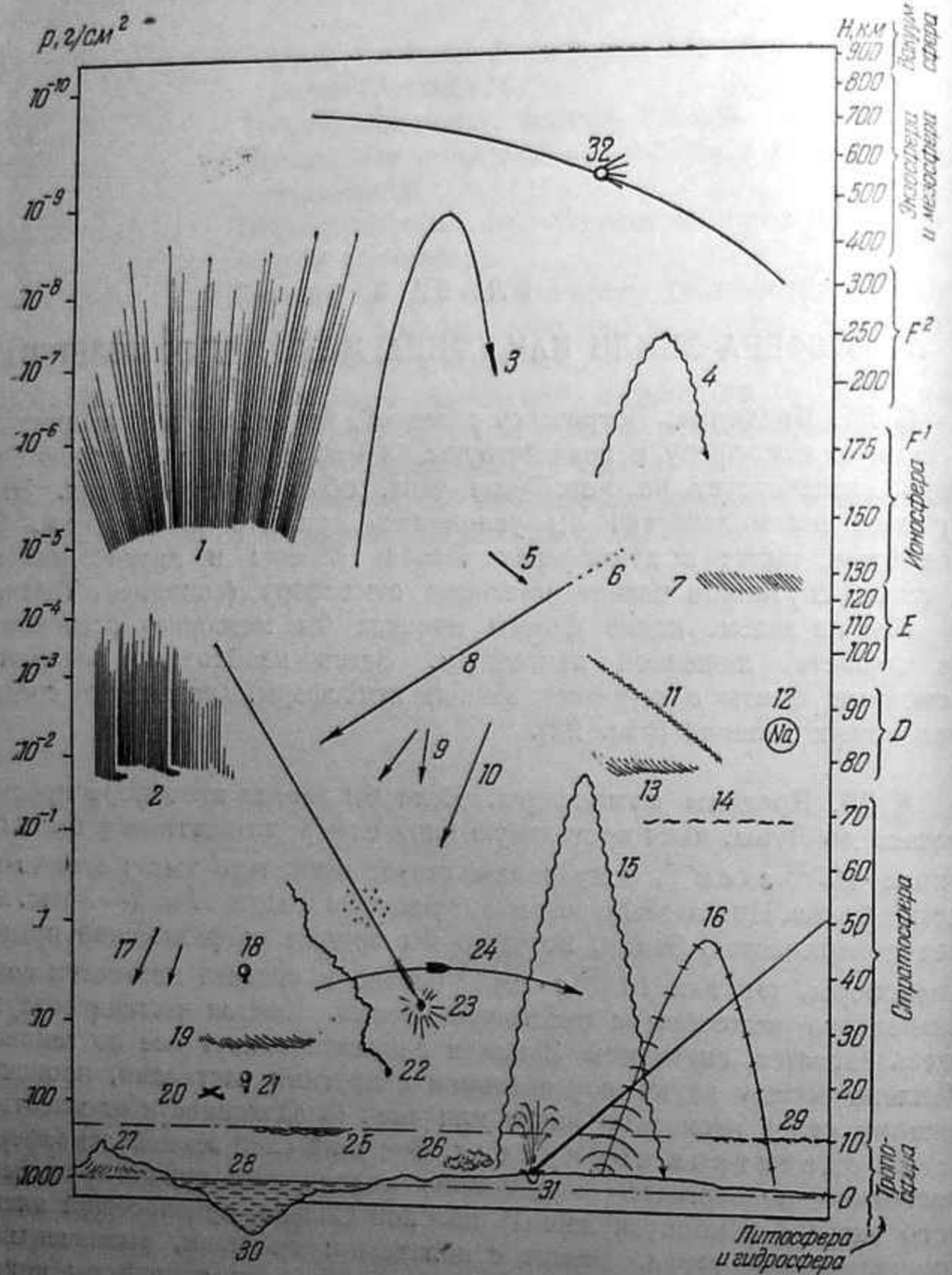


Рис. 22. Схема строения атмосферы.

1—2 — полярные сияния (дуги и драпри), *3* — стратосферные ракеты, *4* — отражение коротких радиоволн, *5* — быстрые слабые метеоры, *6* — голубые следы метеоров, *7* — светлые полосы, *8* — быстрые метеоры, *9* — телескопические метеоры, *10* — медленные метеоры, *11* — газовые следы, *12* — метеорный натрий, *13* — серебристые облака, *14* — граница второй сумеречной дуги, *15* — отражение средних радиоволн, *16* — отражение звуковых волн, *17* — медленные телеметеоры, *18* — шары-зонды, *19* — перламутровые облака, *20* — стратосферные самолеты, *21* — стратостаты, *22* — пылевые следы, *23* — болиды, *24* — снаряды дальнобойной артиллерии, *25* — перистые облака, *26* — облака нижнего яруса, *27* — Эверест, *28* — уровень моря, *29* — граница первой сумеречной дуги, *30* — наибольшая глубина океана, *31* — кратерообразующие метеориты, *32* — искусственные спутники Земли.

мощные полярные сияния создают в верхних слоях атмосферы токи, эквивалентные миллионам ампер. В силу индукции они нарушают состояние земного магнитного поля. Последнее изменяется и от иных причин, например, от приливов или от перемещений воздуха, нагреваемого днем Солнцем. В некоторых случаях появление яркого луча полярного сияния заметным образом отклоняет магнитную стрелку. Изредка во время быстрых изменений форм сияний слышатся слабые

Рис. 23. Параллельные лучи полярного сияния вследствие перспективы кажутся сходящимися.

шипящие или свистящие звуки; теперь они записаны на пленку и, по-видимому, исходят от окружающих предметов, возможно, за счет стекания индуцированного электричества. Имеются фотографии свечения приземного воздуха во время интенсивных полярных сияний. Правда, воздействие корпускулярного излучения на земную атмосферу оказывается незначительным по сравнению с ультрафиолетовым излучением, зато корпускулы могут попадать на ночную сторону Земли.

§ 27. Термодинамический парадокс. В условиях высокой разреженности атмосферы приходится учитывать различие понятий температуры, относящихся к одному и тому же объему воздуха. Например, скоростям v движения частиц воздуха — спутников Земли, составляющим несколько *км/сек*, соответствует газокинетическая температура T, определяемая из выражения

$$v = \sqrt{\frac{3}{2} KT},$$

где K — постоянная Больцмана. На высоте $H = 1000$ *км* T может достигать 2500° К, тогда как помещенный сюда градусник из-за редкости попадания на его шарик ударов этих частиц показал бы очень низкую температуру (например, при зачерненном шарике «на солнце» около 290° К, а в тени T, определяемое лишь излучением звезд, оказалось бы близким к 4° К). Этот *термодинамический парадокс* имеет место в вакуумных трубках, газовых туманностях, солнечной короне и, как увидим далее, в метеорных явлениях.

§ 28. Экзосфера. Свободное кеплерово движение частиц воздуха имеет место лишь выше 800 *км*. Эта область динамического слоя атмосферы носит название *экзосферы* («внешняя атмосфера»). Масса воздуха экзосферы составляет 10^{-10} всей атмосферы, хотя только в пределах высот 830—1660 *км* ее объем равен 55% объема земного шара. Молекулы воздуха здесь диссоциированы на атомы и поэтому средний атомарный вес воздуха в экзосфере около 14. Если учитывать диффузионное равновесие с нижележащими слоями, то газокинетическая температура здесь около 2500° К. Нижняя граница экзосферы соответствует так называемому *критическому уровню*, который определяется условием, что из него диссипирует, не испытывая столкновений, $1/e$ доля атомов, скорость которых превышает параболическую. Еще до недавнего времени ни один предмет, сделанный руками человека, не проникал в экзосферу. Ныне в ней летают высотные ракеты и искусственные спутники Земли (ИСЗ). Движение метеорных тел в ее пределах проходит незаметно для земных наблюдателей, так как даже на $H = 500$ *км* плотность $\rho < 10^{-13}$ *г · см*$^{-3}$. Если водородный атом со скоростью 50 *км/сек* проникнет извне в экзосферу, то при своей энергии, соответствующей 10 электрон-вольтам, он затормозится на высоте 600 *км*, где в 1 *см*^{3} воздуха содержится 10^6 атомов.

§ 29. Ионосфера. В экзосфере атомы пребывают недолго, Солнце не успевает их ионизовать и даже на высоте 300 *км* фотоионизация атома может произойти лишь раз за несколько лет. Поэтому ионизованными могут быть здесь межпланетные атомы, а атмосферные атомы, ионизованные ультрафиолетовым излучением Солнца, должны лежать ниже. Действительно, на высотах 80—350 *км* располагаются четырьмя нарастающими максимумами ионизации слои атмосферы, содержащие ионы и электроны. На высотах примерно 80, 100, 220 и 320 *км* концентрация их составляет 10^3—10^5, $2 \cdot 10^5$, $4 \cdot 10^5$ и 10^6 *см*$^{-3}$; соответственно эти слои обозначены D, E, F_1 и F_2 и вместе они называются *ионосферой*. Пределы этих слоев колеблются в зависимости от времени года и суток, широты и гелиоактивности.

Ионосфера содержит только 0,3% массы всей атмосферы, но имеет громадное значение для геофизики (геомагнитные вариации),

техники (радиосвязь), биологии (поглощение ультрафиолетового излучения, защита от метеоров) и др.

Метеорные явления происходят частично в слое E и в основном в слое D. Их область часто называют «метеорной зоной» (*M*-зона). В верхней части слоя F_2, возможно, присутствует атомарный азот, ниже он находится в молекулярном состоянии. На $H = 100$ *км* и выше полностью диссоциирован кислород, днем диссоциация начинается уже с высот $H = 80$ *км*. Ночью эти области лежат на 20 *км* выше, слои F_1 и F_2 объединяются в один слой F, электронная концентрация на высоте 120 *км* падает до $N = 10^4$ *см*$^{-3}$ (днем здесь она увеличивается в 15 раз). До высот 200 *км* атмосфера на 99% состоит из кислорода и азота в соотношении, близком к тому, какое имеется на уровне моря. Так как эти газы различаются по весу, то они должны были бы расслоиться, чего не наблюдается, так как отсутствие покоя в ионосфере (дрейф, турбуленция и конвекция) ведет к перемешиванию воздушных масс. Уровень диффузии, выше которого существовало бы диффузионное равновесие, лежал бы выше слоя E, например, выше $H = 150$ *км*. Таким образом, в области метеорных явлений состав воздуха неизменный.

Солнечная корона, хромосфера и фотосфера испускают мягкое рентгеновское и ультрафиолетовое излучение с длинами волн $\lambda = 2 — 6$, < 91 и > 91 *мμ* соответственно. Проникая в атмосферу, излучение с $\lambda < 85$ *мμ* ионизует кислород и азот и создает слой F_1. Радиация с $\lambda < 91$ *мμ* ионизует только кислород и создает слой F_2; глубже проходят рентгеновские лучи и ультрафиолетовые лучи с $\lambda = 91 — 100$ *мμ*, поглощение которых образует слой E. Наконец, слой D возникает от поглощения излучения с $\lambda < 102$ *мμ*, ионизующего O_2, который ниже диссоциируется излучением с $\lambda < 240$ *мμ*. При этом атомы и молекулы кислорода соединяются и образуют озон O_3 с максимумом поглощения $\lambda = 255$ *мμ*. Поглощенная им энергия приводит к повышению температуры воздуха и возникновению слоя температурной инверсии — теплой прослойки на $H = 50 — 60$ *км* (*мезосфера*). Благодаря ей земные звуковые волны отражаются обратно вниз, давая зоны вторичной слышимости (рис. 24). Озон, так же как и водяной пар и углекислота, поглощает тепловое излучение, идущее снизу от Земли, и тем препятствует быстрому охлаждению почвы. Пройти через эти «атмосферные фильтры» до поверхности Земли может только излучение с $\lambda > 290$ *мμ*.

При извержениях газов на Солнце резко усиливается ультрафиолетовое излучение, сильнее всего действующее на слой D и *M*-зону, где происходят метеорные процессы (область $H = 80 — 120$ *км*).

Однако метеорные явления бывают и выше, и ниже *M*-зоны. Когда радиоволны земных станций достигают ионосферы, то на их распространение наибольшее влияние оказывают легкие электроны, а не в тысячи раз более тяжелые ионы. Энергия радиоволн заставляет колебаться электроны и в слое E, поэтому она сильно погло-

щается. По этой причине короткие радиоволны отражает в основном слой F_1. Наибольшая частота, при которой имеет место отражение, называется *критической*. Квадрат ее пропорционален электронной плотности. При вертикальном падении от слоев E и F_1 будут отражаться волны длиной $\lambda > 75 — 100$ и $\lambda > 30 — 60$ *м* соответственно.

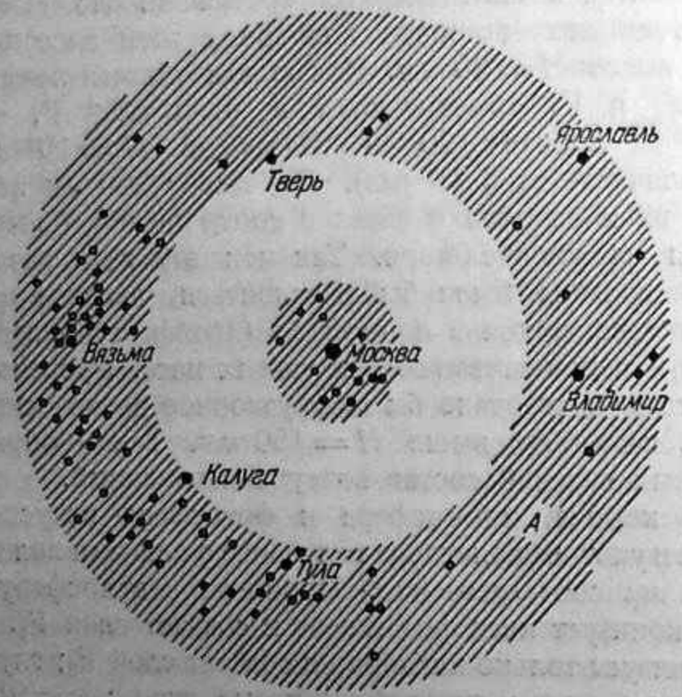


Рис. 24. Зона аномальной слышимости звуков московских взрывов 8 мая 1920 г. (*A*), вызванная отражением звука от зоны инверсии в верхней атмосфере (по В. И. Виткевичу).

Волна с $\lambda = 1885$ *м* приведет электрон в колебание с амплитудой 18 *мм* и скоростью 17,7 *км/сек*. Чем более короткой будет длина радиоволны λ, тем легче она будет пронизывать ионосферу, приближаясь в этом отношении к световой волне.

§ 30. Свечение ночного неба. Рекомбинации ионов и переходы атомов из возбужденных состояний приводят к излучению энергии, на оптическом диапазоне спектра, наблюдаемом как слабое свечение ночного неба (на высотах 120—200 *км*). Оно позволяет, например, различать стрелки часов в темную ясную ночь. В основном это излучение атомарного кислорода (зеленая линия $\lambda = 5577$ и две красные 6300 и 6363 Å), молекулярного азота (полосчатые спектры) и даже аргона и газов кометных ядер. В этом свечении преобладают процессы минимальных энергий. Известно более 200 линий в спектре свечения ночного неба. К полуночи, в марте и сентябре и в годы максимумов гелиоактивности интенсивность этого свечения увеличивается на десятки процентов. Кроме того, оно неравномерно, как бы клочковато, и вдобавок как-то связано с состоянием слоя F. После мощных хромосферных вспышек на Солнце в спектре ночного неба возникают линии космического водорода и гелия. Из-за свечения неба пропадает видимость слабых звезд и метеоров: не будь его, можно было бы глазом видеть звезды не до 6-й звездной величины, а гораздо слабее. Кроме того, свечение неба растет от экватора к полюсам и тем ухудшает условия астрономических наблюдений вне тропических широт, притом непостоянным и прихотливым образом, что особенно важно учитывать при наблюдениях метеоров (см. гл. 4).

§ 31. Стратосфера. Переход от ионосферы к нижележащей стратосфере (от stratus — слоистый) при $H = 83$ *км* весьма резкий: ход плотности воздуха претерпевает здесь некоторый излом, температура испытывает минимум (160—200° K), прекращается диссоциация кислорода, свечение полярных сияний, метеорных следов, начинается заметное отражение солнечного света (погружению этой границы под горизонт соответствует начало астрономических сумерек). На этой границе появляются серебристые облака, волнистая структура которых показывает на наличие волн Гельмгольца, возникающих на поверхности раздела двух сред различных свойств. Остальные явления изображены на рис. 22.

В пределы стратосферы проникают медленные метеоры (до высот $H = 60—70$ *км*), далее крупные болиды (до $H = 30—40$ *км*), телескопические метеоры ($H = 70—80$ и около 40 *км*); на высотах 20—25 *км* теряют свою космическую скорость многие метеориты, падающие затем на Землю. Суточные колебания температуры в стратосфере имеют меньший размах, чем на бо́льших высотах. Поэтому конвекция здесь мало заметна, преобладают горизонтальные движения воздушных масс (что важно при изучении дрейфа пылевых метеорных следов), обычные облака практически отсутствуют.

Метод исследования стратосферы радиозондами был применен впервые П. А. Молчановым в 1930 г., сумеречный метод был обоснован В. Г. Фесенковым и разработан затем Н. М. Штауде, И. А. Хвостиковым и другими. Широкую известность приобрели подъемы советских стратостатов с экипажем (до 22 *км*), а впоследствии — автоматических стратостатов (до 35 *км*), позволившие сделать важный вывод о неизменности состава воздуха с высотой.

В последнее время важные фактические данные были получены ракетным зондированием [113, 115, 120, 124], а также с помощью ИСЗ [120], т. е. прямым методом исследования. Многочисленные косвенные методы, основанные на изучении естественных или искусственно создаваемых явлений в стратосфере или на изучении следствий из этих явлений, позволяют получить почти полное представление о земной атмосфере до высот 200 *км* и более.

§ 32. Тропосфера. Самый нижний слой атмосферы, в котором особенно развита конвекция, называется, как известно, *тропосферой* (греч. τροπή — поворот, отсюда «тропик»). Переходный слой в 1—2 *км* толщины называется *тропопаузой*. Лишь самые крупные метеорные тела, вроде, например, Тунгусского метеорита, в состоянии проникать в тропосферу с космической скоростью. В тропосфере же заканчивается падение метеоритов, а также осаждение метеорной и космической пыли, достигающих поверхности Земли. Высота тропосферы изменяется с широтой от 6—7 *км* на полюсах до 18 *км* над экватором. Собственно метеорологические явления (облачность, осадки и т. п.) имеют место лишь в пределах тропосферы.

Таблица 1

Атмосферные данные, согласно ракетным иследованиям [118]

Высоты H, *км*	Температура °K	Давление *мм*	Плотность $г/см^3$	Концентрация частиц в 1 $см^3$		
				N_2	O_2	O
0	297	760	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{19}$	$5{,}0 \cdot 10^{18}$	—
10	231	210	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$	$7{,}2 \cdot 10^{18}$	$1{,}8 \cdot 10^{18}$	—
20	213	42,8	$9{,}3 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{18}$	$3{,}7 \cdot 10^{17}$	—
30	232	9,4	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$	$3{,}3 \cdot 10^{17}$	$8{,}3 \cdot 10^{16}$	—
40	262	2,4	$4{,}2 \cdot 10^{-6}$	$6{,}7 \cdot 10^{16}$	$1{,}7 \cdot 10^{16}$	—
50	271	$6{,}8 \cdot 10^{-1}$	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}8 \cdot 10^{16}$	$4{,}6 \cdot 10^{15}$	—
60	253	$1{,}9 \cdot 10^{-1}$	$3{,}5 \cdot 10^{-7}$	$4{,}3 \cdot 10^{15}$	$1{,}1 \cdot 10^{15}$	—
70	218	$4{,}6 \cdot 10^{-2}$	$9{,}7 \cdot 10^{-8}$	$1{,}9 \cdot 10^{15}$	$4{,}7 \cdot 10^{14}$	—
80	205	$9{,}4 \cdot 10^{-3}$	$2{,}1 \cdot 10^{-9}$	$1{,}5 \cdot 10^{15}$	$3{,}8 \cdot 10^{14}$	—
90	206	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$	$4{,}1 \cdot 10^{-9}$	$2{,}0 \cdot 10^{14}$	$4{,}8 \cdot 10^{13}$	$2{,}7 \cdot 10^{6}$
100	217	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$	$8{,}6 \cdot 10^{-10}$	$2{,}8 \cdot 10^{13}$	$7{,}6 \cdot 10^{12}$	$1{,}1 \cdot 10^{12}$
110	233	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{-10}$	$8{,}6 \cdot 10^{12}$	$8{,}2 \cdot 10^{10}$	$3{,}6 \cdot 10^{12}$
120	273	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$	$5{,}6 \cdot 10^{-11}$	$2{,}5 \cdot 10^{12}$	$5{,}3 \cdot 10^{8}$	$1{,}1 \cdot 10^{12}$
130	303	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$8{,}6 \cdot 10^{11}$	$1{,}7 \cdot 10^{7}$	$3{,}4 \cdot 10^{11}$
150	348	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$4{,}5 \cdot 10^{11}$	—	$1{,}1 \cdot 10^{11}$
175	395	—	—	$2{,}8 \cdot 10^{10}$	—	$3{,}3 \cdot 10^{10}$
200	432	—	—	$4{,}3 \cdot 10^{9}$	—	$1{,}8 \cdot 10^{10}$

В заключение приводим сводку данных об изменении с высотой температуры и плотности воздуха. Еще 30 лет назад данные о плотности воздуха на высоте $H = 100$ *км* были ошибочны в сто раз, ные они известны с точностью до 20—30 процентов.

Данные о температуре могут отклоняться на 15—20°, а выше 100 *км* на $\pm 40°$. Табл. 1 приведена по [118], данные о плотности

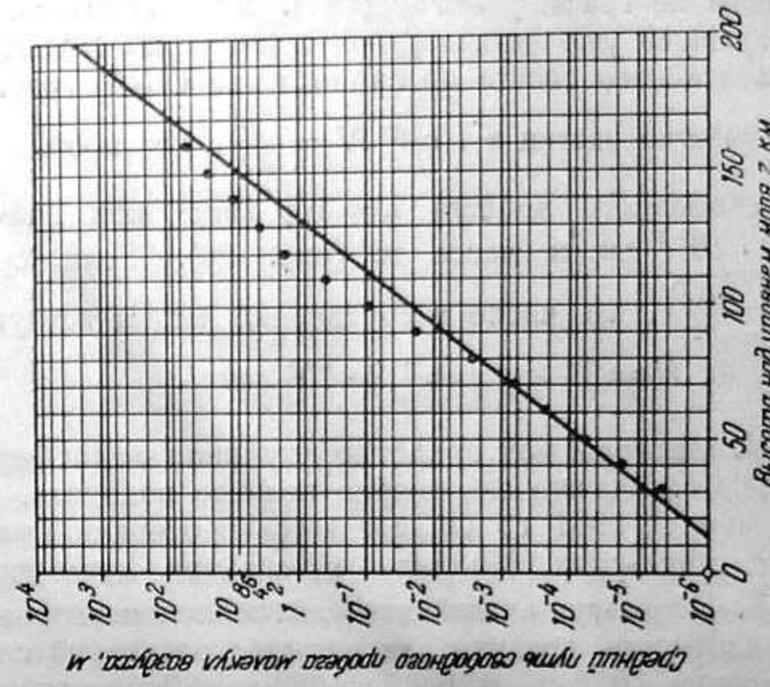


Рис. 26. Зависимость среднего пути свободного пробега молекул воздуха от высоты.

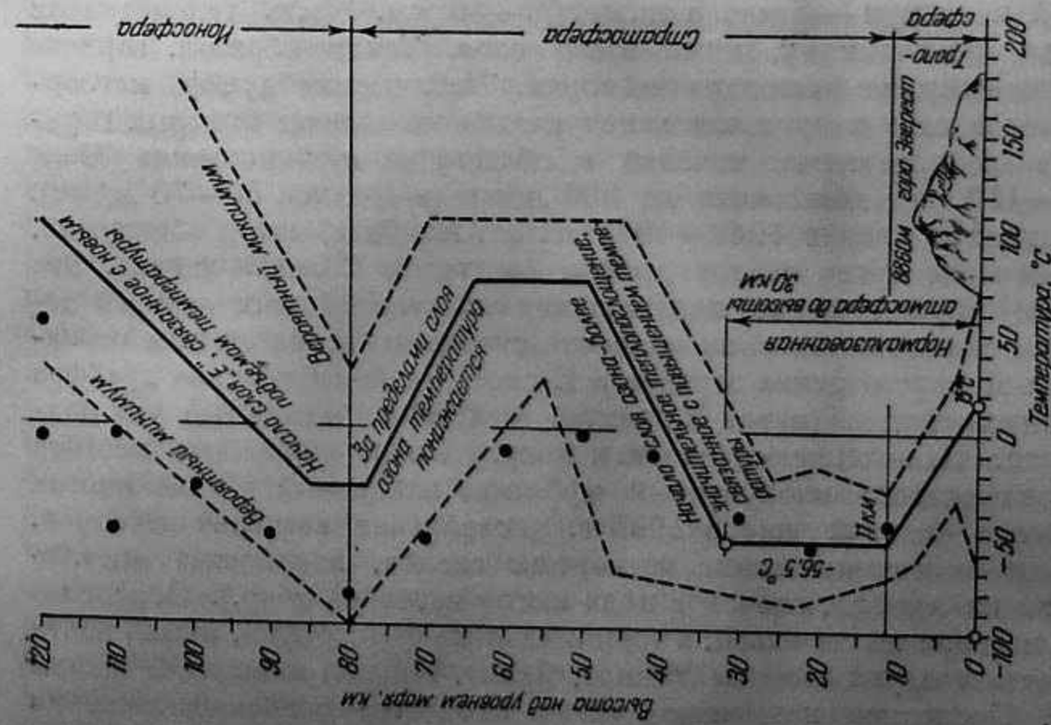


Рис. 25. Схема строения стандартной атмосферы до высоты 120 *км* (по NACA).

добавлены по графику Лагоу [124]. Эти данные несколько отличны от устаревшей уже «стандартной атмосферы» NACA (Национального консультативного совета по аэронавтике США) (рис. 25).

Количество частиц в 1 $см^3$ $N=\frac{p}{KT}$, плотность $\rho=\frac{pm}{KT}$ $г\cdot см^{-3}$, длина свободного пробега $\lambda=1/\sqrt{2\pi n\sigma^2}$ при диаметре молекулы $\sigma=3{,}2\cdot10^{-8}$ $см$ и массе m (рис. 26). Если средняя скорость $\bar{u}=\sqrt{\frac{8KT}{m}}$, то число ν соударений частиц воздуха $\nu=\frac{\bar{u}}{\bar{\lambda}}$. Например, на $H=94$ $км$ $\nu=1{,}2\cdot10^6$ $сек^{-1}$.

§ 33. Метеоры как средство изучения атмосферы. Еще в спектрах 1904 г. Блажко заподозрил наличие водорода, подтвержденное Миллманом в 1951 г. Он создается протонами Солнца. На инфракрасных эмульсиях Миллман в спектре метеоров нашел также азот N_2^+. Используя английские наблюдения метеоров, Вегенер определил плотность воздуха для расчета траекторий снарядов «парижской пушки» 1918 г. В 1922—1924 гг. Линдеман и Добсон на основе теории скачка плотности Рэлея развили физическую теорию метеоров (§ 262) и обнаружили плотности воздуха, в 10^2 превышавшие плотность изотермической атмосферы, что можно было объяснить лишь повышенной температурой верхних слоев. Изучение траекторий звуковых волн подтвердило это (рис. 24, 25). Область инверсии метеоры проходят, не угасая, поэтому высоты их погасания имеют двойной максимум — выше и ниже 50—60 $км$. Часть телеметеоров светится, по-видимому, ниже этого слоя. Таким образом, верхняя инверсия открыта благодаря метеорам. Наблюдения дрейфа метеорных следов еще в прошлом веке указали на наличие быстрых горизонтальных воздушных течений в области их возникновения ($H=$ $=80$—110 $км$), доходящих до 300 $м/сек$ (в среднем 50—70 $м/сек$). Исследуя 119 следов 1942—1945 гг. в Ашхабаде, автор обнаружил, что в течение суток вектор дрейфа следует за Солнцем вправо. Это означало периодические перемещения воздушных масс верхней атмосферы и соответствовало солнечно-суточным геомагнитным вариациям из-за перемещения зарядов в E-слое. Радионаблюдения дрейфов метеорных следов (метод Гринхоу) в 1954 г. полностью это подтвердили. Наложение суточной и полусуточной волн близ местной полуночи создает «полуночный эффект», найденный в ходе многих метеорных явлений еще в 1935 г. (ослабление свечения метеоров, особенно телескопических, метеорных следов, полуночная «петля» вектора их дрейфа, скачок в ходе высот метеоров и др.). Определяя массу метеора по свечению, а торможение по фотографии, можно найти плотность воздуха (методы Уиппла, Яккиа, Копала) и значение шкалы высот. Последнее независимо также находится радионаблюдениями метеоров.

ГЛАВА 4

ГЛАЗ И ЕГО СВОЙСТВА

§ 34. Введение. Принято считать зрение наиболее мощным из всех органов чувств. Глаз также является единственным из этих органов, составляющим непосредственный придаток мозга. Акад. С. И. Вавилов доказал, что глаз «близок по своим свойствам к идеальному прибору в смысле чувствительности», в десятки тысяч раз превосходя чувствительность лучших радиометров и позволяя непосредственно обнаруживать квантовое строение света, так как для получения зрительного впечатления глазу достаточно уже всего нескольких квантов в секунду.

Несомненно, что до сих пор наука, в частности астрономия, далеко не использовала всех возможностей глаза как оптического прибора и приемника радиации. Г. Г. Слюсарев говорит, что «когда нам удастся вникнуть в еще непонятые свойства глаза, техника оптических приборов будет обогащена новыми усовершенствованиями». В изучении метеоров глаз является одним из основных приборов, всегда находящимся «под рукой» и в ряде областей (телескопические метеоры, их спектры, метеорные следы и т. п.) пока еще единственным. Основные данные о метеорах были получены из наблюдений глазом (визуальных). Однако для того, чтобы они имели объективную ценность, глаз, как и всякий другой прибор, должен быть исследован, чего обычно не делают. Не следует забывать, что и при применении инструментальных методов конечным судьей является тоже глаз. Поэтому следует вспомнить его основные свойства как оптического прибора.

§ 35. Оптическая система глаза. В сочетании с оптическим инструментом (например, биноклем, телескопом) глаз является одним из «узлов» оптической системы. Глаз состоит из шести центрированных квазисферических линз — роговицы, водянистой влаги, передней части хрусталика, хрусталикового ядра, задней части хрусталика и стекловидного тела. Полная система среднего нормального глаза имеет переднее фокусное расстояние $f_1=-17{,}06$ $мм$ и заднее фокусное расстояние $f_2=+22{,}79$ $мм$. Длина глаза от передней поверхности роговицы до сетчатки равна 24,0 $мм$, преломляющая сила $+58{,}64$ диоптрий. При диаметре зрачка ночью $h=7{,}5$ $мм$ относительное

отверстие $\Phi = \frac{h}{f_1} = 1:2{,}3$. Показатель преломления хрусталика увеличивается к центру (с 1,386 до 1,406), что уменьшает сферическую аберрацию. Эта аберрация численно равна $+0{,}9$ диоптрии. Из-за дифракции света глаз видит звезду кружочком, а не точкой; наименьшее влияние аберрации и дифракции будет при $h = 3$ *мм* (днем). Хроматическая аберрация сводит синие лучи ближе красных на 1—2 диоптрии, например, при $\lambda = 430$ и 656 *мμ* разность фокусов равна 0,43 *мм* (1,1 диоптрии). Четвертый недостаток глаза — астигматизм косого падения, происходящий от несовпадения на 5° зрительной оси (идущей через желтое пятно) с оптической осью системы глаза.

§ 36. Зрачок. Отверстие радужной оболочки, находящейся в водянистой влаге камеры глаза и играющей роль диафрагмы, называется зрачком. Его диаметр меняется от $h = 1{,}5$ до 8 *мм* в зависимости от освещенности («зрачковый рефлекс»); однако даже при постоянном освещении h колеблется на 20%, так что количество проходящего света во время наблюдения постоянно изменяется. В зависимости от *яркости* B фона, на который смотрит глаз, меняется h. Если B измерять в международных свечах с 1 $см^2$ (в стильбах), то белая поверхность в ясную звездную ночь имеет $B \leqslant 10^{-7}$ *сб*, освещенная полной Луной — около $3 \cdot 10^{-5}$ *сб*, в сумерках при погружении Солнца на 6° под горизонт $3 \cdot 10^{-4}$ *сб*, освещенная Солнцем 3 *сб*. При $B = 10^{-9}$, 10^{-4}, 10^{-2}, 10^{-1} и 1,0 *сб* соответственно, $h = 7{,}4$; 6,7; 4,2; 2,8 и 1,9 *мм*. Скорость суже́ния зрачка при переходе от темноты к свету при малых яркостях примерно обратно пропорциональна яркости. В случае освещения глаза точечным источником света (звездой) или линейным (метеором) суже́ние зрачка обратно пропорционально освещенности.

При наблюдении метеоров зрачок реагирует уже после того, как метеор пролетел. При появлении яркого болида в течение первой секунды зрачок может сузиться до 5 *мм*, еще через 1 секунду до 4 *мм*, полная реакция занимает около 5 секунд.

§ 37. Светочувствительный аппарат. В глазу работают две светочувствительные системы, взаимно друг друга дополняющие и потому обеспечивающие восприятие света на огромном диапазоне освещенностей ($1:10^9$). Это — окончания зрительного нерва — колбочки и палочки. Первые, как и цветные фотопленки, могут быстро изменять чувствительность, но лишь немного (в десятки раз). Палочки приспосабливаются к темноте (ночной освещенности) за 50—70 мин., изменяя чувствительность в сотни тысяч раз. Вероятно, длительность этого периода связана с продолжительностью сумерек. Длина колбочек (35 μ) соответствует хроматической разнице *); желтое пятно,

*) Разница фокусных расстояний глаза для красных и синих лучей.

которым мы смотрим, состоит только из колбочек, палочки появляются по его периферии, поэтому астрономы слабые объекты рассматривают, глядя на них не прямым, а несколько боковым зрением. У углекопов это приводит к постоянному дрожанию глаза (нистагм).

Источник света силой в 1 международную свечу на расстоянии 1 *м* создает *освещенность* $E = 1$ *люкс* (*лк*); Солнце, полная Луна и звездное небо соответственно создают на Земле $E = 100\,000$, 0,25 и 0,001—0,002 *лк*. При $E = 25$ и 0,01 *лк* доля участия палочек составляет 18 и 92%, поэтому ночное (сумеречное) зрение бесцветно («ночью все кошки серы»). Глаза ночных животных содержат только палочки.

На периферии сетчатки одно нервное волокно обслуживает несколько палочек и поэтому разрешающая способность и чувствительность при боковом зрении ниже. В зрительном нерве имеется 10^6 таких волокон; где он входит в глаз, там имеется «слепое пятно», охватывающее около 100 кв. градусов. Зрительный пурпур палочек, поглотив 5—10% света, разлагается, выделяя провитамин А, при недостатке которого в пище у людей нарушается сумеречное зрение («куриная слепота»). Сетчатка глаза состоит из 10 слоев, наружный темно-коричневый пигментный защищает палочки от чрезмерных освещенностей; с падением последних пигмент опускается и перестает экранировать сетчатку (по этому принципу техникой созданы фотообъективы с жидкой линзой, темнеющей на свету).

Применение гальванометра и осциллографа позволяет исследовать биотоки глаза: при появлении света они возникают с запозданием и через 0,1 секунды достигают максимума, а затем спадают до нормы через 0,1—0,3 секунды. Таким образом, слабый метеор при появлении кажется более ярким (в 2—4 раза), чем и привлекает внимание. В одних нервных волокнах импульсы токов возникают только при появлении света, в других — только при его исчезновении, в третьих, — во время его действия. Число импульсов доходит до 280 в секунду. Энцефалограммы биотоков, снятых с участков коры мозга, соответствующих зрительной области, показывают, что вследствие возникновения внимания к источнику света в мозгу исчезает так называемый «альфа-ритм». Зрительный импульс передается затылочным полям коры большого мозга.

§ 38. Движения глаза. Движения глаза возникают оттого, что зрительный нерв, прежде чем достичь большого мозга, проходит в подкорковые зрительные центры — зрительный бугор, четверохолмие и коленчатое тело. Первые два передают раздражение в глазодвигательный центр. Поэтому при появлении источника света глаз «сам» поворачивается в его направлении. Это послужило, в частности, причиной неудач визуальных наблюдений метеоров в 1931—1933 гг. в США с обтюратором и вибрирующим зеркалом, когда глаз должен быть неподвижным. Центр вращения глаза лежит на 14 *мм* за

роговицей и на 10 *мм* перед сетчаткой, нормальные повороты совершаются на 0°,1—50°, хотя обычными являются дрожательные движения ло 0°,3 и мелкие скачки до 5′. В течение 70% времени они достигают 25′. Вращение глаза производится двумя косыми и четырьмя прямыми мышцами так, что только при вертикальном и горизонтальном движении меридианы глаза перемещаются параллельно самим себе, а во всех прочих направлениях возникает перемещение с поворотом глаза вокруг зрительной оси (например, против часовой стрелки при взгляде влево вверх). Из-за этого, например, возникает искажение формы пути метеора при переводе взгляда на метеор, замеченный боковым зрением. Естественное состояние глаза — непрерывное движение, вызванное ограниченностью поля его ясного зрения.

§ 39. Поле зрения глаза. У человека, в отличие от глаз некоторых животных (заяц) и насекомых (стрекоза), способных обозревать едва ли не полную сферу, поле зрения охватывает по горизонтали 120° (оба глаза 200°) и по вертикали 110°. При светосиле $\Phi = 1 : 2{,}3$ это вдвое превосходит достижения оптической техники. Однако область более ясного зрения имеет радиус ρ всего лишь 25—30°, что соответствует в оптике правилу постоянства $2\rho\,\Phi \approx 24°$. На периферии поля зрения различаемость цвета и деталей невозможна, однако наличие большого поля увеличивает возбуждение сетчатки при наблюдении слабых объектов. Поэтому при наблюдении метеоров не следует ограничивать поле зрения.

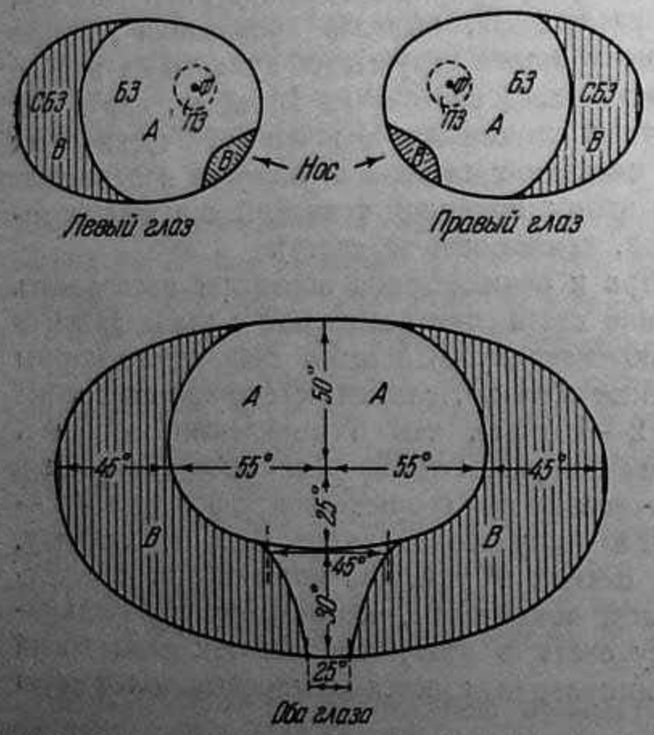


Рис. 27. Поле зрения глаза. Вверху — отдельно для каждого глаза, внизу — для обоих глаз.

Ф — точка фиксации, *ПЗ* — область прямого зрения, *БЗ* — бокового зрения, *СБЗ* — сильно бокового зрения, *АА* — рабочая зона, *ВВ* — зона ориентировки. Их общая площадь — 12 400 кв. градусов (И. С. Астапович, 1942 г.).

Для практического удобства будем различать (рис. 27) область прямого зрения ($\rho < 5°$), бокового зрения ($\rho = 5$—$30°$) и сильного бокового зрения ($\rho > 30°$). Их общий центр находится в точке фиксации F. При наблюдении метеоров точка F окружена «зоной фиксации» диаметром 1—2°, охватываемой «рабочей зоной», являющейся областью перекрытия полей зрения обоих глаз; вне ее и до границ поля зрения мы различаем «зону ориентирования». Форма границ рабочей зоны поля зрения определяется строением лица. Перемещением глаза мы легко можем переместить точку фиксации в любую точку рабочей зоны, но не зоны ориентирования. В нижней части поле зрения частично экранируется носом и остающаяся часть принимает трапециевидную форму, выше которой рабочая зона овальна. Переместить зоны рабочую и ориентирования можно лишь поворотом головы.

Максимальное их использование достигается таким расположением головы, чтобы точка фиксации Φ была близ середины рабочей зоны. Тогда область ясного зрения примерно совпадает с рабочей зоной и наблюдения наиболее эффективны.

Для численной иллюстрации приведем данные, найденные автором из наблюдений звезд с известными угловыми расстояниями: размеры зоны фиксации $3°{,}2 \times 3°{,}2$, ее площадь 10 кв. град., или 0,1% от всей площади поля зрения. Наибольшая протяженность рабочей зоны по линии, соединяющей оба глаза, —110°, в перпендикулярном к ней направлении —100°, причем площадь рабочей зоны $7250 \pm \pm 40$ кв. град. (58%). Отдельно овальная часть имеет $110° \times 70°$ или 6020 ± 30 кв. град. (48%), а трапециевидная: основания 45° (верхнее), 25° (нижнее), высота 35°, площадь 1230 ± 10 кв. град. (10%). Зона ориентирования соответственно охватывает 200 и 105° (включая обе предыдущие), так что общая площадь поля зрения одного глаза 9825 ± 380 кв. град. (79%), а обоих 12400 ± 600 кв. град. (100%). Так как площадь полусферы $S = 2\pi\left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = 20\,626$ кв. град., то, наблюдая двумя глазами, мы контролируем около 60% полусферы, в том числе рабочей зоной 35%.

§ 40. Зоны видимости. Объектив фотокамеры дает тем меньшую освещенность, чем дальше от оптического центра мы отходим (фотометрическая ошибка поля). То же свойство имеет глаз: чем слабее метеор, тем на меньшем угловом расстоянии ρ мы его можем увидеть. Значение ρ зависит от свойств глаза наблюдателя, условий наблюдения и т. д. и определяет ту площадь S, вне которой метеор данной яркости не виден (рис. 28). Зная для глаза площади этих «зон видимости», как мы их назовем, можно учитывать влияние бокового зрения на наблюдения метеоров. Вывод о наличии таких зон видимости можно сделать из наблюдений Бакгауза (Англия, 1886), Эпика (Ташкент, 1920), В. С. Астапович (Сталинабад, 1933) и др. В октябре 1943 г. для среднего состояния неба автор в Ашхабаде нашел ρ из наблюдений звезд и метеоров и вычислил площадь зон

$$S = 4\pi\left(\frac{180°}{\pi}\right)\sin\frac{\rho_1}{2}\sin\frac{\rho_2}{2} = 41253\sin\frac{\rho_1}{2}\sin\frac{\rho_2}{2},$$

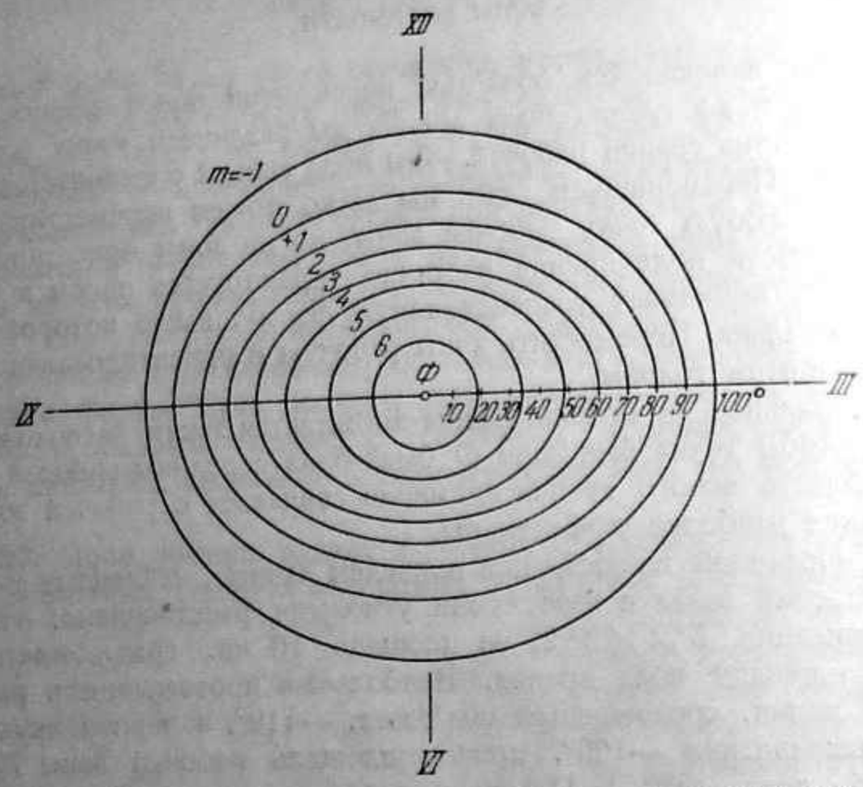


Рис. 28. Площади зон видимости метеоров различных звездных величин (по определениям автора 1943 г. в Ашхабаде).

Ф — точка фиксации. Линия III—IX параллельна линии, соединяющей зрачки обоих глаз.

Рис. 29. Распределение 965 метеоров в поле зрения наблюдателя (И. С. Астапович). Метеоры, наблюдавшиеся в области O прямым зрением ($n = 167$), сюда не нанесены. Левый глаз более зоркий, поэтому в левой половине метеоров больше.

где ρ_1 и ρ_2 — большая и малая полуоси эллиптического сегмента на сфере с центром в точке фиксации F; оказалось:

Зв. вел. m	—1	0	+1	2	3	4	5	6
ρ, метеоры, град .	65	60	55	50	40	30	20	8
ρ, звезды, град .	—	65	57	50	40	25	15	10
S, кв. град. . . .	13 300	11 200	9 070	6 720	4 760	1 930	710	310
% от полусферы	65	54	44	33	23	9,3	3,4	1,5%

Исследование распределения 950 метеоров в поле зрения автора в первом полугодии 1943 г. (Ашхабад) показало преобладание их в нижней половине поля зрения (54 : 46), может быть, от привычки лучше замечать происходящее внизу. Играет роль, конечно, зоркость глаза (рис. 29). Так как длительность полета метеора не мгновенна, то небезразлично, смотрит ли наблюдатель на небо в одну точку или обводит взором некоторую область; при этом зоны видимости следуют за глазом и повышают его эффективность на несколько десятков процентов. Движение взгляда по созвездиям активизирует внимание и, кроме того, не дает изображениям звезд «застаиваться» в глазу.

§ 41. Острота зрения. Острота зрения определяется разрешающей способностью глаза: центры двух диффракционных дисков Эри должны быть на расстоянии, большем их радиуса $r = 0{,}61\,\frac{\lambda}{n}\,\frac{f}{y}$, где $y = \frac{h}{2}$. Для глаза ночью $h = 8$ *мм*, $y = 4$ *мм*, $f = 24$ *мм*, $\lambda = 0{,}5\mu$, откуда $r = 1{,}4\mu$. В узловой точке глаза это дает угол $17''$. Днем $h = 2$ *мм* и угол $\alpha = 67''$ при $r = 5{,}6\mu$, чему соответствует диаметр палочек (ночь) —2μ и колбочек (день) —6μ, выработавшийся в процессе эволюции организма. Для раздельной видимости нужно, чтобы между двумя световозбужденными элементами зрения находился один невозбужденный. Еще Евклид нашел $\alpha = 1'$. Величина $K = \frac{1}{\alpha'}$ называется *остротой зрения*. В лабораторных условиях встречается острота $K = 5$—10, крайне редко 15—20. При $K < 1$ острота понижена. Нониальная острота зрения есть способность глаза правильно совместить отрезки прямых (с точностью до 2—3″), что очень важно при определении направления траекторий метеоров, находимого точнее, чем положения точек появления и угасания. Острота максимальна при $E = 25$ *лк* и $h = 3$—4 *мм*, поэтому ночью K понижено, особенно после пребывания на ярком свету; слабый свет, напротив, повышает K (как и зрение двумя глазами). Ночью K выше не в точке фиксации, а на 20° от нее в сторону носа, а также на 15 и 40° — к виску. Тренировкой можно повысить K раза в полтора.

§ 42. Контрастная чувствительность. Это свойство глаза играет важную роль: так как интенсивность света меняется на огромном диапазоне, то восприятие света как бы логарифмирует его (закон

Вебера — Фехнера) и различает не абсолютную разницу яркостей ΔB, а относительное изменение $\Delta\eta = c\frac{\Delta B}{B}$. Пределу различимости соответствует минимальное $\frac{\Delta B}{B} = \varepsilon$ (порог контрастности). Аналогичные выражения имеют место для разницы освещенностей ΔE в случае наблюдения точечных источников (звезд) или метеоров. В этом случае $\varepsilon = \frac{\Delta E}{E}$. Порог контрастности для протяженных объектов, звезд и метеоров, вообще говоря, различен.

Контрастная чувствительность есть $\frac{1}{\varepsilon}$, различная днем и ночью и максимальная при освещенности E порядка нескольких тысяч люксов (рассеянный дневной свет). Однако на диапазоне E от 20 до 100 000 *лк* $\varepsilon < 5\%$. При ночных освещенностях термохимические процессы вызывают собственный свет сетчатки, создающий освещенность $e \cong 0{,}0002$ *лк*, поэтому $\varepsilon = \frac{\Delta E}{E+e}$ и при E, сравнимом с e, требуется большая освещенность E для достижения той же контрастности (наблюдение метеорных следов на фоне неба). Порог ε выше при перемещении объекта, поэтому астрономы при поисках слабых комет покачивают трубу; повышению ε способствует зрение двумя глазами, т. е. применение бинокулярной насадки. К периферии абсолютная чувствительность ΔE падает, но относительная ε растет (вдвое на $\rho = 26°$). Свет ночного неба повышает ε, полная темнота понижает, как и «блёские» источники вроде фонарей. Величина ε максимальна между 20 и 50 годами и тренировкой может быть увеличена вдвое.

43. Световая чувствительность. Световая чувствительность глаза $S = \frac{1}{I_0}$, где I_0 есть пороговое раздражение, по С. И. Вавилову равное в среднем 57 *квантам/сек*, что соответствует световому потоку $4 \cdot 10^{-12}$ *эрг/сек*. Таким образом, непрерывное видение еще возможно при падении 1 фотона на одну палочку раз в полчаса. Глаз кошки чувствительнее еще в 30 раз. При $\lambda = 0{,}5$ μ глаз использует 40% падающей энергии. Поэтому на пределе в темноте огонь свечи можно заметить за 130 *км*; на фотопластинку он заметного действия не окажет даже при экспозиции в несколько лет. В природных условиях порогу I_0 соответствует освещенность на зрачке $E = 10^{-9}$ *лк* от точечного источника, изображение которого падает на одну палочку. Для поверхности с видимым поперечником 1 и 10° нужно $E_0 = 6 \cdot 10^{-9}$ и 10^{-7} *лк*. Если бы ночной фон неба не был довольно ярким, то мы видели бы звезды до 10,5 зв. вел.

Большие поверхности в полной темноте начинают различаться при их яркости $B = 10^{-10}$ *сб*, а при яркости фона неба $B = 10^{-9}$, 10^{-7}, 10^{-5} и 10^{-3} *сб*, соответствующей астрономическим наблюдениям, порог S снижается в 1, 10, 10^2 и 10^3 раз, т. е. в $\sqrt{\frac{B}{B_0}}$ раз, где $B_0 = 10^{-9}$ *сб*. Для синего цвета порог в несколько раз меньше.

Вследствие способности нервной ткани к возбудимости только из-за одной реакции коры мозга на внешние и внутренние события (И. П. Павлов) S изменчиво до 20%. Поэтому-то так мешает наблюдениям посторонний шум и разговор.

§ 44. Адаптация. Освещенность на зрачке меняется в природных условиях от 10^5 *лк* днем до 10^{-3} *лк* ночью. Обслуживая организм, глаз регулирует поступление световой энергии зрачковым рефлексом, переходом от колбочкового зрения к палочковому и изменением

Рис. 30. Влияние адаптации глаза на среднюю звездную величину $\overline{m}$ метеоров, замечаемых через x минут после начала наблюдений. Числа в столбцах указывают количество наблюдений (1944 г., Ашхабад).

количества защитного пигмента сетчатки. Этот процесс приспособления назван *адаптацией*. Еще астрономы XVIII в. заметили, что перед наблюдением слабых объектов надо побыть в темноте (темновая адаптация). Обратный переход сопровождается световой адаптацией, длящейся при переходе к дневному свету десятые доли минуты («резь в глазах»,), к свету полной Луны — до 10 мин. Первые 5 — 7 минут пребывания в темноте работают еще колбочки, увеличив свое S до 80 раз, тогда как палочки еще не включились; за первые полчаса темновая адаптация повышает S до 170 000 раз за счет палочек и только в 145 раз за счет колбочек; через 60—80 минут достигается предел (до 215 000 раз), хотя он колеблется в обе стороны; обычно S достигает максимума к четырем часам утра. Порог S колбочек грубее в 400 — 500 раз, чем у палочек, и равен $24 \cdot 10^{-10}$ *эрг/сек*. Появление в поле зрения астронома даже ярких звезд ухудшает порог S в сотни раз, как и свет ночного неба (рис. 30).

§ 45. Слепящая яркость. Некоторая очень большая яркость B_g вызывает чувство ослепления при внезапном переходе от темноты к свету. Величина B_g сама зависит от той яркости B, на которую был адаптирован глаз, поэтому например, болид —6 величины при одной и той же яркости днем может не быть заметным, а ночью оказаться «ослепительным». Опытом найдено, что $B_g = 0{,}55\sqrt[4]{B}$ *сб*. При поперечнике 4° источник при $B = 16{,}5$ *сб* имеет $B_g = B$. Такая слепящая яркость называется «безусловной» и является слепящей при всякой адаптации. Она в 5 раз превышает яркость белой бумаги, освещенной Солнцем. При сверхслепящей яркости (взгляд на Солнце, электродугу и т. п.) возникает длительное (до суток) временное ослепление. Яркая вспышка в темноте требует времени на восстановление перерасходованного зрительного пурпура, поэтому в глазу возникают последовательные образы (темные и светлые) в течение долей секунды, что нужно учитывать при обработке наблюдений болидов.

§ 46. Иррадиация. Иррадиация, или кажущееся увеличение размеров светила, вызвана светорассеянием на сетчатке, поэтому геометрические границы светлого предмета видны расширенными. Это расширение D растет с яркостью (у протяженных объектов) или с блеском (у точечных)*). Простому глазу точечные диски звезд кажутся обычно диаметром $1' - 2'$, Юпитер и Венера до $3' - 4'$, Луна и Солнце около I° вместо 0°,5. Волоски электролампочки кажутся расширенными в сотни раз; у блёского источника D доходит даже до 5°.

§ 47. Лучистость. Лучистость светил обусловлена светорассеянием в хрусталике и стекловидном теле и зависит от неправильностей границы зрачка. Поэтому звезды видны нам «с лучами». При повороте головы эти лучи также поворачиваются. Они мешают видеть детали, например, спутников звезд, планет и метеоров.

§ 48. Инерция зрения. Фотохимические процессы в глазу не могут протекать мгновенно; после прекращения света его действие продолжает ощущаться. При частоте 15—70 *гц* перемещающееся свечение кажется непрерывным. Минимальная длительность, при которой еще нет слияния мельканий, есть *хронаксия*; при этом источник света должен вдвое превышать по интенсивности порог. Более слабый источник замечается хуже и хронаксия увеличивается. В условиях метеорных наблюдений она порядка 0,04 секунды. Из-за инерции зрения при кратковременных процессах замечаемая яркость менее истинной, например, при 0,02 сек. поверхность, имеющая освещенность 1000 люксов, кажется втрое менее яркой. Если же возникший раздражитель продолжает светить неизменно, то воспринимаемая

*) Определение блеска см. § 78 и гл. 16.

яркость через 0,03—0,12 секунды достигнет максимума и лишь через 0,3 секунды уравняется с истинной яркостью. Этот максимум сильнее для синего и белого цвета, чем для желтого и красного. После исчезновения источника воспринимаемая яркость падает на протяжении 0,2 секунды. Поэтому отметки точек появления и угасания метеоров не могут соответствовать истинным и при их определении нужно учитывать инерцию зрения каждого наблюдателя. По этой же причине кажущаяся длительность видимости τ больше истинной. На некотором диапазоне оказывается, что $c\tau = \text{const}$, где c есть контраст. Движущийся источник протяженности l при скорости v создает воспринимаемый контраст $c' = \frac{kl}{v\tau}$, где $\tau \approx 0{,}05$ *сек* (днем), а k — коэффициент, определяющий переоценку истинной длительности. Поэтому, например, черный метеорит ($k = 1$) при падении днем со скоростью 100 *м/сек* при поперечнике $l = 10$ *см* будет иметь $c' = 0{,}05$, т. е. может быть замечен в воздухе, что и подтверждается. Если глаз следит за объектом, то контраст растет и приближается к истинному. Так как для раздражения окончаний зрительного нерва нужно накопление продуктов распада родопсина, то без инерции зрения мы не смогли бы вообще видеть.

§ 49. Быстрота восприятия. При адаптации к слабому свету и яркости источника в 400 раз выше пороговой быстрота восприятия составляет около 0,1 секунды. Но при достаточной интенсивности можно воспринимать явление, длящееся даже миллионную долю секунды времени (например, молнию). Поэтому можно видеть метеоры, вообще говоря, любой длительности.

§ 50. Глубина восприятия. В условиях ночных наблюдений оценка расстояний до источников света при отсутствии промежуточных ориентиров весьма несовершенна и даже невозможна, если неизвестна сила света этих источников. Из-за иррадиации случайный наблюдатель может потерять всякое представление об истинном расстоянии; ошибки достигают тысячекратных, например, болиды кажутся пролетающими в нескольких сотнях метров, Кроме того, известное явление сплюснутости небосвода преувеличивает угловые размеры тел близ горизонта и они из-за этого кажутся еще в 1,5—3 раза ближе.

§ 51. Восприятие движения. Резкий сдвиг точки относительно фона на $10''$ и даже на $7''$ уже заметен; если скорость равномерна, то она заметна при $\omega \geqslant 60''$ *сек*$^{-1}$. Изолированная точка требует соответственно $75''$ и $\geqslant 900''$ *сек*$^{-1}$. Если глаз неподвижен, то при $\omega = 140 - 350°$ *сек*$^{-1}$ получается впечатление сплошной полосы. Периферия сетчатки хорошо замечает смещение и даже мерцание. При $\omega < 30°$ *сек*$^{-1}$ глаз может следить за движением. Разница скоростей

заметна, если она составляет 8% (при малых ω —12%). Глаз часто «видит» движение, когда его нет («движение» Луны в облаках, иногда «смещение» метеорных следов на фоне звезд). Следя за движущимся телом, мы по инерции видим его некоторое время t, когда его уже нет; оно кажется продвинувшимся вперед на отрезок $\lambda = \omega t$ (как было лабораторно найдено автором в Ашхабаде в 1943 г.).

§ 52. Восприятие цвета. Глаз ночью воспринимает 2% света при $\lambda = 400$ *мμ*, 10% при 420 *мμ* и соответственно 41, 96 и 8% при 460, 500 и 600 *мμ* («кривая видности»), охватывая область длин волн от фиолетовых лучей с $\lambda = 380$ *мμ* до инфракрасных с $\lambda = 750$ *мμ*. Эти пределы ночью сокращаются до 400—620 *мμ*.

Таблица 2

Кривые видности для глаза

λ *мμ*	Дневное зрение	Ночное зрение	λ *мμ*	Дневное зрение	Ночное зрение
380	0,0000	—	560	0,9950	0,380
390	0,0001	—	570	0,9520	0,270
400	0,0004	0,020	580	0,8700	0,190
410	0,0012	0,055	590	0,7570	0,128
420	0,0040	0,105	600	0,6310	0,085
430	0,0116	0,165	610	0,5030	0,030
440	0,0230	0,250	620	0,3810	0,010
450	0,0380	0,340	630	0,2650	—
460	0,0600	0,410	640	0,1750	—
470	0,0910	0,530	650	0,1070	—
480	0,1390	0,750	660	0,0610	—
490	0,2080	0,880	670	0,0320	—
500	0,3230	0,964	680	0,0170	—
510	0,5030	1,000	690	0,0082	—
520	0,7100	0,968	700	0,0041	—
530	0,8620	0,900	710	0,0021	—
540	0,9540	0,700	720	0,0010	—
550	0,9950	0,558	730	0,0005	—

Максимум чувствительности днем (колбочки) у 556 *мμ*, ночью (палочки) у 510 *мμ* соответствует двум кривым видности. Максимум поглощения света зрительным пурпуром лежит у 510 *мμ*. Для восприятия зеленого цвета нужно менее 10 *квант/сек* (абсолютный порог колбочковой чувствительности). При усилении источника света сначала воспринимается свет, потом цвет, соответственно достижению их порогов. При $\rho = 10°$ ночью чувствительность глаза S возрастает к синему и желтому цветам в 7—10 раз, а к красному цвету убывает в 2,5 раза; при $\rho = 30°$ не ощущается зеленый цвет, а далее все цвета кажутся белесыми. При появлении разноцветных источников равной яркости первым будет замечен зеленый, далее красный, затем синий. С возрастом хрусталик желтеет, цветовосприятие нарушается, сине-фиолетовые цвета видны хуже. Из двух звезд равного блеска в сумерки красная кажется ярче голубой (явление Галисо), а ночью, из-за палочек, наоборот (явление Пуркиньи). Чем ярче источник, тем он белее: сталь при $T = 2000°$ ослепительно бела, а звезда кажется густо-красной (из-за смещения восприятия цветов к меньшим λ). Летом S для зеленого цвета на 6% выше, чем зимой. Остгофф считал, что цветовосприятие меняется даже с солнечной активностью на 0,5 балла его шкалы. На высоте 4,5 *км* S падает на 42% для красного цвета и на 3% для зеленого. Глаз может различить до 200 оттенков спектра, но при ослаблении яркости остаются только три: красный, зеленый и фиолетовый, затем исчезают крайние, а остающийся зеленый кажется серым.

§ 53. Влияние возбудителей. Учение о повышении чувствительности органов чувств заложено И. М. Сеченовым. Повышая S глаза, мы тем самым увеличиваем, например, чувствительность слуха. При темновой адаптации S падает при перегрузке организма и повышается после сна и предварительной засветки слабым красным светом (красные очки), который не действует на зрительный пурпур и потому не нарушает адаптации. Кофеин, содержащийся в чае и кофе, усиливает S на 50%, действуя в течение 1,5 часа; при этом повышается также острота и контрастная чувствительность. Сенсибилизация зрения может быть достигнута как прямым путем (действием кофеина на кору мозга), так и косвенным, через нервную систему (засветкой красным светом, тихой музыкой и т. д.). Но лучшим средством борьбы со сном являются не возбудители, а сам сон: перед наблюдениями сон обязателен, невыспавшийся наблюдатель к работе допущен быть не может.

Указанные обстоятельства имеют первостепенное значение при организации визуальных наблюдений метеоров и должны всегда приниматься во внимание при их организации и обработке.

ГЛАВА 5

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ И ВИДИМОСТИ

§ 54. Роль условий наблюдения. В силу самого характера явления метеоров мы не можем ни наблюдать их вблизи, ни изменять условия явления, как это делает в лаборатории экспериментатор. Стремясь по возможности получить наиболее объективные данные о метеорных явлениях, мы должны исключать влияние различных обстоятельств на результаты наблюдений, приводящее к их искажению. Эти обстоятельства вызваны различными причинами: астрономическими, геофизическими, географическими, метеорологическими, геометрическими, местными и личными.

§ 55. Астрономические условия. Эти условия играют огромную роль в наблюдении метеоров. Сюда относится дневное освещение, ослабляющее яркость предельно заметных метеоров с $+6$ до -4 зв. вел., свет Луны, заставляющий прекращать наблюдения, так как они делаются несравнимыми с прочими (рис. 31) из-за снижения светового и цветового порогов зрения, непостоянство фона неба в течение ночи и года из-за свечения неба, Млечного Пути и зодиакального света, наконец, активность Солнца, проявляющаяся на высотах метеоров, их следах и др. и делающая их несравнимыми при наблюдениях в разные годы 11-летнего цикла. Из-за того, что крайние пределы расстояний Земли от Солнца изменяются лишь на $3{,}4\%$ (от 1,017 до 0,983 астр. ед., или на $5{,}1 \cdot 10^6$ *км*), мы не знаем плотности метеорной материи в других частях солнечной системы. Влияние перечисленных причин частично можно исключить, например, организуя

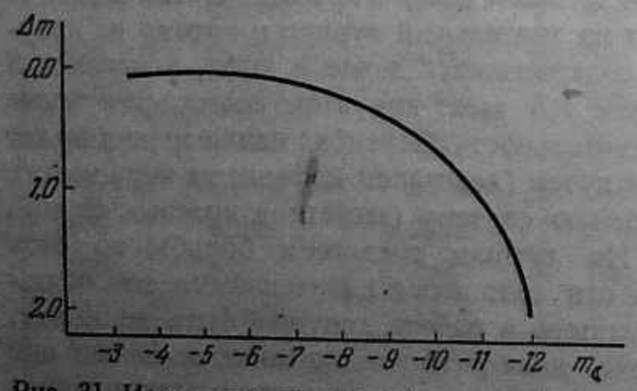


Рис. 31. Изменение предельной звездной величины метеоров (Δm) в зависимости от блеска Луны ($m_{\mathbb{C}}$).

круглосуточные наблюдения во время полярной ночи, применяя радиометоды, не зависящие от света Солнца и Луны, ведя наблюдения в околополярной области неба, строя расписание работы по времени лунных суток и т. п.

§ 56. Геофизические причины. Сумерки отнимают не менее 2,5 часов у темного времени суток; освещенность в сумерки меняется в миллионы раз и слишком громоздко ее учитывать, если только не наблюдалось исключительное явление, вроде болида или метеорного дождя. Существуют также лунные сумерки, но они становятся заметны лишь минут за 10 до восхода полной Луны. На полюсе обычные сумерки длятся по два месяца, так что, учитывая еще свет Луны, не заходящей две недели в месяц, мы найдем, что из 8766 часов в году на полюсе пригодно для наблюдений лишь около 900, а на экваторе не более 1700. Это число часов полной ночи для промежуточных широт φ меняется примерно как $900 + 800 \cos \varphi$.

Свечение ночного неба и наличие звезд снижает порог чувствительности глаза в десятки и сотни раз, вызывает вуаль на фотопластинках. Изменение состояния ионосферы сказывается на распространении радиоволн, которые применяются для исследований метеоров. Ночное небо у горизонта гораздо ярче, чем в зените: луч света на горизонте проходит 1100 *км*, достигнув высоты 100 *км*, т. е. путь, в 11 раз больший, чем в направлении на зенит. Земная атмосфера поглощает и рассеивает свет, уменьшая яркость светил у горизонта до ста раз, окрашивая их в красноватые оттенки. Из-за рассеяния воздухом лучей коротких длин волн перестают быть видны туманные оболочки и газовые следы метеоров; метеоры на больших зенитных расстояниях кажутся резко очерченными, чего на самом деле может не быть. Из-за перечисленных причин приходится наблюдать близ зенита, сравнивать цвет и яркость метеоров со звездами на той же угловой высоте, что не всегда возможно, так как часто метеоры голубее самых горячих звезд и ярче самых ярких звезд неба. Нужно учитывать изменение прозрачности воздуха и свечения неба, например, определяя звездную величину $m_{\text{п}}$ предельно слабых звезд, что можно делать или непосредственно, или подсчитывая изменение ΔN их числа на одном и том же участке неба. Тогда изменение звездной величины Δm, как известно из звездной астрономии, связано с ΔN соотношением

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{3}{2} \ln 2{,}512 \ldots \Delta m = 1{,}39\, \Delta m.$$

Практически $\frac{\Delta N}{N} = 1{,}05\, \Delta m$, так что, например, $\Delta m = 0{,}2$ зв. вел. влечет за собой изменение N на 21%, что очень заметно. Если на $\Delta m = 1$ зв. вел. число метеоров меняется в k раз, то изменение $m_{\text{п}}$ на значение Δm повлечет изменение их числа в отношении

$N_{m+\Delta m}/N_m = k^{\Delta m}$. Например, при $\Delta m = 0{,}1$ и $k = 3{,}38$, $\Delta N = +13\%$, что весьма существенно; сумерки или лунный свет легко дают $\Delta m = -2$ и -3, из-за чего N меняется во много раз. Поэтому этим «методом предельных звезд» приходится несколько раз контролировать состояние неба во время наблюдений.

§ 57. Географические причины. Как известно, на широте φ не видна область неба южнее склонения $\delta = -(90° - \varphi)$, поэтому, например, на полюсах Земли видно только 50% всего неба; 100% доступно наблюдениям лишь на экваторе. Далее, так как одновременно видна лишь половина небесной сферы, то явление, даже доступное наблюдению на данной широте, может быть под горизонтом и невидимо в данный момент. Это часто бывает с метеорными дождями. Кроме того, в высоких широтах мешают белые ночи (например, в Пулкове с 25 апреля по 19 августа, т. е. в течение трети года). Радианты, расположенные в области невосходящих звезд, останутся недоступными наблюдениям. В Ленинграде площадь ее составляет 25%, в Ашхабаде 10% от всего неба. Чтобы парализовать влияние этой причины, некоторые обсерватории имеют филиалы в южном полушарии. На необходимость посылки метеорных экспедиций на юг впервые указывалось в 1921 г. Первым съездом любителей мироведения (Петроград); впоследствии Гофмейстер (Германия) провел несколько экспедиций в Африку, а Бэрд (США) организовал наблюдения метеоров в Антарктиде в 1934 г. Большое значение имеет высота радианта над горизонтом (рис. 32).

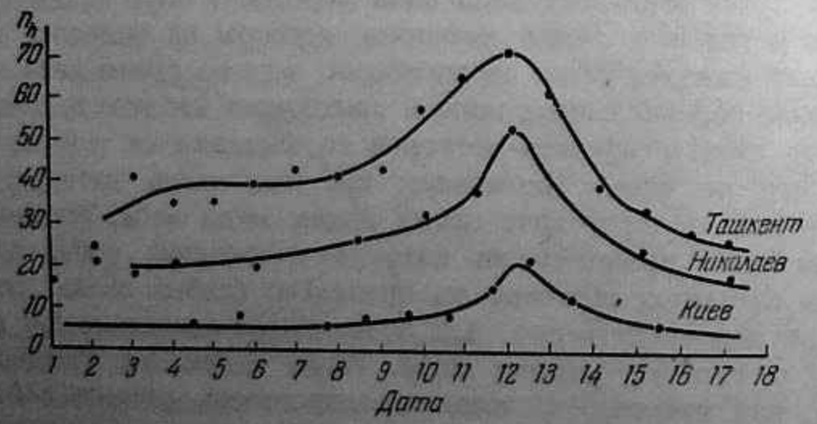


Рис. 32. Часовые числа метеоров потока Персеид (n_h) с 1 по 18 августа 1926 г. по наблюдениям в Ташкенте ($\varphi = 41°$), Николаеве ($\varphi = 47°$) и Киеве ($\varphi = 50°$). Заметно влияние изменения высоты радианта и темноты неба с широтой (по Б. М. Машбицу).

§ 58. Метеорологические условия. В астрономии, как ни в какой другой науке, проявляется зависимость наблюдателя от погоды. При необходимости обеспечить вероятность ясной погоды при

наблюдениях приходилось посылать специальные метеорные экспедиции, строить метеорные обсерватории в пунктах с ясным небом (Сталинабад, Ашхабад, Гарвардская экспедиция в Аризоне 1931—1933 гг., в Нью-Мексико с 1947 г.), подниматься над облаками на аэростатах (впервые Г. А. Тихов для наблюдения Леонид, Л. А. Катасев в 1946 г. в Москве в эпоху Драконид) или на самолетах. Даже в ясную погоду зимой из-за мороза могут отказать приборы, а летом роса покрывает объективы, против чего необходимы особые обогреватели.

§ 59. Геометрические причины. Один и тот же метеор с разных расстояний будет казаться неодинаковым, например, телескопический метеор 7,5 величины при $z = 80°$ в случае наблюдения его в зените окажется 5 величины и будет виден простым глазом. Таким образом, необходима редукция видимой яркости за расстояние (рис. 33). Обычно

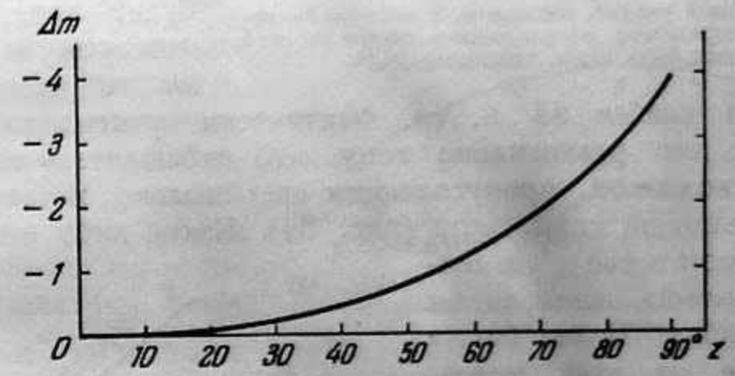


Рис. 33. Поправка Δm к видимой звездной величине метеора для приведения ее к зениту ($z = 0°$) (по К. П. Станюковичу).

ее приводят к зениту или к стандартному расстоянию в 100 *км*. К. П. Станюкович предлагает использовать выражение, учитывающее кривизну Земли:

$$\Delta m_z = 5 \lg \sin w - 5 \lg \sin (h + w).$$

Здесь Δm_z есть редукция, h — видимая угловая высота метеора, w — угловая высота той точки, в зените которой метеор прошел. Ниже мы даем эту поправку, а также полную поправку с учетом атмосферного поглощения Δm в визуальных лучах и значение рефракции, приподнимающей метеор над горизонтом:

z	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Δm_z	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,8	2,7	4,0
$\Delta m_z + \Delta m$ . .	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,4	2,2	3,6	10
Рефракция . .	0′,0	0′,0	0′,2	0′,5	0′,8	1′,0	1′,7	2′,6	5′,3	34′,4

Очень редко можно видеть метеоры, как бы «залетающие за горизонт». В двух случаях у автора из 37 000 они казались метеорами 1—3 зв. вел., которым при расстоянии 1100 *км* должны были соответствовать болиды —7, —10 величины.

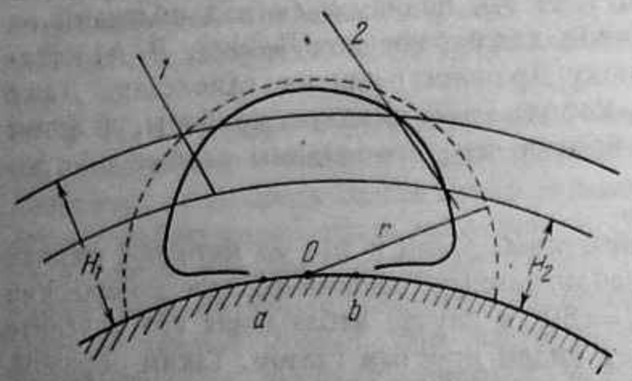


Рис. 34. Влияние сферы видимости.

У метеора *1* нельзя увидеть появление, у метеора *2* — исчезновение. За пределами сферы метеор данной яркости не может быть виден наблюдателю *O*.

Опишем мысленно сферу радиусом r вокруг наблюдателя. Видимой яркости 6 зв. вел. на расстоянии $r = 100$ *км* соответствует метеор с силой света $I = 85$ *м. св.* Поэтому любой метеор с $I < 85$ *м. св.* за пределами этой сферы не будет виден. У ярких метеоров не будут видны те части пути, где метеор был слабее 85 *м. св.* Фактически, учитывая атмосферное поглощение, это равносильно тому, что наблюдатель накрыт «хрустальным» колпаком, пропускающим свет только метеоров, достигших определенной силы света (рис. 34). Какой-либо второй наблюдатель, достаточно удаленный, «накрытый» своим таким же «колпаком», будет ближе или дальше от этих метеоров и в соответствии с этим будет видеть не то, что видит первый наблюдатель. Таким образом, при самом внимательном отношении к делу оба наблюдателя из-за этой геометрической причины не получат тождественных результатов. Сказанное в равной мере относится и к фотокамере, и к радиоустановке. Возникает досадная «фильтрация» наблюдаемого материала.

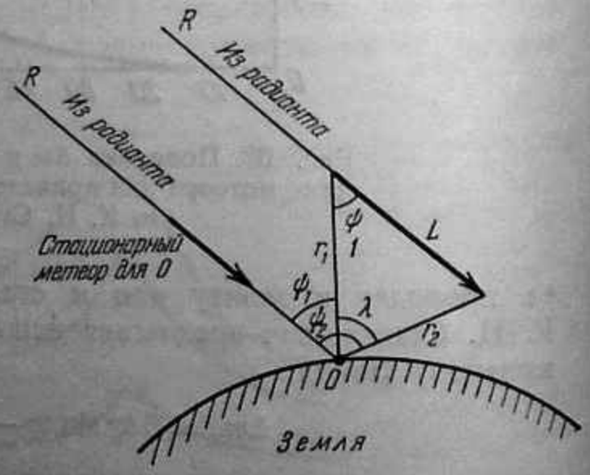


Рис. 35. Метеор L из радианта R наблюдается в точке O под углом λ с элонгацией точки появления ψ_1 и точки исчезновения $\psi_2 = \psi_1 + \lambda$.

Наконец, вследствие перспективы метеор наблюдается нами в ракурсе (рис. 35). Угол между направлением на радиант и на метеор называется *элонгацией* от радианта ψ. При $\psi = 0°$ метеор летит прямо на наблюдателя и кажется неподвижной точкой (*стационарный метеор*). Такие метеоры особенно ценны, так как сразу указывают положение радианта. Местоположение наблюдателя стационарного метеора указывает положение «земной точки», где продолжение траектории метеора пересекает поверхность Земли (рис. 36). Вследствие перспективы длина λ пути метеоров укорачивается; можно «привести» ее к зениту и исправить за наклон к лучу зрения, с помощью выражения $\lambda_z = \lambda \sec z \operatorname{cosec} \psi$, годному для не слишком больших λ. По тем же причинам видимая угловая скорость ω метеоров меньше «зенитной» $\omega_z = \omega \operatorname{cosec} \psi \sec z$. Если направления полета метеоров беспорядочны, то для учета перспективного сокращения можно применить одну из теорем И. А. Клейбера [12]: средняя величина проекции λ или ω на небесную сферу в $\frac{4}{\pi} = 1{,}27324\ldots$ раз меньше среднего значения истинной λ' или ω'. Например, по 1594 нашим наблюдениям в Николаеве в 1925 г. среднее $\lambda = 8°{,}33$, откуда исправленное $\lambda' = 10°{,}59$; высоте $H = 87$ *км* тогда соответствует линейная длина пути $L = 2H \operatorname{tg} \frac{\lambda'}{2} = 16{,}1$ *км*,

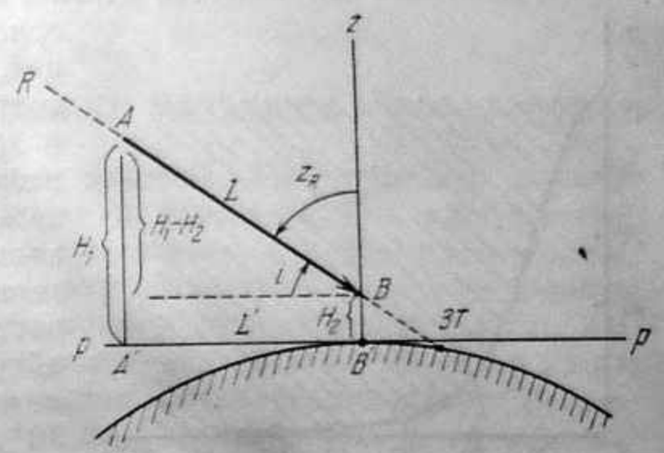


Рис. 36. Метеор AB движется под углом i к плоскости PP горизонта точки B'.

ЗТ — земная точка. H_1 и H_2 — высоты появления и исчезновения по отношению к горизонту B', L' — проекция длины пути L.

пробегаемая за 0,432 сек. (по 249 определениям 1925—1926 гг.), что дает среднюю линейную скорость $v = 37{,}3$ *км/сек*. Из тех же наблюдений независимо средняя угловая скорость $\omega = 19°{,}7$ *сек*$^{-1}$, что дает $\omega' = \omega \frac{4}{\pi} = 25°{,}08$ *сек*$^{-1}$ или при $H = 87$ *км* получим $v = 38{,}6$ *км/сек*. Современные радиометоды дают в среднем $v = 44$ *км/сек*, таким образом, фактор Клейбера немного занижен, так как он не учитывает потерю при наблюдениях метеоров на больших зенитных расстояниях.

§ 60. Местные причины. Среди них следует различать помехи дальнего действия — зарево огней большого города, дым и пыль населенных пунктов, сказывающиеся на визуальных и фотографических наблюдениях, индустриальные и иные радиопомехи и топографию местности, оказывающие влияние на радионаблюдения метеоров, и помехи близкого действия, такие, как степень закрытия горизонта строениями, наличие фонарей, а для визуального наблюдателя также посторонний шум, бесполезные разговоры, громкая музыка и даже укусы комаров и москитов. Одни только «микропомехи» последнего рода способны снизить наблюдаемое число метеоров на 80—90%, причем оставшиеся 10—20% оказываются неполноцен-

ными. Бороться с влиянием местных причин приходится тем, что станция наблюдений организуется вдали от городов, на высоких местах с открытым горизонтом. Влияние топографии и других помех на радиоволны требует особых забот и учета.

§ 61. Личные условия. При производстве наблюдений личные свойства наблюдателя вообще имеют очень большое значение (рис. 37). Из свойств глаза нам известно влияние множества агентов на процесс зрительного восприятия (адаптация, инерция зрения, моральное состояние, сонливость, усталость и др.). Для утомленного за день наблюдателя коварным врагом является сонливость, подкрадывающаяся незаметно. При наблюдениях даже нельзя отвлекаться посторонними мыслями: упорное обдумывание какого-либо вопроса может снизить внимание на 20—30%: наблюдатель «смотрит, но не видит». Не безразлично, наблюдать ли одним или двумя глазами: в последнем случае из-за взаимной активизации глаз $m_п$ возрастает на 0,3 зв. вел. (по нашим определениям 1937 г.), что увеличивает число метеоров на 44% на той же площади поля зрения. В первые минуты наблюдений следует остерегаться «летающих мушек» в глазу, имеющих физиологическое происхождение. Однако «псевдометеоры» могут быть вызваны и ошибкой наблюдателя (птицы и насекомые, освещенные снизу, огни самолета, трассирующие пули, ночные светящиеся насекомые и др.). За рубежом под видом метеоров не раз публиковались (например, в Astronomische Nachrichten) фотография бликов и иных псевдометеоров. При наблюдениях на экранах радиоустановок иногда за метеор можно принять рассеянное отражение от ионного облака или иную помеху. Бороться с влиянием помех личного свойства можно организацией наблюдений в стандартных условиях, строгим соблюдением режима наблюдателя (обязательный сон перед работой), исключением ошибок на основе предшествующего опыта и практики группой, состоящей из нескольких наблюдателей, а также проведением независимых наблюдений. При проведении радиолокационных наблюдений метеоров необходимо полное знание индивидуальных характеристик установки — диаграммы направленности излучения, частоты, мощности и др.

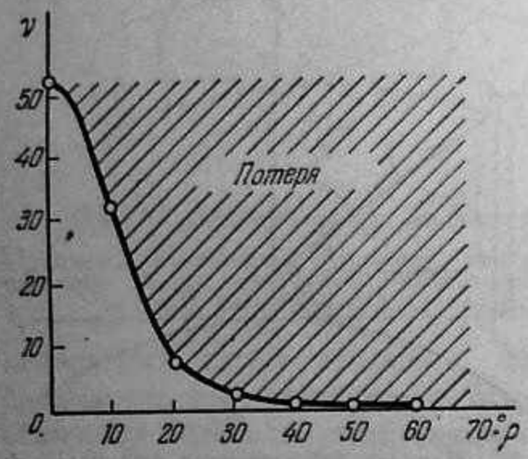


Рис. 37. Убывание числа метеоров на 1 *кв.* градус (v) с удалением их от точки фиксации (ρ). По наблюдениям 120 метеоров 3,0—3,9 зв. вел. (В. С. Астапович, Сталинабад, август 1933 г.).

ГЛАВА 6

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОВ

§ 62. О характере метеорных явлений. Мы наблюдаем метеорное тело в момент его разрушения в атмосфере при переходе его из одной формы, в которой оно существовало, возможно, в течение сотен миллионов лет, в иную форму существования — в метеорный газ и в метеорную пыль. За несколько десятых долей секунды мы должны успеть узнать все интересующее нас об этом теле и об условиях, возникших при его вторжении в земную атмосферу. Задача осложняется еще более тем, что ни о моменте полета, ни о месте появления метеора мы заранее не оповещены.

Дадим сначала общее описание явления метеора, каким оно представляется глазу, прежде чем рассматривать методы его изучения и подробности явления. Знакомство отдельного человека с метеорами очень напоминает исторический ход ознакомления с этим явлением человечества вообще. Сначала мы получаем впечатление «падающей звезды», но вскоре убеждаемся, что обычные звезды никуда не падают; затем мы замечаем, что метеоры могут весьма значительно различаться по видимой яркости, и начинаем их сравнивать с другими небесными светилами. Далее оказывается, что не слишком слабые метеоры различаются по цвету и кроме того, видимая (угловая) скорость их движения может быть разной.

Пронаблюдав и описав возможно тщательнее 500—1000 метеоров, исследователь начинает замечать многие другие детали, недоступные новичку. Он видит огромное разнообразие метеоров, непохожих один на другой так, как непохожи две снежинки друг на друга (рис. 38), ибо число возможных комбинаций основных характеристик метеоров много больше того числа метеоров, какое один человек может увидеть за десятки лет. Вместе с тем накопленный опыт позволяет делать обобщения: например, метеоры одного потока обладают «фамильным» сходством, благодаря чему их легко разыскать среди десятков других метеоров, что пока не в состоянии дать ни фотография, ни радиометод. Замечательные обобщения Хладни в конце XVIII в. были сделаны по данным наблюдений всего 100 с небольшим болидов. Изощренный глаз специалиста успевает заметить за краткие доли секунды не только основные характеристики, но и

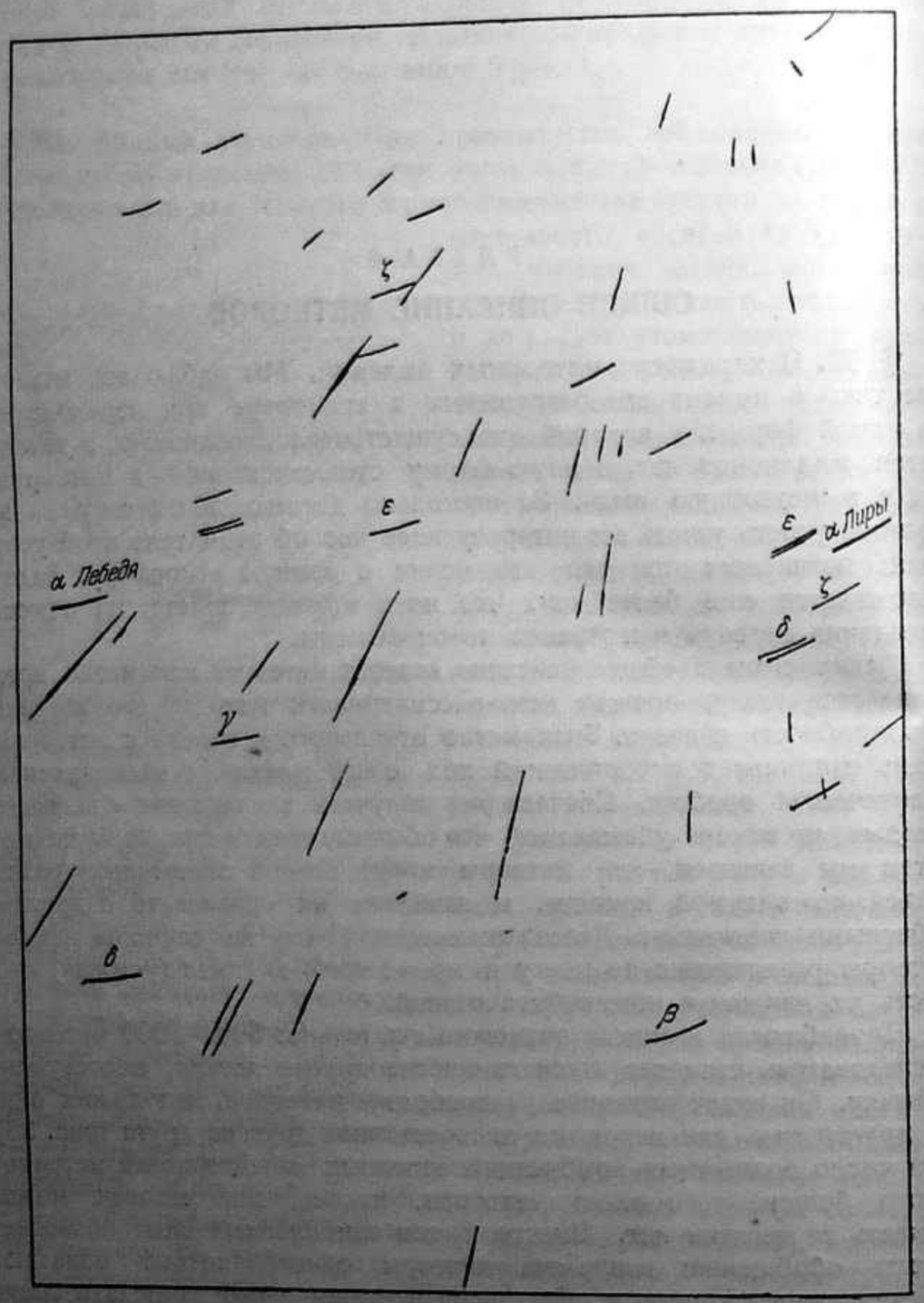


Рис. 38. Фотография 31 метеора потока Драконид из 42, полученных за 12 минут на одной пластинке во время дождя 9 октября 1946 г. (по К. Спэйну). Обратить внимание на отсутствие одинаковых метеоров.

изменения их в полете, на что также впервые было обращено внимание в нашей стране. Возможность регистрировать глазом подобные явления и детали часто подвергалась критике, однако эта критика была тем больше, чем меньше наблюдений метеоров производил сам критик. Инструментальные методы обычно вполне подтверждают данные аккуратных визуальных наблюдений. Мы еще далеко недостаточно знаем и используем возможности нашего глаза.

§ 63. Самые слабые метеоры. Эти метеоры мы можем видеть в телескоп. Они то пересекают мгновенно все поле зрения, то появляются едва заметной паутинкой на пределе видимости, то возникают в поле зрения как бы тончайшей иглой, постепенно расширяющейся, и затем угасают или так же постепенно, или сразу. Другие медленно проплывают, позволяя различить подробности — искры, хвост, ядро, голову, иногда остающийся туманный след. Наиболее слабые метеоры, видимые невооруженным глазом, можно заметить лишь прямым зрением; иногда прямым зрением благодаря движению можно заметить метеоры более слабые, чем предельно различимые звезды. При появлении они могут казаться слабой бесцветной звездочкой, проходят 2—3°, имея максимум яркости во второй половине пути. Только у более ярких красных метеоров можно заметить окраску. Слабые метеоры обычно медленные, следов не оставляют; их не видно уже при первых признаках зари или мглы. Реже заметны довольно быстрые слабые метеоры до 6—8° длины с максимумом яркости посередине пути. Это — метеоры, летящие горизонтально на большой высоте.

§ 64. Слабые метеоры. Метеоры 4—5 зв. вел. уже дают больше разнообразия. Так как каждому значению видимой яркости соответствует определенная длина пути (рис. 39), то, например, непропорционально короткие метеоры указывают на перспективное сокращение, следовательно, их радиант находится неподалеку (рис. 38). При полете эти метеоры оставляют в глазу зрительное впечатление примерно на 0,1 секунды, ведущее к появлению «оптического хвоста» у метеора, на самом деле не существующего, в чем можно убедиться, если следить глазом за метеором. Телескопические наблюдения в этих случаях показывают такой метеор в виде комочка, более

Рис. 39. Угловая длина λ метеоров в зависимости от их видимой звездной величины *m* и угловой скорости (по 1594 метеорам, И. С. Астапович, Николаев, 1925 г.).

яркого и резкого спереди. Метеоры 4—5 величины обычно не имеют неправильных или очень длинных ($>15°$) траекторий; следы обра-

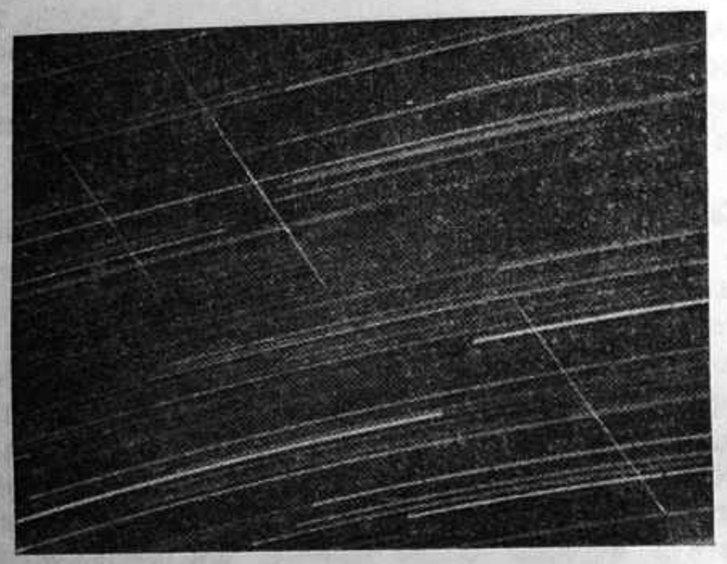


Рис. 40. Три метеора на одном кадре 11 августа 1953 г., принадлежащие одному потоку (Персеиды) (фото И. С. Астаповича, Ашхабад).

зуют только предельно быстрые метеоры (например, у Леонид при $v=72$ *км/сек* след может быть ярче самого метеора!). Обычно медленные, долго летящие метеоры, кроме «нормального» максимума близ середины пути, дают в конце пути вспышку, причем наступает резкое торможение. Это значит, что метеорная частица успела прогреться нацело и перешла в парообразное состояние. Если она сохраняется твердой до конца полета, конечной вспышки не происходит и метеор «сходит на нет» (рис. 40). Некоторые быстрые метеоры кажутся плохо очерченными вследствие производимой ими ионизации воздуха, недостаточной для появления более плотного метеорного следа. Изредка можно видеть предельно кратковременные ($\sim 0{,}05$ *сек*) метеоры в 1—2° длины. В действительности это отдельные вспышки более слабых и невидимых глазом телескопических метеоров. В одном случае на тысячу можно видеть туманные метеоры в несколько минут дуги поперечником; иногда подобные туманные шары распадаются на рой мельчайших метеоров. Хотя метеоры

Рис. 41. Метеор с тупым концом пути (июль 1953 г., фото ААЛ).

4—5 величины глазу представляются бесцветными, в телескопы они имеют хорошо насыщенные цвета. Общий процент метеоров 4 и 5 зв. вел. значителен (21 и 16% по наблюдениям 1594 метеоров в Николаеве 1925 г. [143], 22 и 14% по сводке зарубежных данных [156]). Заметить их можно боковым зрением внутри круга площадью соответственно 250 и 100 кв. градусов с центром в точке фиксации.

§ 65. Метеоры средней яркости. Метеоры 2—3 величины составляют 45% всех наблюдаемых. Здесь более отчетливо выступают их физические характеристики. Аномальные метеоры (двойные, криволинейные, со взрывами, хвостами и следами, дробящиеся, с искрами, ядром и оболочкой) встречаются в 1—2% случаев. Из-за значительной видимой яркости метеоры 2—3 величины видны боковым зрением за 20—30° на площади в тысячи кв. градусов и 5—6 человек могут заметить все метеоры этой группы на полусфере неба.

Угасание этих метеоров происходит либо постепенно [пологая траектория (рис. 40)], либо внезапно [крутое падение (рис. 41)], длина пути составляет в среднем 10°, продолжительность полета 0,3—0,5 сек., максимум яркости на 0,6—0,9 пути, считая от начала. Чаще других видны белые и желтые оттенки, у красных метеоров иногда заметны угловые поперечники (до 3—4′), что подтверждается телескопически; ядро не видно. Радионаблюдения указывают на ионизацию воздуха не только такими метеорами, но и в тысячи раз более слабыми. Замечено, что более медленным метеорам соответствует более красная окраска, более быстрым — более голубая. Но цвет также зависит от яркости, поэтому очень яркие медленные болиды редко бывают красными. Быстрые яркие метеоры оставляют газовые следы в результате ионизации воздуха; ядро у них видно, но неощутимо мало́ и окружено туманной оболочкой. Медленные красноватые метеоры всегда резко очерчены, имеют развевающиеся хвосты длиной до 1°, видимые также в бинокли и на фотографиях. Относительное число появлений метеоров 2 и 3 зв. вел. есть 42% по нашим и 49% по зарубежным данным [156]; соответственно метеоры 1 зв. вел. составляют 12 и 13%, а еще более яркие метеоры и болиды — 3 и 3%.

§ 66. Яркие метеоры. Метеоры 1 зв. вел. и ярче имеют подробности, выраженные еще отчетливее. Иногда тщательное описание одного такого метеора занимает две страницы журнала наблюдений. Цилиндрический след быстрого метеора кажется веретенообразным из-за максимума яркости посередине; это — действие иррадиации, сразу заметное при наблюдении следа в телескоп. Часто яркие метеоры дают несколько вспышек яркости, всегда во второй половине пути (рис. 42). В особо благоприятных случаях можно видеть, как яркий метеор летит в центре создаваемого им «фиолетового ореола», диаметром в несколько градусов, возникающего под действием ультрафиолетовой радиации метеора. Иногда у более медленных метеоров во второй

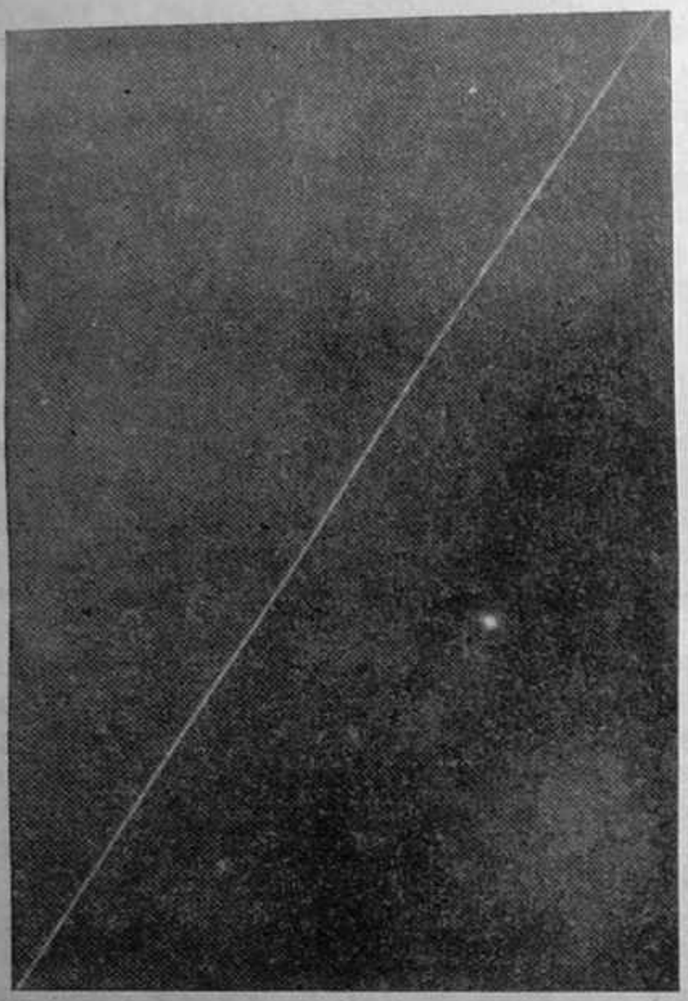


Рис. 43. Искривление траектории метеора (стеклянная библиотека Гарвардской обсерватории).

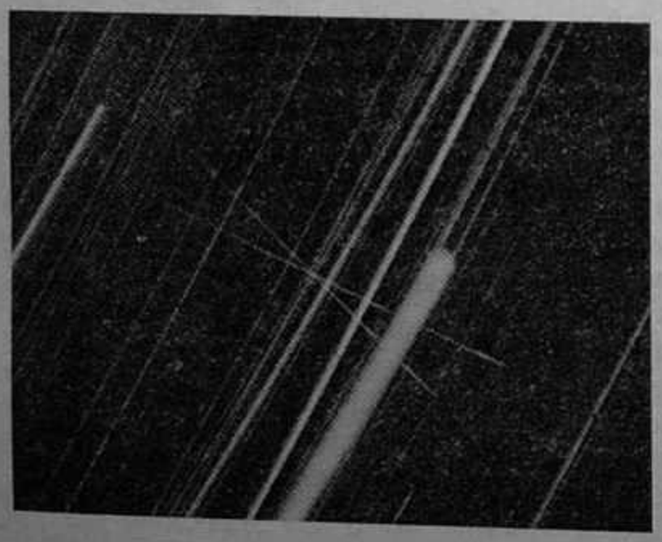


Рис. 42. Две пересекающиеся метеорные траектории (14 августа 1953 г., фото ААЛ). Максимум яркости метеоров лежит во второй половине пути.

половине пути видны искры, отлетающие назад или вбок, особенно при вспышках; медленные, долго летящие метеоры почти всегда к концу дробятся на части, обычно разных размеров, причем более крупные идут впереди. Обычно заметно торможение таких метеоров

Рис. 44. Метеор с длиной пути $\lambda = 50°$, совершенно прямолинейный (август 1953 г., не-персеид, фото ААЛ).

в последней трети пути, так что видимая (угловая) скорость уменьшается в 2—3 и более раза. У быстрых метеоров глазом этого заметить нельзя, как незаметно и искривление траектории, нередкое у медленных метеоров, особенно в конце полета (рис. 43). Видимая длина пути наклонно летящих медленных метеоров может превосходить 100° (рис. 44), а полет изредка длится 10—20 и даже более секунд, обычно же 1—2 секунды.

Изредка полет метеоров этой группы сопровождается одновременным звуком, свистящим или шелестящим (подобные «электрофонные» явления рассмотрены в гл. 28). С возрастанием видимой яркости увеличивается длительность полета (рис. 45).

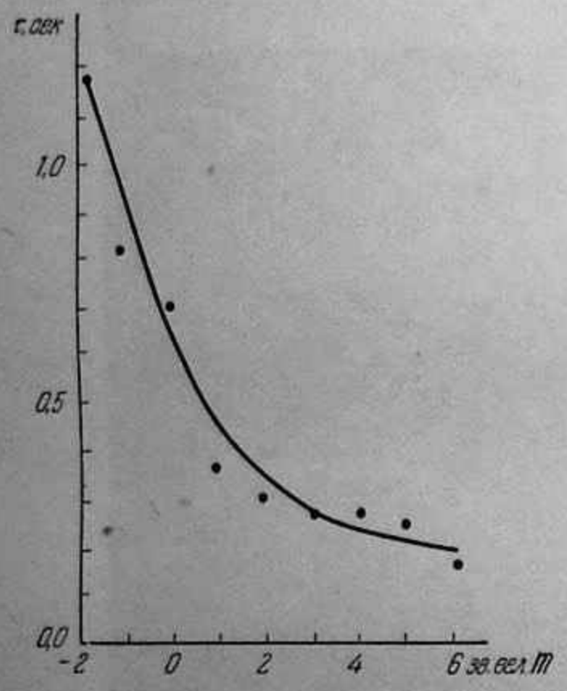


Рис. 45. Продолжительность полета (τ) обычных и ярких метеоров в зависимости от их яркости (по А. М. Бахареву).

§ 67. Болиды. Среди 37 000 наблюдений метеоров в архиве автора 87 болидов — 4 величины и ярче, хотя наиболее яркие (—12 и —14 вел.) пролетели вне программы наблюдений. Можно думать, что в жизни неспециалиста яркий болид будет отмечен лишь 1—2 раза. В силу крайней редкости этого явления нет возможности заранее запланировать наблюдения болидов и обычно специалисты вынуждены довольствоваться опросными данными случайных и неподготовленных очевидцев, если они желают составить хотя бы общее понятие о явлении. Сопоставление многих наблюдений позволяет выявить некоторые закономерности и исключать ошибки.

Полет болида начинается в виде обычного метеора; он быстро увеличивает яркость, часто освещая небо настолько, что перестают быть видимы не только звезды, но и в некоторых случаях даже полная Луна. Местность при этом озаряется светом, подобным дневному по яркости, проникающему внутрь помещений и порой затмевающему освещение искусственных источников света. В исключительных случаях полета сверхболидов днем, при Солнце, у предметов появляются «вторые тени». Свет болида — иногда мерцающий, «судорожный» из-за быстрых колебаний яркости. При небольших угловых размерах болида очертания теней от земных предметов резки; вследствие движения болида по небу тени быстро перемещаются по земле. В некоторых случаях поперечник болида доходит до 1—3°, хвост может иметь длину в десятки градусов.

Как правило, полет ярких болидов сопровождается *электрофонными* явлениями, причем треск, шуршание, свист кажутся исходящими из окружающих предметов, как при истечении статического электрического заряда. В некоторых случаях отмечено появление огней Эльма, отклонение магнитной стрелки, сильные помехи в радио-

приемнике (*метеоромагнитные*, *метеороэлектрические и радиометеорные* явления). После полета болида обычно виден след. Если явление происходило днем или в сумерки, или при Луне, то след из метеорных пылинок (*пылевой след*) виден часами. Звуковые волны от болидов обычно проявляются резким громовым ударом с последующими раскатами; подчас они так сильны, что могут вызвать сотрясение построек, выбить стекла, разрушить печные трубы, зимой сбросить снег с деревьев, образовать трещины на льду водоемов и рек. Полет болида может длиться около 10 сек., в среднем 6—8 сек.; излучаемая болидами энергия может быть так велика, что даже их лучистая теплота не раз ощущалась людьми (*метеоротермические* явления).

§ 68. О классификации метеоров. Можно ли уложить видимое разнообразие метеоров в какую-либо их единую классификацию? Основную роль играет масса, скорость и угол наклона траектории метеорного тела; его состав, плотность, форма и вращение имеют значение второстепенное. В первой попытке классификации 1933 г. [160] за основу бралось влияние угла наклона z_R на положение максимума яркости. Влияние z_R выражается через sec z_R, изменяющийся в пределах от 1 до ∞; пределы изменения масс — от Тунгусского метеорита ($40 \cdot 10^3$ тонн) до телеметеорной пылинки в 1 μ диаметром — отличаются на 22 порядка; пределы для скоростей от 2 до 72 *км/сек* *). Влияние коэффициента формы может меняться в 10 раз, плотности воздуха на протяжении 25 *км* высоты в атмосфере — тоже в 10 раз; крайние колебания известного состава метеоритов (железо — силикат) изменяют высоты на 20 *км*.

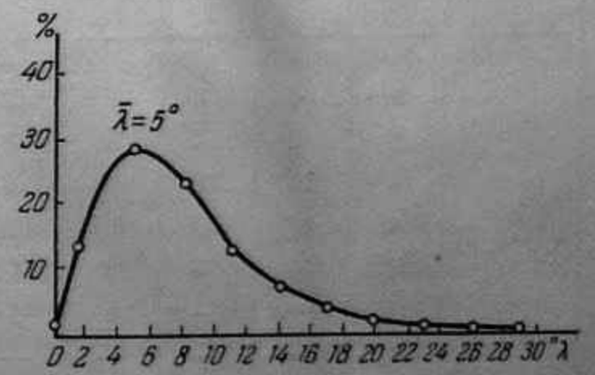


Рис. 46. Распределение 1594 метеоров по угловой длине (λ) (по наблюдениям И. С. Астаповича, Николаев). Мода распределения $\bar{\lambda} = 5°$, среднее арифметическое $\lambda_{ср} = 8°{,}3$. Метеоров с $\lambda > 25°$ менее 2,5%.

Таким образом, можно действительно в основу классификации положить массу M, скорость C и наклон H. Тогда качественно в этой системе $[MCH]$ наблюдающиеся свойства метеоров представятся данными табл. 3. Здесь основные характеристики метеора: звездная величина m, положение максимума яркости p, видимая длина пути λ (рис. 46), продолжительность полета τ, независимо от λ и τ угловая скорость i_ω по условной восьмибалльной шкале (0 — стационарный, 2 — медленный, 4 — средней скорости, 6 — быст-

*) При $v < 2$ *км/сек* свечение метеора не возникает.

Таблица 3

Классификация метеоров по массе *M*, скорости *C* и наклону *H* траектории

Скорость		Малая, 18 *км/сек*			Средняя, 36 *км/сек*			Большая, 72 *км/сек*		
масса	характеристика	Наклон траектории к плоскости горизонта								
		малый	средний	большой	малый	средний	большой	малый	средний	большой
Малая	m	8	7	6	6	5	5	4	4	3
	p	3	4	5	3	4	4	3	3	3
	λ	7	5	3	10	7	5	12	10	6
	τ	0,5	0,5	0,5	0,4	0,35	0,3	0,3	0,3	0,25
	i_ω	2	2	1	4	4	3,5	6	5	4,5
	c	(к)	(к)	к	(ж)	(ж)	(ж)	б	б	б
	$\tau_в$	—	—	—	—	—	—	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	T	ММЛ	ММС	ММБ	МСМ	МСС	МСБ	МБМ	М ,	МББ
Средняя	m	4	3	2	2	1	1	0	0	—1
	p	3	4	5	3	3—4	4	3 (и 5)	3 (и 5)	3 (и 5)
	λ	15	10	6	20	14	8	25	20	12
	τ	1,0	0,8	0,7	0,9	0,7	0,5	0,8	0,6	0,5
	i_ω	3	3	2	4	4	3,5	5	5	4,5
	c	о—к	о—к	о	б	б	б	б	б—г	б—г
	$\tau_в$	—	—	—	—	—	—	3	3	5
	T	СММ	СМС	СМБ	ССМ	ССС	ССБ	СБМ	СБС	СББ
Большая	m	0	—1	—2	—2	—3	—3	—4	—5	—5
	p	3—4	3—4	5	3—4	3—4	4	3	3 и 5	4 и 5
	λ	60	30	20	40	25	13	40	30	18
	τ	4	3	2,5	2,0	1,2	1,0	1,2	1,0	0,8
	i_ω	3	2	1	4	4	3	5,5	5	4
	c	ж—о	ж—о	ж	б—г	г	г	г	г (з)	г (з)
	$\tau_в$	—	—	—	1	1	1	15	18	20
	T	БММ	БМС	БМБ	БСМ	БСС	БСБ	ББМ	ББС	БББ

рый, 8 — предельно быстрый), его цвет c, продолжительность видимости следа $\tau_в$. Из геометрических элементов траектории и положения наблюдателя можно найти абсолютные значения силы света, длины пути, скорости. «Большой» массе примерно соответствуют, как дальше увидим, значения в десятки граммов, «средней» — десятые доли грамма, «малой» — миллиграммы; «большой» наклон охватывает $z_R = 0 - 30°$, «средний» 45—60°, «малый» 70—90°. Скорости приняты начальные, при вступлении метеора в атмосферу. Таким

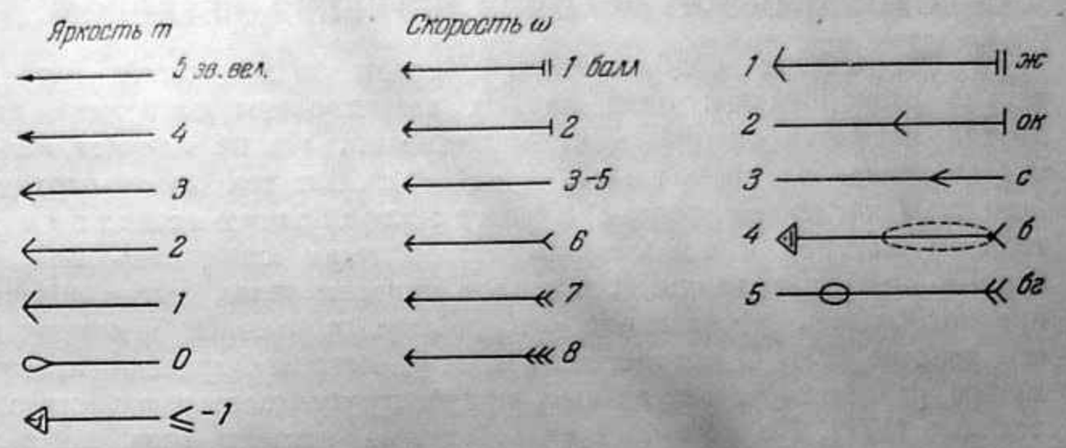


Рис. 47. Обозначение характерных свойств метеоров. Изображение стрелки ставится в точке максимума яркости. Положение следа обводится пунктиром, цвет указывается буквой.

1 — очень медленный метеор 1 вел., желтый, максимум яркости в конце ($p = 5/5$); *2* — медленный, 2 вел., оранжево-красный, $p = 3/5$; *3* — средней скорости, 3 вел., серый, $p = 3/5$; *4* — быстрый, — *1* вел., белый, $p = 5/5$ со следом; *5* — очень быстрый, 0 вел., бело-голубой, $p = 4/5$.

образом, каждый наблюдаемый метеор после редукции его характеристик к зениту может быть отнесен к одному из 27 типов метеоров по этой системе [*MCH*] и обозначен трехбуквенным индексом. Обратным входом можно в первом приближении найти элонгацию и наклон. Здесь положение p максимума яркости дано в пятых долях пути, τ и $\tau_в$ в секундах, цвет обозначен *к* — красный, *о* — оранжевый, *ж* — желтый, *б* — белый, *г* — голубой, *з* — зеленый; через T обозначен типовой индекс метеора. Эти характеристики метеора могут быть отмечены при нанесении метеора на карту (рис. 47).

ГЛАВА 7

ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ МЕТЕОРОВ

§ 69. Общие соображения. Методы исследования метеоров весьма разнообразны: одни из них заимствованы от других наук, другие являются специфически метеорными. Их объединяет объект исследования. Но говоря здесь о метеорах, мы тем самым ограничиваем себя изучением только процесса взаимодействия метеорной материи с атмосферой. Исторически сложилось так, что первым прибором изучения метеоров оказался глаз, затем возникли приспособления, уточняющие его работу, и наконец исключающие его участие [83]. В соответствии с этим методы изучения метеоров можно разделить на визуальные, полуинструментальные и инструментальные [171]. Но конечным судьей всегда остается глаз, даже при изучении записи прибора. Ни один из методов не может претендовать на универсальность, и наиболее ценные результаты были получены на основании их комплексного применения.

§ 70. Общая характеристика методов исследования. А. Визуальные методы используют глаз, как единственный прибор исследования [160]. В силу известных нам ошибок зрения (гл. 4) необходимо изучение свойств глаза и исключение ошибок наблюдения. В зависимости от поставленной цели техника наблюдений может сильно меняться (простой и квалифицированный счет метеоров, отметка их яркости и других физических свойств, определение кинематических характеристик, нанесение видимых траекторий на звездные карты) [174]; полученные данные позволяют оценить активность потока, его физические характеристики, найти скорости, радианты и элементы пространственной траектории метеоров в атмосфере, откуда затем вычислить орбиты [83]. Наблюдения могут быть односторонними, двухсторонними или многосторонними в зависимости от числа различных пунктов наблюдения. Наблюдения из одного пункта, проводящиеся несколькими наблюдателями, мы называем параллельными; они нужны для изучения ошибок наблюдений. Для всестороннего использования возможностей тренированного глаза в 1928 г. в СССР был предложен [160, 174] метод программы-максимум, описывающий по возможности все замеченные явления в процессе их развития. Кроме упомянутого выше, программа-максимум дает оценку торможения, линейные

размеры, азимут и величину скорости дрейфа метеорных следов, их высоты и яркости, наличие ореолов, ионизации, искр, дробления и других особенностей метеора. Добавочно для болидов отмечаются акустические явления и при падении метеоритов — *гиперсейсмы*, как *метеорная* (вызванная баллистической волной), так и *метеоритная* (при ударе метеорита о почву). Глаз также дает ряд указаний на явления, имевшие место при проникновении метеорита в почву или происходившие при движении его в воздухе, на основании исследования формы и поверхности упавших метеоритов [180].

В. Полуинструментальные методы основаны на использовании различных вспомогательных приспособлений при визуальных наблюдениях. Они имеют целью: 1) уточнить положение траектории на небесной сфере (широкоугольные бинокли [173], метеороскопы [181], метеорные жезлы [171]); 2) определить угловую скорость (качающееся, вращающееся многогранное [83] или вибрирующее [196] зеркало, дюриметр, стробоскоп, вибрирующий телескоп [194], обтюратор [189] *)); 3) подробнее рассмотреть явления в полете (бинокль, бинокулярная труба [190], кометоискатель [173, 176], телескоп [173]); 4) узнать характер спектра [188] метеора (спектроскоп прямого зрения, объективная призма) или его следа (окулярный спектроскоп); 5) найти силу света следа и закон ее падения (метеорный фотометр [183], радиоактивный фотометр [197], ураниловое стекло); 6) исследовать дрейф [186], турбуленцию и диффузию метеорных следов [184] (бинокль и др.). В итоге полуинструментальные методы повышают точность визуальных определений, иногда на порядок и выше [175].

С. Инструментальные методы можно подразделить на несколько групп:

1. *Фотографические методы* дают точные положения метеоров на сфере; односторонние наблюдения нескольких метеоров позволяют найти точный «групповой» радиант [199], наблюдения из разных пунктов (*базисные* [95]) — точные значения высот, длин, положения точек появления и угасания относительно земной поверхности, наклон и азимут атмосферной траектории, ее длину и «индивидуальный» радиант метеора [189, 199].

Велографические наблюдения имеют целью точное определение угловых скоростей (вибрирующая камера [194], велограф с обтюратором [189] или иным периодическим затвором). В комбинации с предыдущим они дают точные линейные скорости и торможения метеора, его доатмосферную скорость и орбиту.

---

*) Метеороскоп — прибор для отсчета координат начала и конца метеора прямо на небе; метеорный жезл — палочка, проектируемая на видимый путь метеора для его лучшего запоминания; дюриметр — прибор для определения продолжительности полета метеора с повышенной точностью; вибрирующий телескоп подвергается вибрации частотой до 30 *гц*, в результате чего метеор кажется в этот телескоп волнистым, и по числу волн определяют длительность метеора.

Обычные и телескопические метеоры и газовые следы, однако, еще слишком слабы для фотографии в настоящее время [177] *). Кроме того, фотография применяется для регистрации данных ряда других методов, перечисленных ниже.

Рис. 48. Фотоэлектрическая установка, регистрирующая метеоры до +3 вел. (по Мак-Кинли, 1953 г.).

2. *Спектрографический метод* позволяет с помощью объективной призмы или диффракционной решетки получать спектрограммы метеоров и их следов, и отсюда находить состав метеорных тел и в особых случаях — той среды, в которой они движутся [188]. По спектрограммам в частности можно судить о температурном режиме метеора.

*) Камерами «Супершмидт» в Уайт-Сэндс с 1951 г. удается получать лишь по одному следу в год. Медленные метеоры выходят до +4 зв. вел., искусственные спутники до +5 зв. вел.

3. *Колориметрический метод* имеет целью характеризовать числом цвет метеора. Используя внефокальные снимки метеора, можно применить метод продольного спектрографа; получая фотографии одного метеора с разными светофильтрами, можно найти показатель цвета; можно применять фотоэмульсии, очувствленные к разным лучам и с известной осторожностью — цветную фотографию. Эти методы пока еще применялись недостаточно [193].

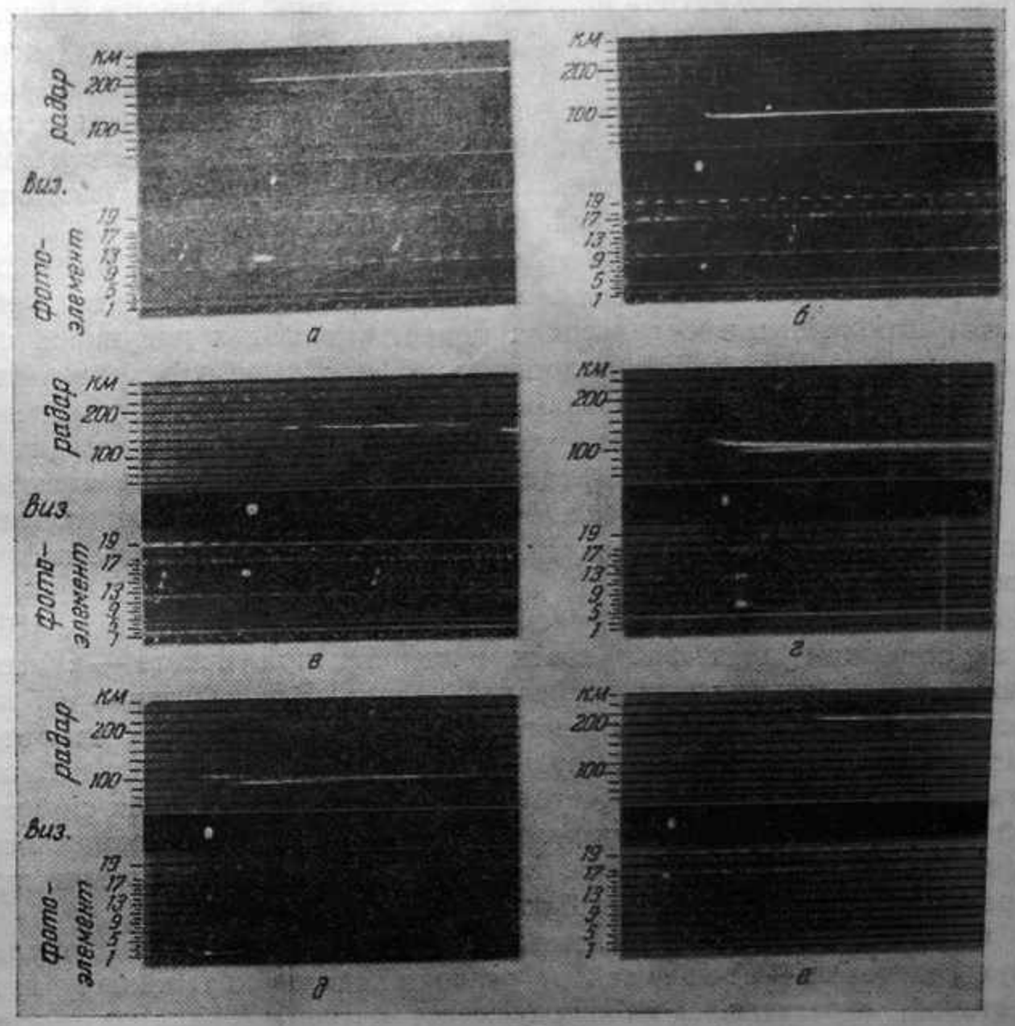


Рис. 49. Регистрация на фотопленке моментов пролета метеора радиолокатором, визуально и фотоэлементом. По оси абсцисс — время, по оси ординат для радара — расстояние, для фотоэлектрометра — номер фотоэлемента (по Мак-Кинли, 1953 г.).

4. *Фотоэлектрический метод* [191] основан на использовании (с 1945 г.) фотоэлемента с многократным электронным усилением — фотоумножителя (рис. 48) для регистрации момента полета метеоров; пока он пригоден для метеоров до +3 зв. вел. (рис. 49). Возможно

применение этого метода для управления фотокамерами [177] (открывая их лишь на момент полета метеора) и в соединении с катодным осциллографом — для изучения микропульсаций и взрывов метеоров. Применение метода только начато [(Мак-Кинли (США), Д. Л. Аставин-Разумин (Москва), Ю. Л. Трутце (Ашхабад)].

5. *Метеромагнитные методы*, на возможность применения которых было указано [163] более 20 лет назад, только что начали испытываться, открывая новую область изучения [171, 179]. Метод использует поток магнитной индукции, создаваемой метеором в полете и с помощью флюксметра регистрирует его. Это дает вектор мгновенного магнитного поля и в комбинации с другими вариационными магнитометрами может дать радиант метеора даже днем или в пасмурную погоду. Метеорные импульсы («пики») на магнитограммах вполне отчетливы. Необходима дальнейшая разработка методики, в последнее время подвергнутой сомнению (Гокинс).

6. *Метеороэлектрические методы* [163, 170, 171] принципиально имеют в виду использование безынертных установок для регистрации мгновенных электрических полей, вызванных индукцией при полете метеора [162, 172], подобно тому, как ныне это применяется для регистрации далеких грозовых разрядов. Вопрос о применении этого метода только ставится, хотя многие косвенные указания на скачок геоэлектрического потенциала при полете болидов имеются.

7. *Радиотелефонные методы* основываются на использовании высокочувствительной аппаратуры для выявления следующих электрических явлений при полете:

а) *Собственное радиоизлучение метеора*, обнаруживаемое [162] на акустическом диапазоне (треск и щелчки при полете — «метеорики») только на длинных и средних волнах. Эти излучения наблюдаются также на экране катодного осциллографа; имеются их фотографии. Электромагнитный импульс метеора также может воздействовать на приемную радиоаппаратуру (срыв настройки в схемах с обратной связью). Применение громкоговорителя обычно дает возможность слышать «метеорики» одновременно нескольким наблюдателям при параллельных комплексных наблюдениях.

б) *«Метеорный свист»*, создаваемый биением [90] при сложении двух радиоволн — прошедшей от радиостанции по кратчайшему пути и второй, отразившейся от движущегося метеора (*доплеров свист*). Радиостанция, например, вещательного диапазона, должна находиться близко и работать на коротких волнах. Запись свиста производится магнитофоном, имеются десятки тысяч подобных записей, производимых даже любителями [171]. Зная параметры, можно по частоте звука найти линейную скорость метеора.

в) Помимо «индивидуального» радиоэффекта наблюдается «массовый», произведенный совокупностью метеоров, например, во время метеорных дождей (рис. 50). Статистика радиотелефонной связи, наблюдения над силой поля приема удаленных станций и другие методы позволяют обнаружить метеорные фединги для одних волн и «всплески» слышимости на других в связи с возникновением спорадического слоя E из-за метеорной ионизации [198].

8. *Радиолокационные методы* [90] являются активными в отличие от пассивных методов предыдущего раздела. Как известно, посылая в определенном направлении радиоволну и принимая ее эхо обратно, радиолокатором определяется расстояние от отражающего тела. Простой радиолокатор в отсутствии параллельных «наружных» наблюдений дает статистику появлений метеоров в течение суток и года, их минимальную высоту, расстояние и продолжительность следа. Так как радиоволна (в пределах 2—10 *м*) отражается только при перпендикулярном падении на траекторию метеора, то из серии наблюдений можно приближенно найти радиант особо обильного потока. Важно использовать дифракционные явления,

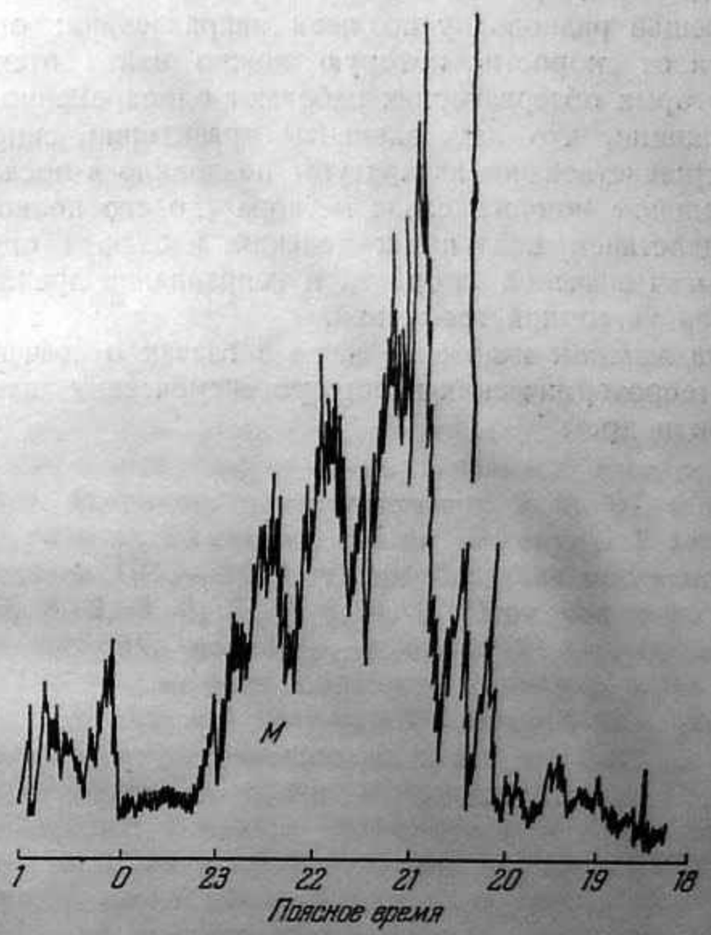


Рис. 50. Максимум числа замираний силы поля приема радиостанции Кенигсвустергаузен (между 22 и 23 часами II пояса) совпал с оптическим максимумом потока Драконид 9 октября 1933 г. (Слуцк, Геофизическая обсерватория).

возникающие при отражении радиоволны от движущегося метеора, являющегося как бы вытянутым ионным цилиндром; тогда на кратчайшем расстоянии сила поля приема отраженной радиоволны будет меняться пропорционально величине зон Френеля. Отсюда можно найти этим «амплитудным» методом точную скорость метеора. Иногда можно зафиксировать изменение расстояния до головы метеора, отражающей радиоволну по всем направлениям; оно меняется в зависимости от скорости, которую можно найти отсюда независимо. В некоторых обсерваториях работают одновременно три радиометеорные станции, что дает элементы траектории, скорость и радиант. Усовершенствование аппаратуры позволило в последнее время находить смещение ионного следа метеора (до его полной рекомбинации) под действием воздушных течений, и отсюда определять по несколько тысяч значений скорости и направления дрейфа за сутки, что важно для метеорной геофизики.

9. *Прочие методы* изложены ниже в главах о свечении и массе метеоров, метеоротермических и метеоросейсмических явлениях, о метеорной пыли и др.

ГЛАВА 8

ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

§ 71. Момент полета. Определение момента полета необходимо для фиксации явления во времени. В 1925 г. Н. П. Барабашев [207] в Харькове применял при этом хронограф; этот способ практичен, когда метеоров много (А. М. Бахарев в Сталинабаде, 1949 г.). Один секретарь при 4—6 наблюдателях за ночь может записать моменты 2000 метеоров (Ташкент, Персеиды, 1928 г.). Иногда при округлении последней цифры здесь возникает «десятичная ошибка предпочтения», например, показание часов 2 ч. 07 м. 19,5 с. мы охотнее округлим до 20 секунд, чем до 19 секунд. У автора по 4205 записям моментов 1943—1944 гг. преобладание последних цифр шло в порядке 0, 5, 2, 8, 3, 7, 1, 6, 4, 9. Этот ход цифр проявляется и в других случаях, например, в отсчетах меридианных кругов. После того как на это было обращено внимание, нами была повышена точность оценки, и в 1945 г. 1764 метеора дали распределение, отклоняющееся от теоретического не более чем на $1^0/_0$.

С какой же точностью нужно определять момент T? Это зависит от цели наблюдений: 1 минута времени соответствует повороту небесной сферы на $0^\circ,25$ и такая точность достаточна при визуальных наблюдениях. Во время обильных потоков требуется отметка T до секунды, особенно при появлении «пачек» метеоров. Здесь очень удобно применение магнитофона (З. Цеплеха). При фотографических работах T нужно с точностью до 1 секунды. При радиолокации метеоров иногда требуется точность до 0,0001 секунды.

§ 72. Определение положения метеора. Визуально определение пути метеора производится после полета метеора по памяти и его путь обычно заносится на звездную карту, освещаемую сверху или снизу (напросвет). В прошлом веке Ф. А. Бредихин сам вычерчивал карты для наблюдений (рис. 18), С. П. Глазенап издал карту для Леонид 1899 г. [214]. В. К. Цераский вычертил и опубликовал карту неба для Персеид [239]. Необходимы карты в центральной (гномонической) проекции, так как на них дуги больших кругов, а следовательно, и пути метеоров, изображаются прямыми линиями. Всякая фотография неба, полученная объективом без дисторсии, является

также центральной проекцией неба на фотопластинку. В 1895 г. Рорбах [244] издал звездный атлас в этой проекции, в 1915 г. Юнг [246] составил такой же атлас на 20 картах. В 1930 г. В. В. Федынский и Б. М. Машбиц [236] на основе сетки Цераского (проекция Гаусса—Ламберта) составили карты для Персеид, Орионид, Леонид и Лирид. Прекрасный атлас на 14 листах в гномонической проекции издал в Праге в 1940 г. В. Гут [242]. Атлас содержит 7796 звезд до 6,5 зв. вел. В 1950 г. в Москве Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом изданы четыре карты, составленные в Ашхабаде Е. М. Проскуриной [229, 231]; они охватывают 140° по прямому восхождению и 110° по центральному меридиану на основе сетки Лоренцони (рис. 51). Центральные части карт служат для нанесения метеоров, а краевые для вывода радиантов.

Однако, нанося метеор, мы прерываем наблюдение и нарушаем адаптацию, даже пользуясь красным фонарем. Поэтому целесообразно разделить процесс наблюдения и нанесения, записывая положение метеора и его характеристики в темноте (по специально разработанному коду) или диктуя на магнитофон, не прерывая наблюдения. По окончании наблюдения запись расшифровывается и переносится в журнал, а метеор наносится на карту в соответствии с описанием. Подобный способ применялся еще китайцами и позволил нам получить из их наблюдений радианты IX—XII вв. н. э. [339]. Отсчет времени производится по часам с крупным циферблатом с точностью до 1 минуты; кстати, расстояние, с которого видны стрелки, зависит от темноты ночи и, будучи выражено в сантиметрах, служит своего рода показателем ночной освещенности (в Ашхабаде в 1942—1945 гг. оно менялось в 3—5 и даже до 10 раз). Способ требует хорошего знания неба и обозначений около 500 опорных звезд (именно они даны на картах Проскуриной). При этом важно помнить, что *направление* определяется гораздо точнее, чем *положение* точек начала и конца пути, а для определения радианта важно именно направление. Наличие следов увеличивает точность до 0°,2.

§ 73. Ошибки положения. Величину этих ошибок можно определить из сравнения с фотографией либо лабораторным путем, либо из коллективных наблюдений (рис. 52). Они состоят (рис. 53) из ошибки *поворота* δ, ошибки *сноса* $\Delta\psi$ вдоль траектории и ошибки *смещения* $\Delta\vartheta$ перпендикулярно к ней. Совместное их действие дает *ошибки положения* ε_1 и ε_2 начала и конца пути. Из-за того, что один наблюдатель замечает метеор не в тот же момент, что другой, возникает «*ошибка неодновременности*». Из-за инерции зрения Δt ошибка сноса, например, конечной точки $\Delta\psi_2 = \omega_1 \Delta t$. Так, при $\Delta t = 0{,}12$ *сек* и угловой скорости $\omega = 20°$ *сек*$^{-1}$ имеем $\Delta\psi_2 = +2°{,}4$. Ошибки δ и $\Delta\vartheta$ не возникают при наблюдении прямым зрением или при переводе глаза в направлении полета метеора. Но если глаз, стремясь следить за метеором, «настигает» его сбоку,

Державна Пед. БІБЛІОТЕКА УРСР

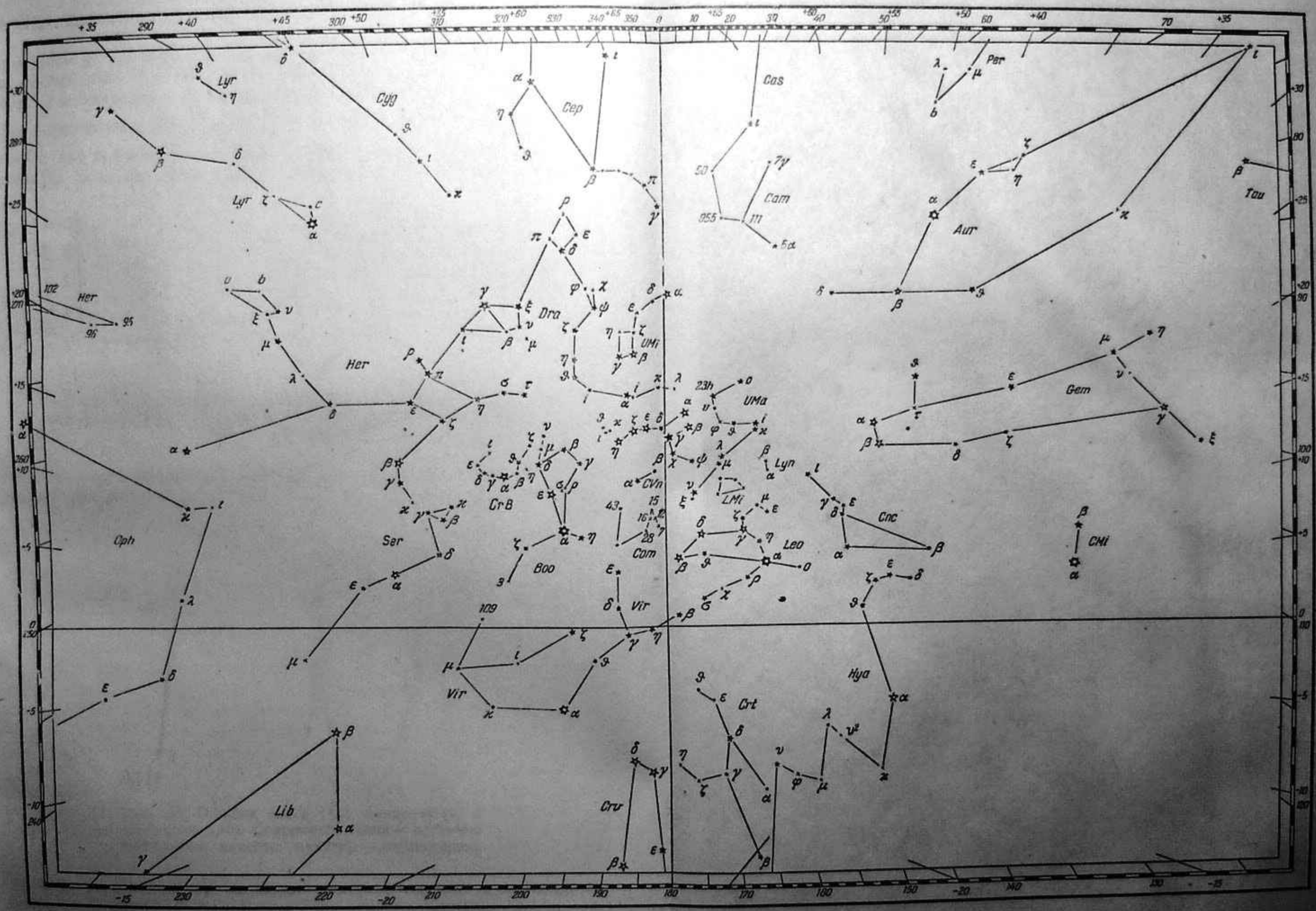


Рис. 51. Звездная карта Е. М. Проскуриной в гномонической проекции (издание ВАГО, 1950 г.).

Зак. 3211. И. С. Астапович

под углом χ, то всегда возникает своеобразное сложение угловых скоростей глаза Ω и метеора ω: последний при движении глаза кажется отклонившимся по направлению к глазу на угол δ, определяемый выражением $\operatorname{tg}\delta \approx \frac{\Omega}{\omega}\sin\chi$. При сильном боковом зрении Ω велико и для медленных метеоров δ может достигнуть десятков градусов (!). Если при этом метеор угасает до того, как его «настиг»

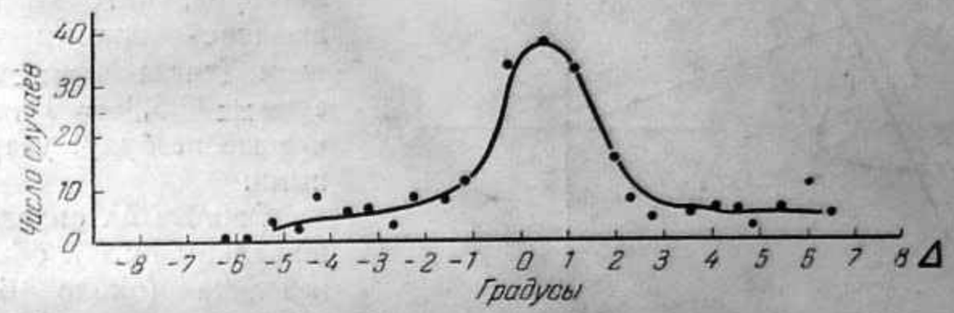


Рис. 52. Распределение отклонений положений одних и тех же метеоров, нанесенных разными наблюдателями (Персеиды 1926 г., по Б. М. Машбицу).

глаз, то наблюдатель зафиксирует это отклоненное направление и сильно ошибется. Если же глаз «настигнет» метеор и будет следить

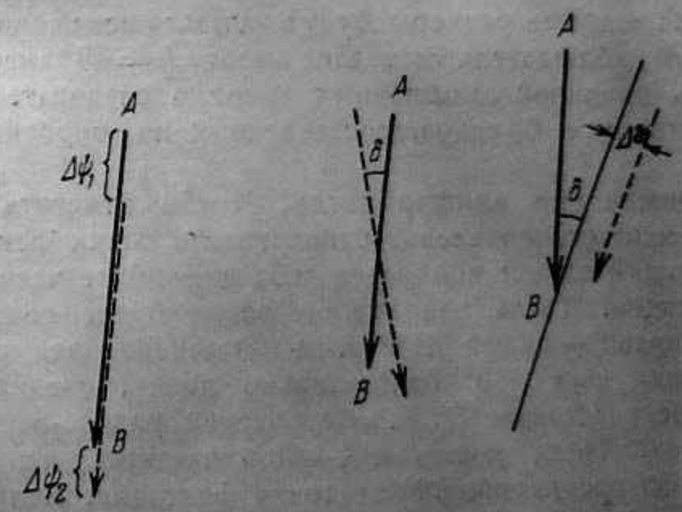


Рис. 53. Ошибки сноса ($\Delta\psi$), поворота (δ) и смещения ($\Delta\vartheta$). Сплошные линии — истинное положение метеора, пунктир — наблюденное.

за ним, то направление движения «выправится», но у наблюдателя в глазу сохранится впечатление, что метеор испытал налом или г-образное искривление траектории (рис. 54). Это явление поэтому нами названо *глаголизацией*. Начинающие наблюдатели из-за этого особенно часто описывают искривленные траектории. Глаголизация

особенно резко бросается в глаза при наблюдении метеоров со следами: по отношению к кажущемуся направлению полета след оказывается повернутым на угол δ. Ошибка $\Delta\vartheta$ смещает путь метеора параллельно навстречу движению глаза и при боковом зрении ($\rho = 70°$) доходит до 6°. Таким образом, наносить нужно пути только тех метеоров, которые наблюдались прямым зрением (тогда $\delta \approx \pm 0°{,}3$, $\varepsilon_2 \approx \pm 1°{,}5$, $\vartheta = 0°$), прочие же не будут уверенными.

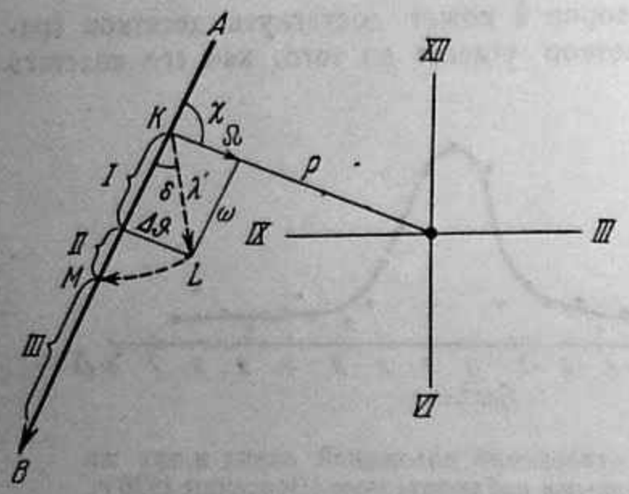


Рис. 54. Явление «глаголизации» метеора: видимый путь *AKLMB* вместо *AB*. *Ф* — точка фиксации.

Ошибка $\Delta\lambda$ определения длины пути λ обычно невелика (около 6%), если оценка λ производится относительно известных стандартных угловых расстояний между звездами. Если этого не соблюдать, то из-за сплюснутости небосвода (отчего небо в зените кажется ближе, чем у горизонта), все угловые размеры будут казаться искаженными; например, неопытный наблюдатель указывает высоту $h = 45°$ вместо 27—28°. Это оказалось причиной завышенных высот, а следовательно, и скоростей, в каталогах болидов, составленных по опросным данным.

§ 74. Применение «циферблата». Чтобы отметить положение метеора в момент его появления относительно точки фиксации, применим следующий прием: вообразим себе циферблат часов с центром в точке фиксации. Тогда направление вверх будет соответствовать цифре XII, вправо — цифре III и т. д. Очевидно, эти цифры дают углы положения через 30° относительно линии, соединяющей оба глаза. Угловое расстояние (т. е. сферический радиус-вектор ρ) оценим в градусах. Тогда запись «IX—60°» означает, что метеор появился слева на расстоянии 60° от точки фиксации. Если глаз начал следить за метеором, то запишем это в виде «IX—60° → 0°». Применение «циферблата» предупреждает о глаголизации, дает возможность учесть боковое зрение и т. п. При $\rho = 10°$, 20° и 30° угловая скорость перемещения глаза составляет 100°, 133° и 150° *сек*$^{-1}$ соответственно, далее асимптотически приближаясь к 180° *сек*$^{-1}$, поэтому, например, все метеоры продолжительностью $\tau < 0{,}25$ *сек* на расстоянии $\rho > 20°$ будут видны только боковым зрением, т. е. глаголизованными. При $\rho = 60°$ метеор можно увидеть прямым зрением (переведя взгляд) только, если его $\tau > 0{,}5$ *сек*.

§ 75. Определение продолжительности полета. Определение τ требует особой тренировки наблюдателя в выработке «чувства секунды». В 1930 г. было найдено, что оценка τ' продолжительности и истинное ее значение τ связаны зависимостью $\tau = K\tau' + c$, причем K и c определяются опытом. В течение десятилетий K и c меняются мало, но систематически (например, у автора в 1932, 1940 и 1947 гг. было $k = 1{,}15$, 1,00 и 0,93 и соответственно $c = +0{,}025$, 0,00 и 0,020 *сек*). При лабораторном испытании удобно применение электронного реле времени, легко дающего вспышки неоновой лампочки заданной длительности. В интервале 0—1 *сек* случайная ошибка $\Delta\tau = \pm 0{,}04$ *сек* или 7% от среднего $\tau = 0{,}42$ *сек*. Тот же результат дало автору в 1943 г. наблюдение блестящих велосипедных шариков на фоне звездного неба, имитировавших метеоры с заданным τ, и применение в 1944 г. вращающегося с известной скоростью 12-гранного зеркала. Значения τ в $\frac{1}{4}$ и $\frac{1}{5}$ секунды заметно различны, т. е. уловима разница в 0,05 секунды. Из наблюдений неопытного лица τ лучше всего определяется продолжительностью воспроизводимого этим лицом действия, равного по длительности времени полета метеора.

§ 76. Определение угловой скорости. Угловую скорость можно найти по формуле $\omega_1 = \frac{\lambda}{\tau}$ и независимо, используя балл l_ω условной шкалы угловых скоростей, например 8-балльной (рис. 55), упомянутой выше. Еще в 1928 г. автор обнаружил, что l_ω пропорционально $\lg\omega$, т. е. в восприятии угловой скорости соблюдается основной психофизиологический закон. Ранее это было известно в астрономии для восприятия яркости (шкала Погсона) и в акустике для звука (шкала децибелов). В нашем случае оказывается, что $\omega_2 = a \cdot 10^{bl_\omega}$, где a и b находятся опытом. При помощи описанного 12-гранного зеркала в 1944 г. автор нашел лабораторным путем $a = 3{,}89$, $b = 0{,}173$, затем Е. М. Проскурина из наблюдений метеоров 1943 г. по λ, τ и l_ω получила $a = 4{,}01$, $b = 0{,}173$.

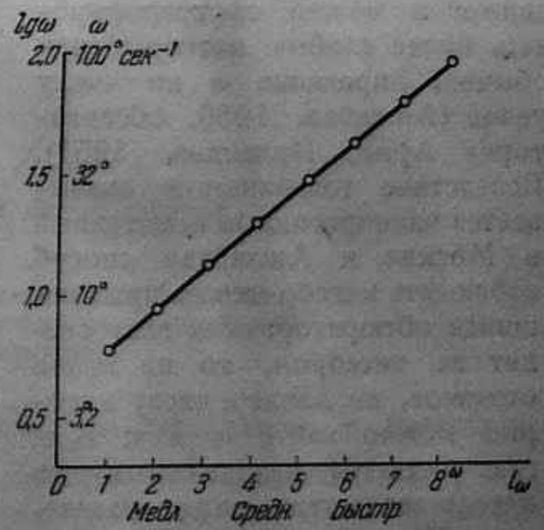


Рис. 55. Зависимость логарифма угловой скорости ω от балла l_ω условной шкалы угловых скоростей, предложенной автором (1942—1945 гг.).

Визуальные способы нахождения ω_1 и ω_2 требуют большой тренировки. Еще в 1898 г. В. К. Цераский предложил полуинстру-

ментальный метод, сравнивая угловую скорость полета метеора с угловой скоростью качающейся электролампочки. Наблюдение метеоров ведется через стекло, в котором лампочка отражается. Наблюдения Персеид этим способом производили Модестов и Казаков. Можно далее, по предложению Пиккеринга, наблюдать метеоры в вибрирующем зеркале; путь метеора тогда представляется псевдоциклоидой (рис. 56), число петель которой зависит от τ, а форма от ω. На практике способ применялся в 1932—1933 гг. в Аризонской экспедиции и затем в Тарту. Наблюдая отражения в телескоп, можно находить скорости ω телескопических метеоров. Однако глаз, заметив метеор, начинает следить за ним и в силу глаголизации искажается форма кривой, поэтому успешных результатов этим методом пока не получено.

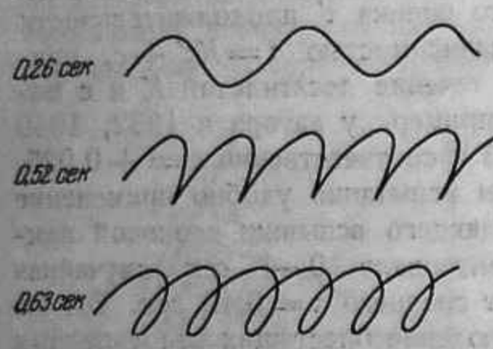


Рис. 56. Псевдоциклоидальные траектории метеоров, видимые в вибрирующем зеркале.

Можно применить вибрирующую камеру (рис. 57); тогда в узлах петель метеор почти неподвижен и можно сфотографировать более слабые метеоры, чем обычно, определив ω по числу узлов (Ашхабад, 1950, обсерватория Арма, Ирландия, 1951). Вследствие глаголизации оказывается малопригодным испытанный в Москве и Ашхабаде способ наблюдать метеор сквозь вращающийся обтюратор: если глаз следит за метеором, то не видно отрезков, по длине и числу которых можно найти ω и τ; если глаз остается неподвижным, то метеор не всегда можно разглядеть. Поэтому способ обтюратора пригоден только для фотографии. В 1947 г. в Ашхабаде была сконструирована установка из блестящих шариков, вращающихся на мачте на темной штанге с набором заданных наперед угловых скоростей ω. В проекции на звездное небо они обеспечивали стандарт ω (рис. 58), полезный для тренировки и для начинающих наблюдателей.

Рис. 57. Метеор 15 августа 1950 г. На фотографии, полученной с вибрирующей камерой (Ашхабад).

Ошибка ω_1 определяется ошибками λ и τ; наибольшая относительная ошибка $\frac{\Delta\omega_1}{\omega_1} = 7\% + 6\% = 13\%$; из лабораторных опытов с вращающимся зеркалом у нас оказалось в 1944 г. $\frac{\Delta\omega_1}{\omega_1} = 14\%$. Ошибка ω_2 может быть найдена из выражения

$$\Delta\omega_2 = ab \cdot 10^{bi\omega} \ln 10 \cdot \Delta i_\omega$$

или

$$\frac{\Delta\omega_2}{\omega_2} = b \ln 10 \cdot \Delta i_\omega.$$

Даже при точности определения $\Delta i_\omega = \pm 0{,}49$ балла относительная ошибка $\frac{\Delta\omega_2}{\omega_2} = 19{,}6\%$. Таким образом, для одного метеора

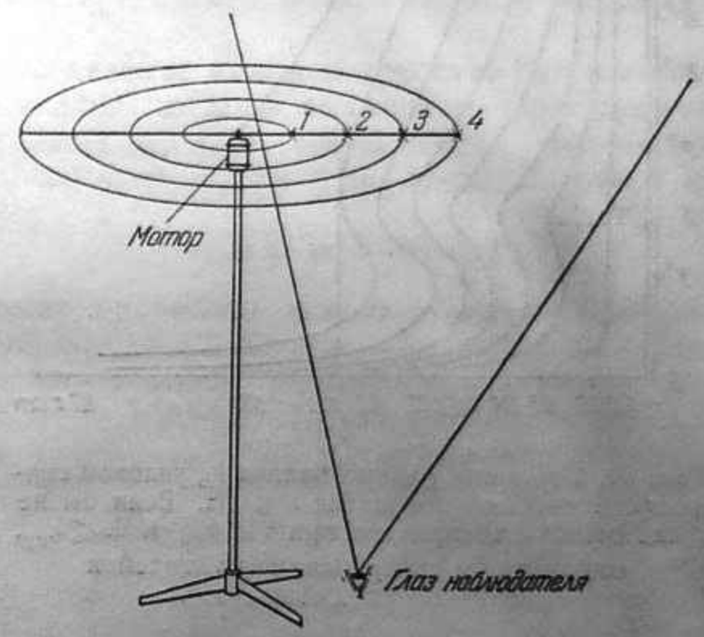


Рис. 58. Ашхабадская установка 1947 г., проектирующая на звездное небо стандарты (*1—4*) угловых скоростей.

обоими методами одновременно точность определения ω составит около 10%, а для потока по n метеорам ω определится в $\sqrt{n}$ раз точнее. Независимо Е. М. Проскурина находит для потока $\Delta i_\omega = \pm 0{,}3$ балла, что при линейной скорости $v = 30$ *км/сек* дает ошибку $\Delta v = \pm 2{,}7$ *км/сек* по нескольким метеорам. По наблюдениям 1942—1945 гг. в Ашхабаде этим путем были определены скорости нескольких сотен потоков [350], ныне подтвержденные радиометодами и фотографией.

Критические λ и τ. Сравнивая ω_1 и ω_2 для одних и тех же метеоров, мы обнаруживаем, что всегда существуют такие пределы $\lambda_{кр}$

и $\tau_{кр}$, ниже которых ω_1 непомерно увеличивается, т. е. из двух метеоров с одинаковой ω очень короткий или кратковременный будет казаться более быстрым (рис. 59). Такие значения $\lambda_{кр}$ и $\tau_{кр}$ назовем критическими (1947 г.). Например, баллам 2, 4 и 6 соответствует угловая скорость $\omega = 9°{,}6$, $20°{,}5$ и $44°$ *сек*$^{-1}$, $\tau_{кр} = 0{,}50$, $0{,}35$

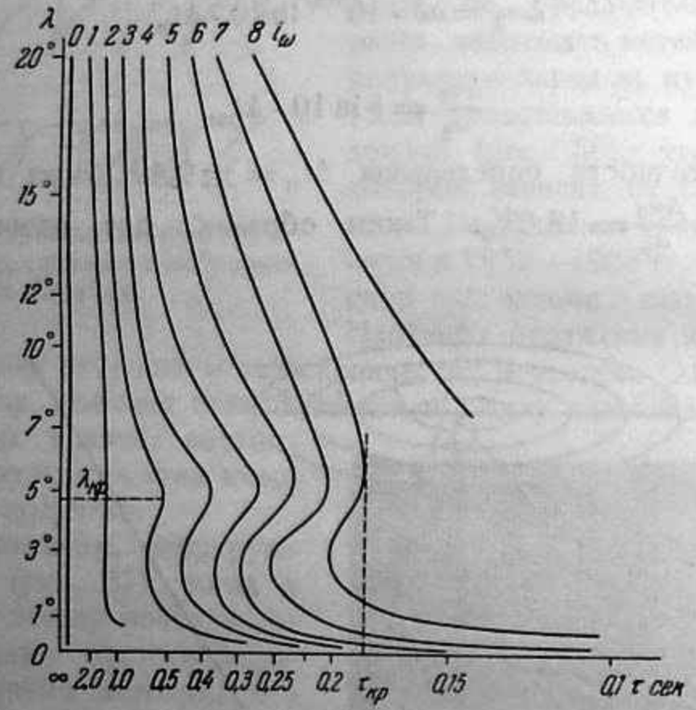


Рис. 59. Изолинии равных баллов i_ω угловой скорости в системе координат λ и $1/\tau$. Если бы не было ошибки восприятия при $\tau \leqslant \tau_{кр}$ и $\lambda \leqslant \lambda_{кр}$, они были бы гиперболами (наблюдения 1942—1945 гг., Ашхабад).

и 0,23 *сек* и $\lambda_{кр} = 4°{,}5$, $7°{,}0$ и $10°{,}0$. Произведение $\tau_{кр}\lambda_{кр}$ почти постоянно и равно 2,3 *град · сек*, что оказывается следствием закона Бунзена—Роско [для кратковременных освещенностей E, близких к пороговым E_0, значение $(E - E_0) \cdot \tau = \text{const}$]. Таким образом, при малых τ и коротких λ количество действующего на глаз света оказывается пропорциональным длине пути, и в этих условиях закон применим. Внося соответствующие поправки, можно найти правильные ω_1 даже из наблюдений в «критической области».

§ 77. Определение углового торможения γ. Пусть $\gamma = \frac{\Delta\omega}{\Delta\tau}$. Только у 4% метеоров глаз замечает, что $\Delta\omega \neq 0$, так что начальная ω_0 и конечная ω_k угловые скорости дают $\frac{\omega_k}{\omega_0} = k < 1$. Определим из наблюдений длину λ_k того конечного участка пути, где торможение стало заметным. Тогда неискаженная угловая скорость

$$\omega_0 = \frac{(\lambda - \lambda_k)\,k + \lambda_k}{k\tau} = \frac{\lambda}{\tau} + \frac{\lambda_k}{\tau}\left(\frac{1}{k} - 1\right) = \omega + \frac{\lambda_k}{\tau}\left(\frac{1}{k} - 1\right),$$

причем k оценивается с точностью до 0,1 из наблюдений. Обычно $k = 1$ (торможение незаметно); у 692 метеоров из 17000 (Ашхабад, 1942—1945 гг.) $k < 1$, но редко $k < 0{,}5$. Заметим, что линейное торможение j связано с угловым торможением γ соотношением $j : v = \gamma : \omega$, откуда и может быть найдено. В 1946 г. таким путем в Ашхабаде впервые из визуальных наблюдений найдено j порядка 100 *км/сек*^{2}, что только недавно подтвердила фотография. Независимо можно найти γ, оценивая балл i_ω в начале и конце полета, что записывается, например, в такой форме: $5^\omega \rightarrow 3{,}5^\omega\,(4°)$, где $4° = \lambda_k$.

§ 78. Определение видимой яркости. Как известно, в звездной астрономии видимая звездная величина m характеризует так называемый *блеск* звезд E, т. е. освещенность, создаваемую звездой на плоскости, перпендикулярной к ее лучам. Величины m и E связаны соотношением

$$m = m_0 - 2{,}5 \lg E,$$

где m_0 зависит от выбора единиц измерения E (если E измеряется в люксах, то $m_0 = -14{,}18$).

Понятие блеска иногда распространяется и на протяженные светящиеся объекты (Солнце, Луну, планеты, кометы). В метеорной астрономии, однако, введение этого термина приведет к неудобству, так как блеском определяется явление блескости некоторых метеоров. Мы будем подразумевать под видимой звездной величиной метеора m характеристику мгновенной освещенности, создаваемой метеором на плоскости, перпендикулярной к лучу зрения. Величину E_m, связанную с соотношением, вытекающим из предыдущего,

$$\lg E_m = 0{,}4\,(m - m_0),$$

будем называть *мгновенной* или *видимой яркостью* метеора, а в тех случаях, когда это не может вызвать недоразумений, — просто яркостью, мерой которой является видимая звездная величина m. Это — одна из наиболее точно определяемых характеристик метеора. При определении m в качестве стандартов берутся звездные величины известных звезд, находящихся на той же высоте над горизонтом. Систематические ошибки опытных наблюдателей для одного метеора составляют $0^m{,}0$—$0^m{,}2$, случайные редко выше $0^m{,}5$. Во многих случаях достаточно оценивать m до 0,5 зв. вел. Так как m определяется мгновенной освещенностью на зрачке наблюдателя, создаваемой метеором переменной яркости, то для определенности условимся давать m для момента максимума яркости. Ошибки

определения m находятся из коллективных наблюдений или лабораторных опытов (К. П. Станюкович, В. А. Бронштэн [210], А. М. Лозинская [322], 1930—1934 гг., З. Цеплеха, 1957—1958 гг.).

§ 79. Определение цвета. Ввиду трудности надежного определения цвета В. В. Федынский [237] составил каталог звезд-стандартов для этой цели. Цвет c оценивается по шкале Остгоффа (голубой -1^c, белый 0^c, желто-белый 2^c, желтый 4^c, оранжевый 7^c и т. д.); эта шкала хорошо градуирована относительно температуры и спектрального типа звезд. В 1933 г. В. А. Бронштэн [210] показал, что применение стандартов цвета уменьшает ошибку: систематическую до $0^c,6$, случайную до $\pm 1^c$. Цвет можно оценивать только у метеоров не слабее 3 величины. Б. М. Машбиц [238] в 1929 г. обнаружил «ошибку предпочтения», состоящую в том, что одна какая-либо оценка чаще прочих применяется при записи плохо наблюденных метеоров. В 1930 г. В. В. Федынский [237] нашел зависимость оценки c от яркости, что соответствует физиологии зрения. Если l, q и r — параметры, находимые опытом, то кажущийся цвет c' связан с истинным формулой Федынского: $c = lc' + qm + r$. Встречаются метеоры, более голубые, чем самые горячие звезды и более густо-красные, чем соответствующие баллу 7^c. Вне шкалы особняком стоят «окрашенные» метеоры (зеленые, фиолетовые, розовые, пурпурные, багровые), но число их ничтожно. Лабораторные исследования ошибок c метеоров нам неизвестны. Часто c изменяется в полете, особенно при взрывах, и учет этого обычно устраняет видимые противоречия наблюдений, в частности болидов.

§ 80. Общие выводы. Визуальные наблюдения метеоров относятся к числу самых трудных наблюдений в астрономии: внимание неподвижного наблюдателя напряжено часами, чтобы затем «сработать» менее чем за секунду; утраченное наблюдение неповторимо; необходима длительная тренировка, притом постоянная, во избежание деквалификации. Однако визуальные наблюдения необходимы, особенно при комплексных инструментальных наблюдениях.

Известно, что в астрометрии существует два способа составления каталогов звезд: один дает обзор огромного числа их по необходимости с меньшей точностью, другой дает предельно точные положения ограниченного числа звезд. До некоторой степени этому подобно соотношение визуальной и инструментальной методики метеорных исследований. Многие важные наблюдения, кроме того, могут быть сделаны только глазом, а в иных случаях применение техники нецелесообразно.

§ 81. Организация наблюдений. Научным наблюдениям должен предшествовать некоторый период тренировки наблюдателя; далее

лабораторным или коллективным методом наблюдатель должен исследовать свои ошибки наблюдений («паспортизация» наблюдателя). Пункты наблюдений должны выбираться с учетом условий, описанных в гл. 5. При базисных наблюдениях необходима телефонная или радиосвязь между обоими пунктами (очень удобна радиостанция типа «Урожай»). При проведении комплексных наблюдений «наружные» наблюдатели должны иметь возможность посылать сигналы о замеченных метеорах для регистрации их на фотозаписывающих автоматах. Наблюдая зенитную область, наблюдатель располагается горизонтально, имея под рукой часы, красный фонарь, бинокль, наушники на голове и «метеорный жезл», проектируемый на видимый путь метеора для его лучшей фиксации. Метеорный фотометр для следов, телефон и готовый к съемке метеорный спектрограф для ярких следов располагаются поблизости. Запись ведется стенографически или диктуется на магнитофон. Наблюдения свыше четырех часов утомительны. Если наблюдателей несколько или наблюдается много метеоров, желательно участие помощника — секретаря.

§ 82. Журнал наблюдений. Примерная запись визуальных наблюдений имеет следующий вид: «1953 март 11/12 ср./чт. 20. 45—1. 45 (22. 40—45) Л. Г. Е. (5 → 4) Кеши ААЛ *о*0 *м*4 *п*5 *тн* $4\frac{1}{2}$ МХ — 6 240 (V) — 11 *сек.* + 12° Ц» (выходные сведения). Запись метеора имеет вид: «24 22.47 X — 45° → 0° (7°) ‖ $\alpha\gamma$ Ori $2^\circ N$ $0^m,5\,\frac{4}{5}$ 13° $0^s,9$, $3^\omega,2$ 4^c *о*5 п5 *s*6° $1\frac{1}{2}$ *п*1». Первая запись в заглавии журнала указывает дату ночи, день недели (среда — четверг), интервал наблюдения (в скобках — перерывы), инициалы наблюдателя (в скобках его состояние по пятибалльной шкале), место наблюдения, далее состояние неба: облачность *о*, мерцание *м*, прозрачность *п*, темнота неба *тн*, затем указывается марка хронометра, его номер, время, по которому он поставлен (часовой пояс) и его поправка, наружная температура. Стенограмма метеора означает: «Метеор № 24 в 22 ч. 47 м. был замечен боковым зрением в левом верхнем углу поля зрения в 45° от точки фиксации. Переведя на него глаз, наблюдатель следил за ним на протяжении 7°. Метеор пролетел параллельно звездам α и γ Ориона на 2° севернее. Он был 0,5 зв. величины, с максимумом яркости на 4/5 пути, имел длину 13°. Продолжительность полета составила 0,9 секунды, балл угловой скорости 3,2 (довольно медленный); желтый, резко очерченный, звездообразный. Далее идут сведения о следе *s*: длина 6°, видимость полторы секунды (запись простой, а не десятичной дробью), плотность следа *п* — балл 1 (крайне малая).

Первичная обработка наблюдений заключается в переписке расшифрованной записи в общий журнал и нанесении

метеоров на карту, что позволяет одним взглядом на нее определить состояние метеорной активности и ее характер за данную ночь. В определенной системе условных обозначений (рис. 47) физические и кинематические свойства метеоров изображаются на стрелке, отмечающей положение метеора. При выводе радиантов и высот из базисных наблюдений траектории метеоров лучше всего наносить на звездный глобус, где легко находятся параллакс и вспомогательные углы.

§ 83. Телескопические наблюдения метеоров. Применение телескопа при визуальном изучении метеоров имеет целью: 1) собрать большее количество света, чтобы увидеть более слабые метеоры; 2) получить их увеличенные угловые размеры, чтобы различить детали; 3) повысить точность нанесения. Этого можно достигнуть применением линзы или зеркала или их комбинации. При этом мы встречаемся с некоторыми вопросами оптики, которые следует иметь в виду при наблюдениях метеоров в телескоп. Прежде всего *дифракция* света от краев объектива вместо изображения звезды приводит к образованию дифракционного *диска Рэлея* с угловым радиусом $r = 1{,}2197\,\frac{\lambda}{D}$, где λ — длина волны света, а D — абсолютное отверстие объектива. Например, для глаза $\lambda = 0{,}56\ \mu$; для $D = 30$ *мм* (бинокль), 70 *мм* (бинокуляр) и 200 *мм* (телескоп) соответственно имеем $r = 4''{,}6$, $2''{,}0$ и $0''{,}7$. Это значит, что детали, меньшие данного r, видеть в соответствующий инструмент уже нельзя. Кружок Рэлея, содержащий $83{,}8\%$ всего света звезды, окружен дифракционными кольцами; первое содержит $7{,}2\%$, второе $2{,}8\%$ света и т. д.

Если вместо точки — звезды рассматривать метеор, кажущийся тонкой линией, то ее дифракционное изображение состоит из основного изображения с параллельными линиями-спутниками на расстоянии по обе стороны от оси на $1{,}22\,r$, $2{,}08\,r$ и т. д. Их яркости равны сооответственно 4,4, $1{,}5\%$ и т. д. яркости основной полосы. Если метеор представляет собой полосу конечной ширины, то дифракция размоет ее границу: например, при ширине $\frac{1}{2}r$ и r яркость посередине полосы снизится до 48 и 77%, а по краям *) — до 36 и 45% ее действительной яркости (при отсутствии дифракции). Следовательно, применяя окуляр достаточной силы, можно по изображению метеора узнать, является ли метеор физической точкой, линией или площадкой. Если же метеор имеет диск радиуса ρ, то при $\rho = \frac{1}{2}r$, r, $2r$ и $3r$ яркость его в центре составит 59, 84, 91 и 94% действительной яркости диска. В метеорной астрономии известно явление о ф ф у с к а ц и и — якобы прохождения темных тел по дискам Солнца и Луны. Тогда в центре темных дисков яркость

*) Имеются в виду действительные края полосы (не расширенные дифракцией).

относительно фона будет равна дополнению до 100% значений, приведенных выше. Поскольку контраст ниже $1{,}5\%$ неразличим, то при ρ менее $0{,}064\,r$ яркость в центре диска будет менее $1{,}5\%$ и потому минимальный радиус темного диска на светлом фоне есть $\rho = 9''{,}0/D$.

Следующим важным фактором является *разрешающая способность*. Пусть мы имеем два точечных метеора равной видимой яркости. Их можно увидеть раздельно лишь тогда, когда промежуток p'' между ними темнее их рэлеевых дисков не менее, чем на порог контрастности K. При $K = 1{,}5$ и 5% получаем $p'' = 114''/D$ и $p'' = 120''/D$.

В каталогах взаимные расстояния двойных телеметеоров действительно не ниже этих p''. Если метеоры разной яркости, то условия разрешаемости ухудшаются и p'' возрастает, например, при разнице в 1 и 2 зв. величины в 1,23 и 1,31 раза (контраст $1{,}5\%$). Если же метеоры не точки, а полоски, то практически разрешающая сила $1 : p''$ остается такой же.

Важную роль играет зрачок выхода $d = D/x$, где x — увеличение телескопа. Два разных прибора с одинаковыми d дадут одинаковые дифракционные изображения, угловые поперечники дисков Рэлея, темноту фона неба. Чтобы все лучи, собранные объективом, попали в глаз, необходимо выполнение условия $d \leqslant h$, где h — диаметр зрачка ночью. По Д. Д. Максутову увеличение x, при котором $d = h$, есть *равнозрачковое*, при этом x минимально. При $d \leqslant 0{,}7$ *мм* видимость ухудшается, что определяет максимальное увеличение. Отсюда имеем (для $h = 6$ *мм*):

D, *мм*	25	50	100	250	500	1000
Макс. x	35	71	143	350	710	1430
Мин. x	4,2	8,3	17	42	83	170

При равнозрачковом увеличении поверхностная яркость B тела равна наблюдаемой невооруженным глазом B_0, в остальных случаях она всегда меньше. Напомним, что B не зависит от D и Φ, но из-за потерь света всегда $B < B_0$. Следовательно, B метеора (имеющего заметную ширину) или его следа в телескоп всегда ослаблена по сравнению с тем, что видит глаз, и роль телескопа сводится к тому, чтобы дать увеличенное изображение. Так как обычно коэффициент потерь света $k \cong 0{,}5$, то падение яркости при $d = 6$, 4, 2 и 1 *мм* составляет 50, 78, 94,6 и $98{,}6\%$; при большем увеличении то же количество света распределяется на бо́льшую площадь.

§ 84. Видимость деталей. Условием видимости деталей вообще является требование, чтобы контрастность не была ниже предела, соответствующего данной освещенности. Известно, что при $B < 5 \cdot 10^{-4}$ *сб* порог контрастности начинает расти, видимость деталей падает. Пусть B диска метеора такая, как у Венеры, Луны, Юпитера и планетарной

туманности. Тогда, с учетом упомянутых потерь, наблюдаемая поверхностная яркость B при разных d оказывается (в стильбах):

Зрачок d, *мм* . .	6	4	2	1	0,5
B, Венера	1,5	0,67	0,17	0,04	0,01
Луна	$1{,}2\cdot10^{-1}$	$5{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}4\cdot10^{-2}$	$3{,}5\cdot10^{-3}$	$8{,}7\cdot10^{-4}$
Юпитер . . .	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}8\cdot10^{-3}$	$7{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$
Туманность . .	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	$2{,}8\cdot10^{-5}$	$7{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}7\cdot10^{-6}$

Чертой ограничен порог $B=5\cdot10^{-4}$ *сб*, поэтому детали туманностей плохо видны, Юпитер не может выдержать больших увеличений (малые d). По нашим наблюдениям у метеоров при переходе от —10 до +10 зв. вел. пределы B изменяются от 0,3 до 10^{-5} *сб*, а у метеорных следов $B=10^{-5}$ *сб* и опускается до яркости фона ночного неба ($B=10^{-8}$ *сб*). Поэтому яркие метеоры могут выдержать сильные увеличения x, слабые — только равнозрачковые (минимальные), а у следов даже в последнем случае детали можно заметить только при контрасте в десятки процентов; при большем x они вообще не будут видны.

§ 85. Проницающая сила. Телескоп по сравнению с глазом дает выигрыш на Δm звездных величин:

$$\Delta m = 5\lg\left(\frac{D}{h}\right)+2{,}5\lg(1-k).$$

При $h=6$ *мм* и $k=0{,}5$, $\Delta m=5\lg D-4{,}64$. При $D=h=6$ *мм* получается $\Delta m=-0{,}75$ зв. вел. из-за поглощения k. Даже простые очки с $k=0{,}08$ вызывают потерю 0,1 зв. вел. Если простой глаз видит звезды до 6,5 зв. вел., то бинокль с $D=30$ *мм*, бинокуляр $D=80$ *мм*, рефрактор $D=200$ *мм* и рефлектор $D=5000$ *мм* покажут звезды до 9,2; 11,4; 13,4 и 20,3 величины соответственно. Отсюда видно, что переход от невооруженного глаза к бинокуляру дает такой же выигрыш, как переход от бинокуляра к большому телескопу с $D=790$ *мм*. Поэтому ценные результаты могут дать иногда даже скромные приборы.

Учитывая необходимость иметь максимальное поле зрения для метеоров, следует считать применение больших инструментов не всегда практичным: у телескопов с отверстием 500 и 1000 *мм* поле зрения $2\beta=0°{,}6$ и $0°{,}3$ при минимальном x, прочие же x приведут к еще меньшему диаметру поля зрения. Увеличивая D в 10 раз, мы увеличиваем Δm на 5 зв. вел., уменьшаем площадь поля зрения в 100 раз и во столько же раз уменьшаем число замечаемых метеоров данной звездной величины, что только отчасти компенсируется увеличением их общего числа за счет слабых метеоров. Применяя телескоп, мы как бы рассматриваем метеор с более близкого расстояния.

При наблюдениях полезна бинокулярная насадка (хотя и с потерей 10% света) и зенитная призма. Применение немного более сильных окуляров из-за увеличения темноты неба повышает адаптацию глаза, дает выигрыш до 1 зв. вел. и устраняет лучистый ореол. Известно, что в телескоп глаз видит много больше деталей, чем с тем же объективом можно получить на фотопластинке, так как замена отработавшего зрительного пурпура в глазу новым происходит 15—20 раз в секунду, а на пластинке влияние неспокойствия изображений накапливается; кроме того, по разрешающей способности и чувствительности глаз намного превосходит фотографию, которой пока недоступны ни телеметеоры, ни метеорные следы, ни детали метеора. Оптические неоднородности в атмосфере, создающие мерцание звезд и краев планет, имеют размеры порядка десятых долей метра; поэтому для малых телескопов ($D<100$ *мм*) мерцание невелико, а у больших ($D>500$ *мм*) звезда превращается в расплывчатый *диск*, что должен знать наблюдатель метеоров. На видимость деталей также влияют неоднородности хрусталика, увеличивающиеся с возрастом, о чем тоже нужно знать наблюдателю.

§ 86. Контрастная различимость. Контрастная различимость играет особую роль при наблюдении метеорных следов, слабеющих до полного исчезновения. Она зависит от яркости фона:

Фон, B, *стильбы* . .	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Контраст k, % . . .	3	5	14	29	50	100

Ночное небо имеет $B=10^{-8}-10^{-9}$ *сб*, метеорные следы $B=10^{-5}$ *сб* и слабее; телескоп не может увеличить контрастность, поэтому чем след слабее, тем грубее наблюдение; например, при $B=10^{-8}$ *сб* разрешаемый угол около 2° (!). При больших B из-за сферической аберрации в глазу возникает ореол, мешающий видеть детали, при малых B они также неразличимы. Поэтому существует некоторый оптимум, например, для телескопа с $D=80$ *мм* наибольшее количество деталей видно у метеоров 4—5 зв. величины.

§ 87. Оптика для наблюдений метеоров. Прежде всего поле зрения должно быть хорошо исправленным и достаточно большим, поэтому непригодны объективы с комой (неизопланатические). В двухлинзовых ахроматах при обычных Φ и D остается неустраненной хроматическая аберрация. Создать первоклассный двухлинзовый объектив с большим полем зрения нельзя. Например, объективы Штейнгейля дают сине-фиолетовый ореол, т. е. показывают то, чего нет. Оптически невозможна задача, заманчивая для наблюдателя метеоров, — наблюдать без увеличения участок неба диаметром 60° и видеть звезды до 9—12 зв. величины, или видеть все небо со звездами до 6 величины, «сжатое» до субъективного угла поля зрения порядка 60°. Практический предел $2\beta=241°/D$ (независимо от светосилы Φ). Из сферических линз нельзя получить телескопы диаметром более $D=57$ и 380 *мм* при $\Phi=1:3{,}5$ и $\Phi=1:5$, нужны асферические линзы и еще неоткрытые сорта стекол. Из рефлекто-

ров для наблюдений метеоров представляет интерес телескоп типа Максутова (Ереванская обсерватория) с $D = 406$ *мм*, $\Phi = 1:3{,}2$; с вторым эллиптическим зеркалом $D' = 270$ *мм*; возможен телескоп $D = 360$ *мм*, $\Phi = 1:5$ с полем $2\beta = 1°{,}0$; при $x = 60$ и потере $k = 0{,}5$ он давал бы метеоры 15 зв. величины. Из зеркально-линзовых возможен менисковый телескоп с $D = 310$ *мм* при $\Phi = 1:3{,}5$.

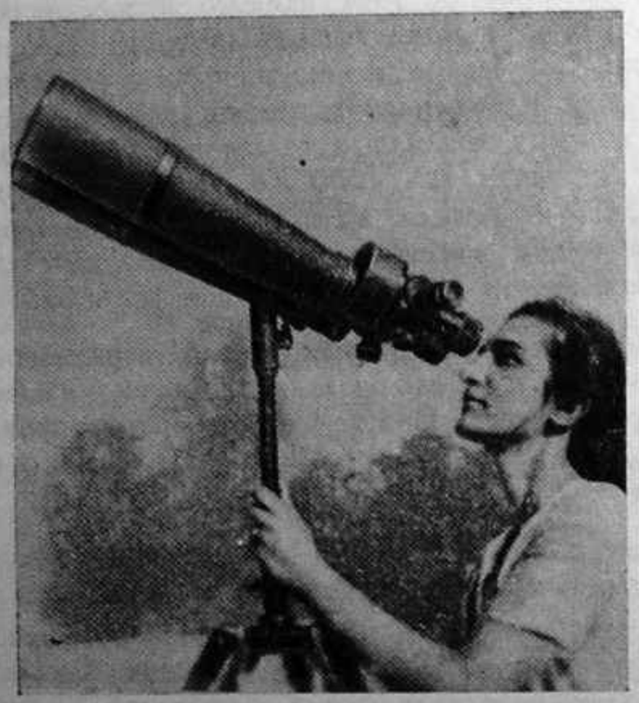


Рис. 60. Бинокуляр — наиболее удобный прибор для наблюдения телескопических метеоров.

Окуляры следует употреблять рамсденовские, с передним фокусом перед передней (полевой) линзой, куда можно поместить шкалу для определения ширины следа или радиоактивную шкалу для оценки его яркости; заменив глазную линзу двумя, получим окуляр Келльнера, улучшающий качество изображения; такая же полевая линза даст улучшенный симметричный окуляр. Для светосильных объективов удобен окуляр типа Эрфле с вынесенным зрачком, так как если держать глаз близко к стеклу, то мешают ресницы, хотя при этом обзор поля достигается поворотом глаза, а не головы. Для получения более темного фона неба лучше увеличение брать в полтора раза выше минимального.

В 1957 г. в связи с наблюдением искусственных спутников Земли в СССР построена астрономическая труба АТ-1 с $D = 50$ *мм*, с полем $2\beta = 11°$ и $h = 8{,}2$ *мм*, удобная для наблюдений телеметеоров до 9,5 зв. вел. и следов.

В целом мы видим, что универсального инструмента для телескопических наблюдений метеоров нет: для рассмотрения метеоров до 8 зв. вел. и для наблюдения метеорных следов наилучшим является бинокль, быстро наводимый на нужную часть неба. Для изучения более слабых телеметеоров (до 11—12 зв. вел.) наиболее удобны бинокуляры [например, типа Асемби, $D = 80$ *мм*, $12\times$ (рис. 60 и 61) и Комет 100 *мм*, $25\times$ с полем 3°,6]. Многие хорошие наблюдения

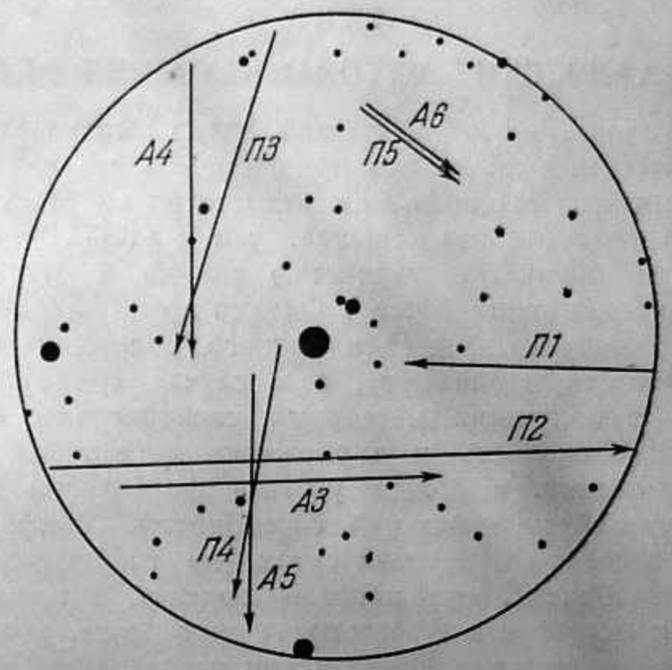


Рис. 61. Параллельные наблюдения телеметеоров двумя наблюдателями *А* и *П* из одного пункта для изучения ошибок нанесения (11 июля 1948 г., Ашхабад, бинокуляры $12\times$ с полем зрения 3°,3).

были получены кометоискателями с большим полем и минимальным x. Исследование более слабых метеоров следует производить, естественно, инструментами большого диаметра; по необходимости их поле зрения очень ограничено.

В случаях, когда требуется вести наблюдения в одной области неба (в полюсе или зените), окулярный конец телескопа можно выводить в теплое помещение, а объектив наружу (как в обсерватории в Тарту). Зенитные наблюдения биноклями, вделанными в крышу, проводились в Антарктической экспедиции Бэрда в 1935 г. Если нужно следить за небом, то удобна система ломаного экваториала, где лучи из объектива, отразившись, идут вдоль полой полярной оси, выходящей в лабораторию и сохраняющей положение неизменным.

ГЛАВА 9

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕТЕОРОВ

§ 88. Введение. Фотографический метод исследования является довольно универсальным, однако применимость его для исследования метеоров ограничивается пока еще недостаточной чувствительностью фотоэмульсий (в сотни раз меньшей, чем у глаза), специфическими требованиями к оптике, статичностью снимка и отсутствием ряда данных, характеризующих метеор. Однако преимущество фотографии бесспорно в отношении фиксации точного положения метеора, распределения яркости вдоль пути, а в случае применения призмы и обтюратора — в получении метеорных спектрограмм и велограмм, дающих состав, скорость и торможение метеорного тела. Новые методы радиофизики, в общем уступая фотографии по точности, обладают большей проницающей способностью, более эффективны, независимы от погоды и времени суток, но требуют сложной аппаратуры. Таким образом, визуальные наблюдения, фотография и радиолокация, не конкурируя и не исключая друг друга, должны служить взаимным дополнением при комплексном исследовании метеоров.

§ 89. Развитие метеорной фотографии. Вскоре после изобретения фотографии были сделаны попытки применить ее для съемок неба. В 1860 г. Гомер Лэн отметил, что она может дать точное направление полета метеоров и облегчить определение их орбит, но яркость метеоров оставалась недостаточной для эмульсий того времени. Первую фотографию получил Вейнек в Праге во время метеорного дождя Андромедид 27 ноября 1885 г., укрепив на экваториале обсерватории камеру местного фотографа. Вторую фотографию получил случайно Х. Э. Клиффорд в Колорадо Спрингс 12 сентября 1887 г., в последнюю ночь работы экспедиции по выбору места для горной обсерватории; она была обнаружена 57 лет спустя! Вольф в Гейдельберге получил двумя разными камерами случайно фотографии метеора 7 сентября 1891 г., путь которого оказался длиннее у более светосильной камеры. Он же 25 сентября 1892 г. получил за одну ночь фотографии трех метеоров одного потока, что позволило впервые найти фотографический радиант. При съемке кометы Холмса Льюис в Коннектикуте 13 января 1893 г. получил первый снимок болида; широкий канал имел зазубрины, вызванные

искрами. Также случайно на Ликской обсерватории был снят 13 ноября 1893 г. взрыв болида. Барнард 9 августа 1894 г. впервые сфотографировал стационарный метеор.

Эти снимки вызвали интерес астрономов и Элькин в Нью-Хэвене построил агрегат из шести камер на общей полярной оси — первый метеорный патруль; камеры расходились веером. На средства фонда Лоуренса Смита, завещанного только на проведение метеорных работ, патруль работал с 1894 по 1909 г. На этом патруле было получено 118 фотографий метеоров, обработанных в основном лишь в 1937 г. [277]. Наличие базисной станции за 3,2 *км* позволило находить высоты и скорости. Кроме того, было выведено 37 радиантов. В связи с ожидавшимся максимумом Леонид 1899 г. за несколько лет до того фотографирование метеоров проводилось в Париже, Медоне, на Ликской обсерватории. Батлер (Англия) снял взрыв болида 23 ноября 1895 г. и отклонение из-за этого взрыва траектории от начального направления. К 1899 г. Костерзитц (Вена) построил патруль из четырех камер, образовывавших сходящийся веер, что облегчает перезарядку и работу обтюратора. Однако им было снято всего четыре метеора. В ноябре 1898 г. Элькин получил три фотографии Леонид и их фоторадиант; другой такой же радиант был получен Гарвардской обсерваторией (где за одну ночь было снято 34 метеора); в обоих случаях радиант не был точкой. 31 июля 1899 г. Элькин получил первую фотографическую скорость, за следующие 10 лет — еще 16. Затем четверть века в этой области за рубежом длился застой.

Рис. 62. Двукрылый обтюратор метеорного патруля Одесской обсерватории с третьим (подвижным) крылом. Конструкция Е. Н. Крамера.

Для получения момента пролета Фрич (Прага) предлагал добавлять параллельную камеру с медленным вращением, Вислиценус — менять в одной камере 10 кассет за время, когда в базисной меняется 13 или 17, что обеспечило бы знание момента с точностью до 2,5 минуты; впоследствии В. В. Федынский (1935 г.) предложил комбинацию неподвижной камеры с движущейся на экваториальной установке, осуществленную 1937 г. в Сталинабаде, а Е. Н. Крамер (Одесса) — добавочное крыло обтюратора с медленным движением относительно обтюратора (рис. 62).

§ 90. Работы русских астрономов. Несмотря на отсталость техники царской России, работы по фотографированию метеоров начались у нас в конце XIX в. П. К. Штернберг подготовился к появлению Леонид 1899 г., на Московской обсерватории был изготовлен периодический затвор, но помешала погода; с 1904 г. С. Н. Блажко при каждом удобном случае производил съемку метеоров и их спектров, получив исключительные результаты 11 мая 1904 г., 12 августа 1904 г. и 12 августа 1907 г. В. А. Балясный (Полтава) получил первый снимок следа болида 1 декабря 1898 г., И. И. Сикора в Юрьеве (Тарту) доказал, что малые светосильные камеры эффективнее обычных больших астрографов, укрепив «Планар» $\Phi = 1:3{,}6$ с $f = 110$ *мм* на университетском телескопе и получив 10—12 августа 1901 г. семь фотографий метеоров. Исследование их обнаружило ряд физических процессов, которым Сикора дал объяснение. Переехав в Ташкент, он организовал базисные пункты в Чимгане и Искандере; расстояние в несколько десятков километров впервые дало надежные параллаксы и ныне общепринято. Сикора получил 11 августа 1909 г. уникальную фотографию одного метеора из всех трех пунктов (рис. 63). Взрывы он объяснил не

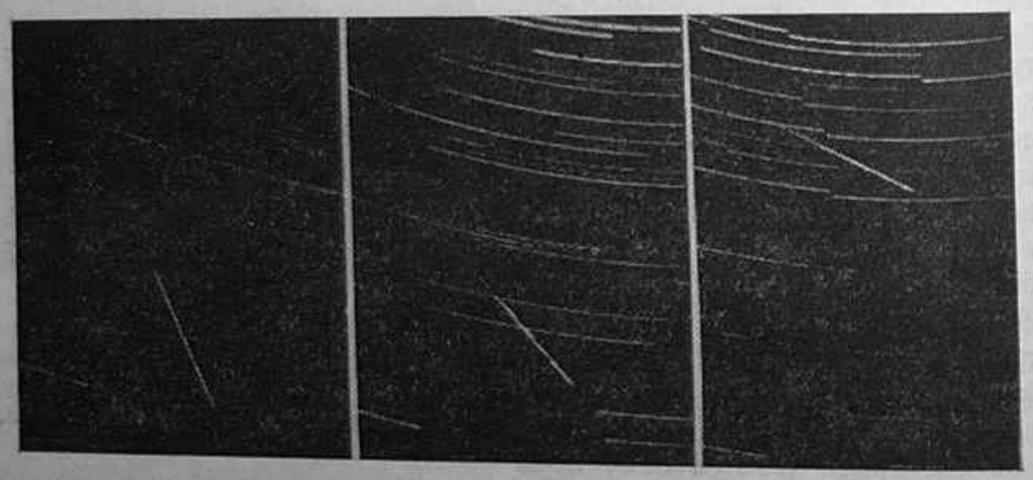


Рис. 63. Фотографии метеора 11 августа 1909 г., полученные И. И. Сикорой одновременно из трех пунктов: Ташкента, Искандера и Чимгана.

разлетом частиц, а расширением газов, что доказано спектрами метеоров лишь в 1935 г. Метеоры он подразделял на «спокойные» и «взрывающиеся». Таким образом, разочарование, постигшее астрономов на Западе в связи с отсутствием метеорного дождя Леонид в 1899 г. из-за возмущений, испытанных этим потоком, повлекло за рубежом снижение интереса к метеорам, а в России в это же время начали развиваться их исследования в Москве, Юрьеве и Ташкенте.

Составить представление об уровне техники того времени можно, например, из того, что, по Рюдо и Блоху, болид 10 августа 1899 г.

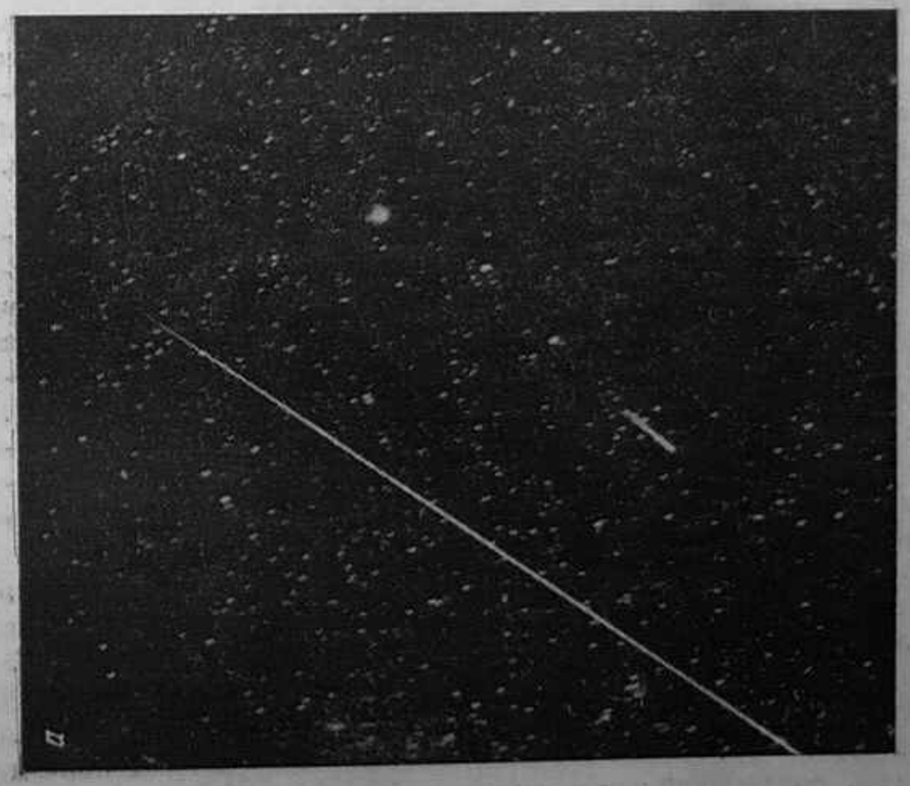


Рис. 64. Снимки метеоров, полученные при фотографировании комет:
а — 1894 г., комета Брукса, снимок Барнарда; *б* — октябрь 1908 г., комета Морхауза, снимок Вольфа. Видна строгая прямолинейность метеорных траекторий.

не оставил никакого следа на фотопластинке, а Карон 29 апреля 1902 г. по тому времени очень светосильной камерой ($\Phi = 1:3{,}2$) получил едва заметный след яркого метеора. И. И. Сикора же применял только светосильные камеры, например, в 1909 г. у него в Чимгане была камера с $\Phi = 1:3{,}6$, у Е. Вазкова и С. Спиридонова в Ташкенте — такая же, у Н. Сикоры и Н. Зинченко в Искандере — с $\Phi = 1:3{,}5$, поэтому на 22 пластинках ими было получено 11 фотографий метеоров — случай тогда беспрецендентный. В 1908 г. Вольф (Гейдельберг) случайно получил снимок метеора, поражавший прямолинейностью траектории, как и снимок Барнарда 1894 г. (рис. 64); таким же оказался и метеор виргинид 11 апреля 1910 г., снятый в Потсдаме вблизи скопления Ясли в Раке. Герцшпрунг использовал известные звездные величины звезд скопления и получил отсюда первую фотометрическую кривую метеора. Впоследствии эту задачу фотографической фотометрии метеора разрешила Н. Н. Сытинская, в частности, для метеоров Сикоры 11 августа 1909 г.

§ 91. Новые работы. После первой мировой войны в 1922 г. С. В. Муратов теоретически рассматривал вопрос о наивыгоднейших условиях фотосъемки метеоров. В 1923—1925 гг. английские наблюдатели фотографировали их 11-ю разными камерами; они вновь подтвердили значение светосилы объектива Φ. В 1925 г. Вийярд Фишер начал просмотр негативов Гарвардской стеклянной библиотеки, накопленных почти за 40 лет как в Кэмбридже (США), так и на южных станциях, камерами от $\Phi = 1:16$ до $1:2{,}5$. С помощью студентов за первый год работы на 71 тысяче пластинок было найдено 250 фотографий метеоров, затем еще 411. Оказалось, что при $\Phi = 1:13$ один метеор получается в период максимума Персеид за 61 час экспозиции, а вне потоков — за 194 часа (на эмульсиях того времени).

Однако с ростом приборостроения и качества эмульсий положение изменилось и, например, в 1939 г. четыре станции Гарвардской обсерватории за год получили 113 случайных снимков метеоров, а в Ашхабаде в 1953 г. только за одну ночь 11 августа — 57. К 1940 г. за полвека все гарвардские камеры сняли 1000 метеоров, тогда как в Ашхабаде за три года (1950—1953) снято 400. Теперь же сверхсветосильные метеорные камеры (рис. 65) фотографируют метеоры до 2—3 величины и могут дать более сотни фотографий в ночь. К концу 1957 г. на них было получено более 6000 пар снимков метеоров (Уиппл, Якки а).

В 1935 г. работа гарвардских камер была так синхронизирована, чтобы при съемках службы неба случайные метеоры снимались бы с разных пунктов. К 1940 г. было получено 36 пар снимков (Уиппл).

Однако систематическое фотографирование метеоров в СССР было начато раньше: уже 14 августа 1932 г. К. П. Станюковичем, Б. М. Машбицем и др. (МОВАГО) под Москвой был снят кассиопеид —2 величины, показавший между высотами $H = 91{,}4$ и $59{,}3$ *км* паде-

ние скорости с 54,3 до 36,7 *км/сек*. В 1933 г. автором были обработаны наиболее интересные фотометеоры, полученные при снимках астероидов в Симеизе; 12 августа 1934 г. И. Е. Васильев, Г. О. Затейщиков и К. П. Станюкович получили спектрограмму персеида —4 величины с 47 линиями Fe, Ca, Ni и Mn. В 1937 г. В. В. Федынский сконструировал метеорный патруль для Сталинабадской обсерватории из 28 камер, в том числе семь спектральных. В 1947 г. в Москве под его же руководством был создан патруль МОВАГО из шести камер с $\Phi = 1:2$, $f = 125$ *мм*. С 1948 г. начаты фотографические работы на высокочувствительной пленке в Ашхабаде, где иногда одновременно работало до 36 светосильных камер, с 1950 г. ценные результаты получены в Симферопольском отделении ВАГО (К. А. Любарский, В. В. Мартыненко и др.). С 1950 г., с переходом на высокочувствительные эмульсии, Сталинабадская обсерватория определила 75 траекторий и скоростей (Л. А. Катасев). В 1955 г. в Ашхабаде вступила в строй первая автоматическая метеорная станция АМС-1 из 10 мощных камер (рис. 66) с объективами $\Phi = 1:2{,}5$, $f = 250$ *мм*; маркировка времени, отметка момента пролета метеора, перемотка пленки 18×24 *см* производилась наблюдателем с помощью автомата В. А. Филимонихина с пульта управления станцией. В 1956 г. здесь был установлен новый «быстроходный» патруль из четырех камер $\Phi = 1:2$, $f = 125$ *мм* с обтюратором, дающим на фотографии метеора 150 перерывов в секунду, длительностью по 2,5 миллисекунды каждый.

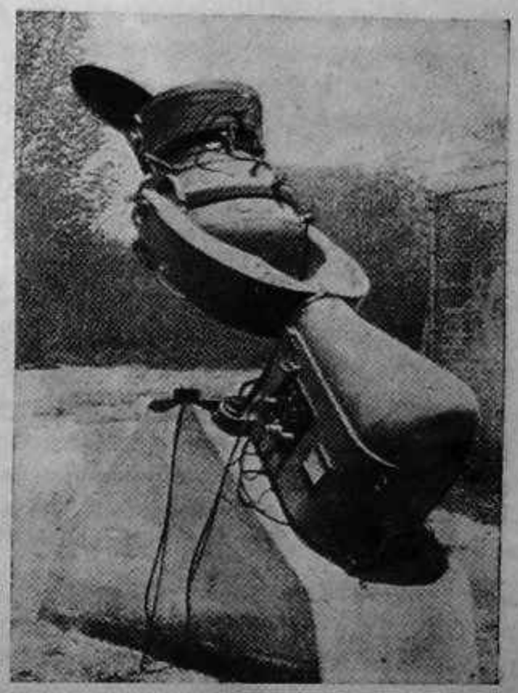


Рис. 65. Камера «Супершмидт» на экваториальной установке (Гарвардская обсерватория).

В 1957 г. автоматические станции, построенные заводом «Кинап» по типу АМС-1, но с обтюратором Е. Н. Крамера, получившие обозначение АС-11, установлены в Ашхабаде, Одессе, Киеве. В Сталинабаде запущен полярный 7-камерный патруль, также базисный.

9 октября 1933 г. произошел метеорный дождь Драконид. В Пулкове (СССР), Юккле (Бельгия), Бергедорфе (Германия) и Жювизи (Франция) его фотографировали; в Жювизи на одной пластинке за 52 минуты камерой $\Phi = 1:4{,}8$, $f = 125$ *мм* снято 25 метеоров, в Бергедорфе за 10 минут 29 и столько же в Юккле.

Радиант оказался площадкой диаметром в несколько минут дуги. В 1946 г. поток повторился: он наблюдался лучше всего в западном полушарии и был снят во многих местах; только одних спектров было получено несколько десятков, все они оказались схожими.

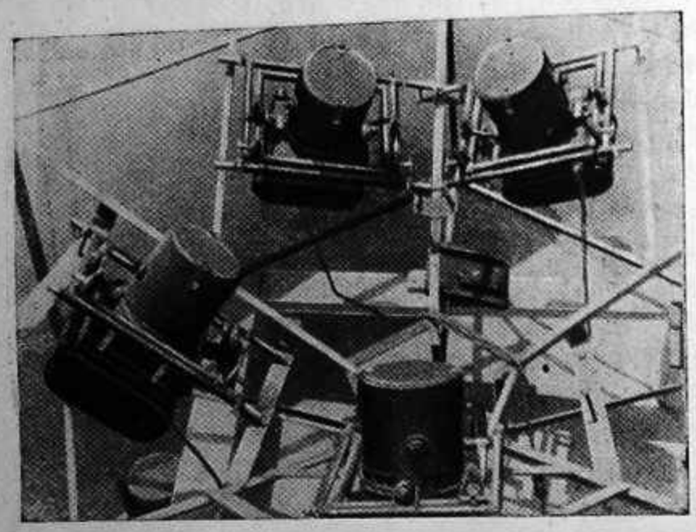


Рис. 66. Метеорный патруль автоматической метеорной станции в Ашхабаде (1955 г.), состоящий из пяти камер 1 : 2,5, $f = 250$ *мм*. Управление камерами от пульта.

Даже любители снимали десятки метеоров на одном кадре. В 1951 г. в Ашхабаде в результате разработки новой техники за несколько ночей получены были спектры 10 неярких метеоров, в августе 1953 г. впервые проведено кинематографирование метеоров, а в октябре 1955 г. получены первые цветные фотографии метеоров и их спектров.

§ 92. Оптика для фотографирования метеоров. Мы видели, что русские исследователи уже с начала XX в. применяли светосильные камеры, правильно оценив их бо́льшую эффективность $Э$. В 1934 г. Д. Д. Максутов [261] указал на рациональность применения смешанных катадиоптрических систем для съемки метеоров; это нашло теперь воплощение в камере Супершмидт $\Phi = 1 : 0{,}66$ и $f = 200$ *мм*, построенной Бэкером специально для метеорных работ (рис. 65). Д. Д. Максутов также указал, что для спектрографирования можно изготовить единый объектив-призму. В 1933 г. А. А. Михайлов доказал, что в сложных светосильных объективах теряется до 40% света. По Белорицкому (1935 г.) с Биотаром $\Phi = 1 : 1{,}4$ выходят звезды до 7—9 вел., тогда как за то же время с Тессаром $\Phi = 1 : 2{,}7$ до 9,1 вел. В 1938 г. А. А. Михайлов и Н. Я. Бугославская [249] нашли, что фон неба ставит предел использования светосилы; в пределах $D = 26 — 86$ *мм* более слабые звезды выходят при большем D. Н. Н. Сытинская и Д. Д. Максутов отмечали, что так как эффективность $Э$ при съемке точки пропорциональна D^2, а при съемке площадки $\frac{D^2}{f^2}$, то для линии (метеор) она определяется значением $\frac{D^2}{f} = D \cdot \Phi$ или произведением линейного и относительного отверстий. В 1937 г. Н. Н. Сытинская [262] указала, что при $D = 200$ *мм* и $\Phi = 1 : 2$ можно будет снимать метеоры $+2$ и $+3$ величины. В 1954 г. в Ашхабаде камерами $\Phi = 1 : 2{,}5$ и $D = 100$ *мм* получены фотографии метеоров $+2$ зв. вел. на пленке чувствительностью 180 ГОСТ.

Так как до последнего времени не создавались оптические приборы специально для изучения метеоров, то из имевшегося ассортимента приходилось выбирать наиболее подходящие. Каким требованиям они должны удовлетворять? Перечислим их.

1. Светосила. Принято думать, что относительное отверстие $\Phi = D : f$ должно быть наибольшим; сверхсветосильная оптика ($\Phi > 1 : 2{,}0$) начала развиваться с 1925 г., но увеличение светосилы в ней достигалось дорогой ценой: либо за счет качества изображения, либо за счет уменьшения D, либо за счет увеличения числа линз (до 8). Каждое из этих обстоятельств сильно снижает эффективность камеры, геометрическая светосила из-за потерь света не соответствует физической, что вызвало необходимость «просветления» оптики. Изображение светящейся точки должно быть наименьшим, чтобы активнее подействовать на фотослой, т. е. оптика должна быть первоклассной. Кроме того, линейное отверстие должно быть большим. В итоге мы должны заключить, что из существующих объективов не следует выбирать сверхсветосильные, а надо отдавать предпочтение объективам с хорошим качеством изображения и большим диаметром D, работая при значениях $\Phi = 1 : 4{,}5 — 1 : 2{,}5$ на эмульсии высшей чувствительности. Много легче повысить чувствительность эмульсии в 10 раз, чем светосилу вдвое. Практика это подтверждает: например, в Ашхабаде объектив Эльмар $\Phi = 1 : 3{,}5$ давал втрое больше метеоров, чем объективы $\Phi = 1 : 2$ на той же эмульсии (рис. 67). Исследования О. Джуманиязова 1953 г. подтвердили это независимо [257].

2. Широкоугольность. Эффективность камеры увеличивается с ростом ее широкоугольности. К сожалению, яркость изображения к краям падает как $\cos^4 w$, где w — угол луча с оптической осью; только в советских объективах типа Руссар-25 падение яркости следует $\cos^3 w$. Эта «фотометрическая ошибка поля» при $w = 30°$ даже в Руссаре составит 65% или потерю 0,5 зв. величины. «Облачные камеры» охватывают угол $2\beta = 220°$, но при ничтожном $\Phi \sim 1 : 30$. К сожалению, досадное ограничение $\Phi \cdot 2\beta = 24°$ не позволяет иметь первоклассные широкоугольные светосильные объективы, что приводит к созданию патрулей из нескольких камер. В этом отношении совпадают требования съемки неба с земли и

съемки земли с воздуха, т. е. аэрофотосъемки, и применение аэрокамер вполне рационально. Имеются семи- или девятиобъективные аэрокамеры $\Phi = 1:4{,}5$ с охватом ими поля в 140°. Один Руссар-25 при $\Phi = 1:5$ кроет $2\beta = 104°$; Руссар-29 при $\Phi = 1:6{,}8$, $f = 70$ *м* имеет $2\beta = 122°$. Теоретический предел $\Phi = 1:0{,}5$ в воздухе или 1 : 0,36, если камеру заполнить преломляющей жидкостью. Алмазная оптика дала бы $\Phi = 1:0{,}2$. Гораздо лучше обратиться к смешанной зеркально-линзовой оптике, где закон падения может содержать просто $\cos w$ (например, система Шмидта). Созданный в этом направлении и уже упомянутый «Супершмидт» имеет $2\beta = 56°$.

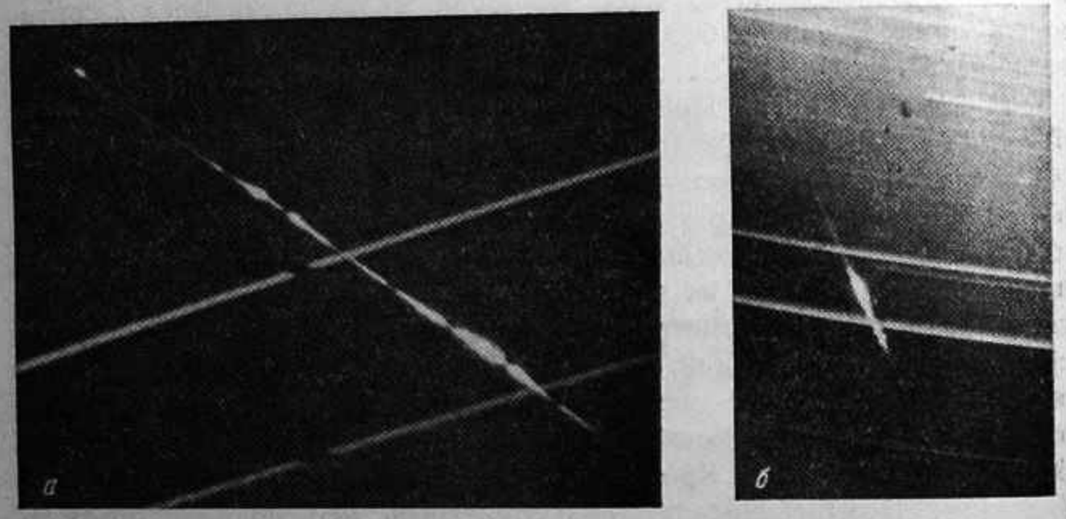


Рис. 67. Влияние объектива на изображение метеора:

а — метеор 10—11 августа 1950 г., камера 1 : 4,5, $f = 105$ *мм*; *б* — тот же метеор, камера 1 : 1,5, $f = 50$ *мм*. В конце пути — сферический взрыв, в перерывах обтюратора виден газовый след.

3. Разрешающая способность. Диаметр дифракционного изображения точки $d = 2{,}4\,\mu$ при $\lambda = 0{,}56\,\mu$ и $\Phi = 1:3{,}5$ и уменьшается с ростом Φ независимо от размеров камеры. Для линии влияние дифракции быстро падает при расстоянии от ее оси, большем d. Для метеора, пролетающего на высоте $H = 70$ *км*, значение $d'' = 279'' : D$ (D в *мм*) соответствует 2 метрам для камеры с $D = 50$ *мм*. Зерно эмульсий имеет размеры в несколько микрон и более крупно для особо чувствительных эмульсий, которые как раз и употребляются для фотографирования метеоров.

Под разрешающей способностью ν условимся понимать число пар белых и черных штрихов на 1 *мм*, еще разрешаемых объективом на пределе. По Ф. Л. Бурмистрову «редкий фотографический объектив обладает теоретической разрешающей силой». Так, Микропланар ($\Phi = 1:4{,}5$, $f = 35$ *мм*) при $\lambda = 0{,}40\,\mu$ теоретически разрешает 1,1 μ или $\nu = 450$ штрихов/*мм*, а практически $\nu = 400$. При диафрагмировании ν падает (вопреки общему мнению), например, в данном случае до 175 при $\Phi = 1:9$ и до 88 при $\Phi = 1:18$. Разрешающая сила фотоэмульсий не выше $\nu = 60 - 70$ штрихов/*мм*, что используют оптики, создавая объективы, которые становятся неполноценными при уменьшении зерна (обычно $\nu = 30 - 50$ в центре поля, до 5—10 к краям). Рассеяние света в фотоэмульсии создает «кружки рассеяния» диаметром около 25 μ; два из них будут видны раздельно при расстоянии центров 15 μ. Именно этим фактором ограничена разрешающая сила системы «объектив плюс фотослой». В угловой мере это составит, например, для Урана-9 ($\Phi = 1:2{,}5$, $f = 250$ *мм*), Ксенона (1 : 2,0; 125), Тессара (1 : 2,8; 80) и Индустара-22 (1 : 3,5; 50) соответственно 14″, 27″, 42″ и 67″. На меньшем угловом расстоянии объекты не получатся раздельно. Практически эти пределы могут быть в 1,5—2 раза грубее, особенно не в центре поля.

4. Проницающая способность определяется предельной величиной звезд среднего спектрального класса, которая еще может быть получена в зените при фотографировании данным объективом. Так как фон неба вызывает вуаль, уничтожающую изображения звезд, то оптимальная выдержка T_m ограничена. Для Западной Европы по Данжону и Куде

$$T_m = 0{,}6 - 2{,}325 \lg \Phi.$$

T_m здесь выражено в минутах. Например, при $\Phi = 1:1$, 1 : 2 и 1 : 3 $T_m = 4$, 20 и 52 минутам. В условиях Средней Азии, более благоприятных, T_m больше в 2,5 раза на эмульсии 180 ГОСТ (Ашхабад). В метеорной астрономии T_m определяет верхний предел времени открытия камер при съемке метеоров.

Мощность астрографа определяется предельной звездной величиной m_1, которая может быть получена за определенный интервал времени, например, за 1 минуту, и определяется значением D^2 при фотографировании звезд, $\Phi \cdot D$ — при съемке метеоров и Φ^2 при фотографировании поверхностей. Поэтому у одного и того же инструмента она будет разной, если снимать ядро метеора, его хвост и след. Ее теоретическое значение сильно искажено потерями. Например, при $\Phi = 1:4{,}5$ (Тессар), 1 : 2,0 (Эрностар) и 1 : 1,55 (Тахон) потери достигают соответственно 0,3, 0,6 и 1,5 зв. величины. Так как метеор движется с угловой скоростью ω, то предельная звездная величина метеора будет зависеть от ω: из двух метеоров равной видимой яркости более медленный выйдет ярче; потеря звездной величины из-за движения пропорциональна $2{,}5 \lg (K\omega)$, где K — некоторый коэффициент. Опытом найдено, что даже при $\omega = 15''$ *сек*$^{-1}$ потеря $\Delta m = 5 - 6$ зв. вел. (при $f = 50 - 125$ *мм* и $1/\Phi = 2{,}0 - 3{,}5$); при $\omega = 10°$ *сек*$^{-1}$ потеря составляет уже около 11 зв. вел., т. е. можно снять лишь метеоры около 0 зв. вел.

5. Прозрачность оптики зависит от потерь на поглощение и отражение света в линзах. Так как отражение влияет сильнее, то,

если покрыть стекло слоем вещества с показателем преломления $n' = \sqrt{n}$ (для стекла $n \cong 1{,}5$), отраженные лучи от стекла и от слоя, интерферируя, уничтожатся. В этом состоит «просветление» оптики, практически уменьшающее потери в 3—5 раз. Влияние поглощения сильнее сказывается для слабых звезд и быстро растет с удалением от центра негатива; например, для четырехлинзового объектива Цейсса $D = 120$ *мм*, $\Phi = 1:2$ на $w = 14°$ оно составляет до 5 зв. вел. (Г. Шнеллер). Следовательно, в метеорной фотографии надо избегать многолинзовых объективов.

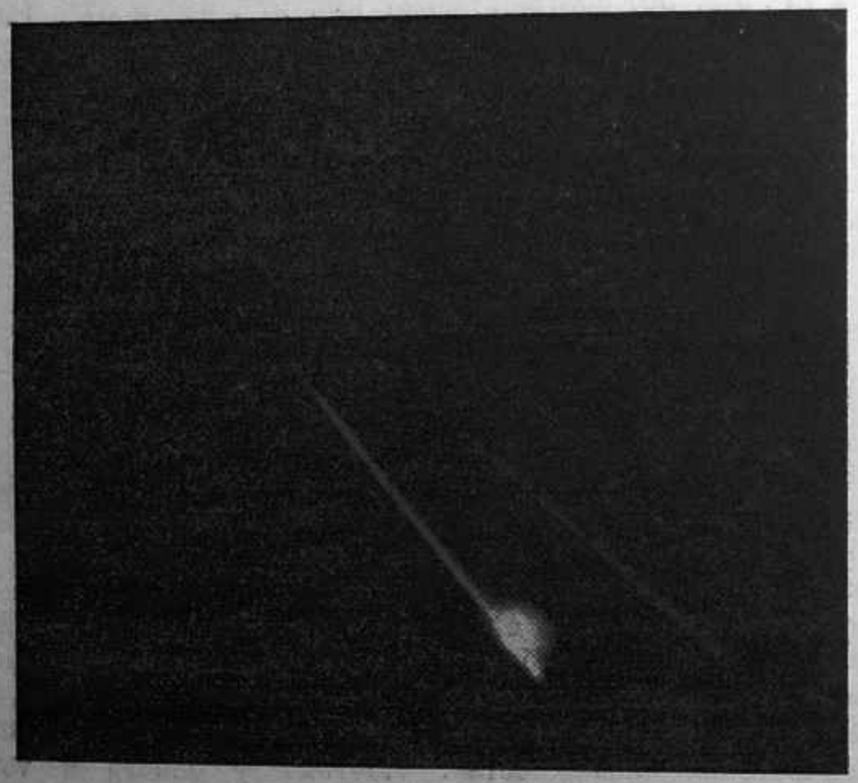


Рис. 68. Из-за аберрации объектива взрыв метеора на краю поля зрения получился асимметричным (фото А. Н. Симоненко, Ашхабад).

6. Качество фотографического изображения определяется правильностью передачи деталей, контрастностью и отсутствием фона («бриллиантность» изображения). Разрешающая способность есть одно из этих качеств. Дефокусировка всего на 18 μ при $\Phi = 1:1$ приводит к потере одной зв. величины. При 1 : 2 и 1 : 3 она дает ту же потерю при 35 и 53 μ (Д. Д. Максутов). Ничтожный прогиб пленки или перекос пластинки сводит на нет все преимущества оптики и эмульсии.

Из-за наличия неустранимых аберраций страдает качество изображения (рис. 68).

Пять аберраций третьего порядка (сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия) неустранимы во всех системах — зеркальных, линзовых и смешанных. Но линзовые системы имеют еще две аберрации — хроматизм положения и хроматизм увеличения. Если применять две линзы для устранения хроматической аберрации, то получится *ахромат*, при трех — *апохромат*. Если астигматизм по оси менее $0{,}005f$, то объектив с таким качеством есть *анастигмат*, при исправлении только сферической аберрации и комы получается *апланат*; анастигмат всегда является апланатом. При дисторсии в несколько десятков микрон объектив будет *ортоскопическим*. Первоклассным объективом называется такой, где фронт световой волны искажен не более, чем на $\frac{1}{4}\lambda$ или 0,1μ (условие Рэлея). Советская оптика выдвинула более жесткое требование: $\frac{1}{10} - \frac{1}{20}\lambda$ (Д. Д. Максутов).

Кроме зеркальных апланатов, для фотографирования метеоров представляют особый интерес так называемые асферические компенсаторы, помещаемые на пути хода лучей главного зеркала. Афокальный компенсатор В. Н. Чуриловского (1934 г.) ставится в сходящемся конусе лучей после их отражения; можно получить $\Phi = 1:5$ при $f = 1000$ *мм*. Менисковый компенсатор Д. Д. Максутова (1941 г.) помещается перед зеркалом и может дать большое поле при $\Phi = 1:3$ и 1 : 2 при большом масштабе ($f = 1000 - 2000$ *мм*). Афокальный двухлинзовый компенсатор Д. С. Волосова и др. (1942 г.) помещается так же и при $\Phi = 1:1{,}5$ и 1 : 1 и $f = 1000 - 500$ *мм*, осуществляет светосильную длиннофокусную систему, притом с устранением аберраций менисковых систем.

Создание подобной оптики есть задача будущего. Пока же практически следует из имеющихся объективов выбирать не слишком светосильные, но широкоугольные, наивысшего качества с большим линейным отверстием и минимальным числом линз. Практически это может быть 4-линзовый объектив — анастигмат, например, просветленный Индустар-22 с $f = 50$ *мм*, $\Phi = 1:3{,}5$, $2\beta \cong 50°$, $\nu \cong 40$ *штр/мм*. 6—9 камер «Зоркий-3» с объективом такого типа удобны в обращении, достаточны для метеорного патруля и обеспечат каждую рабочую ночь в среднем по метеору.

Для более специальных целей пригодны камеры с объективами Уран-10 ($\Phi = 1:2{,}5$, $2\beta = 60°$, $\nu = 30 - 45$ *штр/мм*, $f = 100$ *мм*) или Монтар ($\Phi = 1:3{,}5$, $2\beta = 40°$, $f = 500$ *мм*); также пригоден уже описанный Уран-9 ($\Phi = 1:2{,}5$, $\nu = 22$ *штр/мм*) или Биотар ($\Phi = 1:2$, $2\beta = 48°$, оба с $f = 250$ *мм*). Однако детали метеора могут быть получены только при длиннофокусных камерах ($f > 500$ *мм*), специально для метеоров не применяемых, поэтому необходимо исследовать негативы метеоров, случайно попавших на пластинки подобных астрографов (рис. 69).

Следует помнить «критерий добротности» Г. Г. Слюсарева:

$$\Phi \operatorname{tg} 2\beta \cdot 0{,}1\sqrt{f} = \text{const} = C_m.$$

Численно $C_m = 0{,}23$, ночные аэросъемочные объективы имеют $C_m = 0{,}35$ за счет снижения допусков, например Аэростигмат ($\Phi = 1:1{,}5$, $2\beta = 42°$, $f = 200$ *мм*) имеет $C_m = 0{,}36$. Более 20 лет назад фирма Лаакк (Германия) выпустила объективы «Метеор» (Φ от 1 : 4,5 до 1 : 5); для метеоров они непригодны. Если исследовать

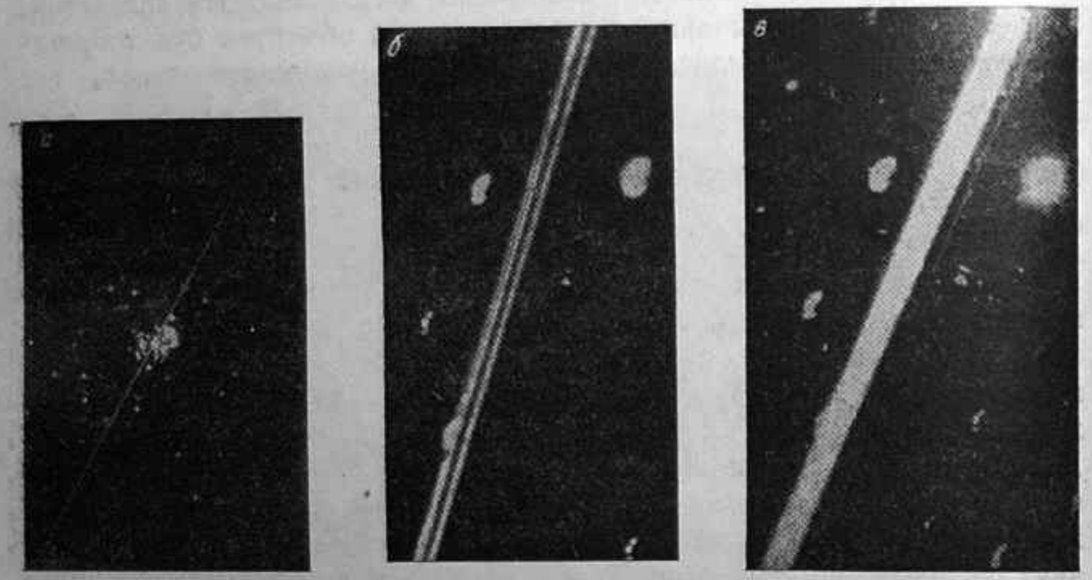


Рис. 69. Фотографии метеора 11 марта 1940 г., пролетевшего через Плеяды:

а — камерой $D=75$ *мм*, $f=300$ *мм*, траектория кажется одинарной; *б* — в фокусе рефлектора $D=200$ *мм*, $f=1210$ *мм*, виден тройной метеор шириной 20″; *в* — тот же снимок, слабее пропечатанный; виден спутник на расстоянии 30″ (по Ж. Саже, Медонская обсерватория).

итоговую эффективность $Э$ камер (не объективов!) Гарвардской обсерватории в пределах Φ от 1 : 14,6 до 1 : 4,0 с учетом их поля зрения и при числе часов работы каждой от 900 до 2400, то оказывается, что $Э$ точно пропорционально Φ^2; то же показала обработка канадских данных Миллмана (Персеиды 1939 г.) для пяти типов других камер с Φ от 1 : 8 до 1 : 2. Отсюда получается, что метеор практически фотографируется как *диск*, а не как звезда [248*а*].

За последние годы появились видоизменения камер Шмидта и Максутова. В Иене рассчитана 21 новая система сверхсветосильных камер с их аберрациями. Система Шмидта при $\Phi = 1:3$ имеет поле диаметром 28°. Возможна ее модификация до светосилы $\Phi = 1:0{,}35$. Добавление выпуклого зеркала к системе Шмидта делает ее поле плоским. Бэкер (США) рассчитал четыре конструкции этого рода. Волосов продолжил работы Максутова и рассчитал менисковые системы светосилой 1 : 2. Применяя несколько менисков из разных сортов стекла, можно устранить хроматизм, например, Уиппл предложил систему с полем 26° при $\Phi = 1:0{,}67$. В 1939 г. Хандрикс изготовил камеру Шмидта из одной сплошной массы стекла: передняя поверхность ее имеет форму коррекционной пластинки, а задняя алюминирована. При показателе преломления стекла $n = 1{,}52$ достигается выигрыш в светосиле в n^2 раз; эта камера имеет $D = 54$ *мм*, $f = 51$ *мм*, что дает $\Phi = 1:0{,}62$. Фотопластинка приклеивается кедровым маслом к фокальной поверхности. То же делается в камере $f = 36$ *мм*, $\Phi = 1:0{,}47$ обсерватории Паломар. Там же имеется «сухая» камера Шмидта $\Phi = 1:0{,}95$ с $f = 73$ *мм* из сплошного стеклянного блока. Практическим пределом подобных «сплошных» систем является $\Phi = 1:0{,}35$ (блок из стекла) и 1 : 0,20 (блок из алмаза). Боуэн описал еще одну камеру Шмидта с дополнительной кварцевой линзой перед фокусом. При $f = 214$ *мм* и $D = 350$ *мм* она дает плоское поле диаметром 17 *мм* при $\Phi = 1:0{,}6$.

§ 93. Метеорный патруль. Патруль можно устанавливать неподвижно (рис. 66), что облегчает обработку (вычисление атмосферной траектории) при базисной съемке, или же на общей полярной

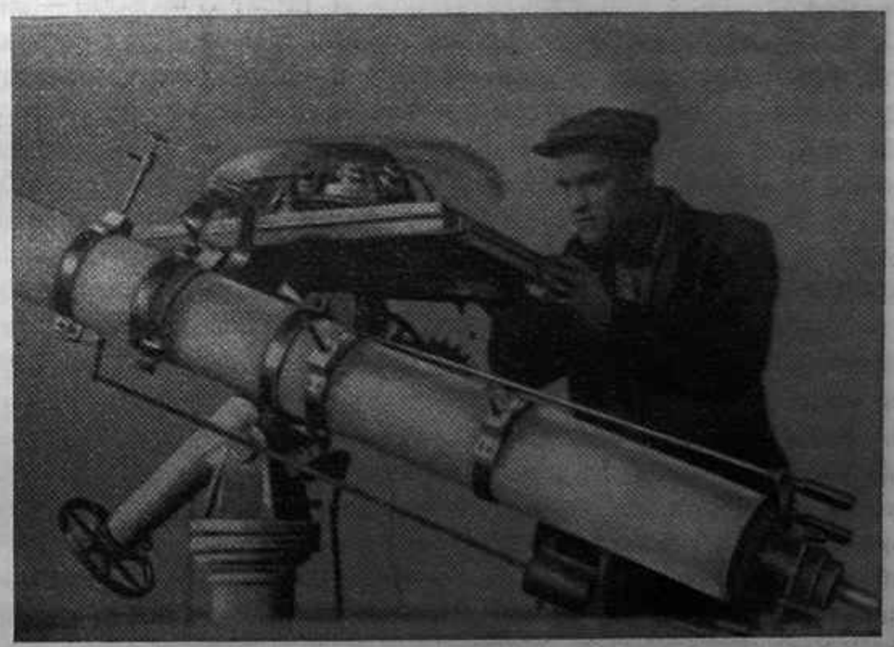


Рис. 70. Десятикамерный метеорный патруль МП-7 с куполовидным обтюратором на экваториальной установке (ААЛ, 1953 г.). Камеры 1 : 1,5 и 1 : 2, $f = 50$ *мм*.

оси (рис. 70); в последнем случае облегчается получение астрономических данных, а негативы без метеоров используются для других астрономических работ и службы неба. Если применять широколопастной обтюратор с малым вырезом, то метеор получится четкообразным,

а время экспозиции можно увеличить в 3—5 раз. Применением фотоэлементов с фотоумножителями можно заставить камеры открываться только на момент пролета метеора с записью этого момента. Аналогично работают некоторые радиолокаторы при съемке метеоров и определении их скоростей.

§ 94. Фотоматериалы для метеорной фотографии. В настоящее время при массовой автоматической съемке метеоров рациональнее применять не пластинки, а пленки, хотя первые удобнее обрабатывать, пленки же надо зажимать между двумя плоскими стеклами. Дальнейшее развитие метеорной фотографии в значительной мере определяется успехами техники изготовления фотоэмульсий. Например, Сталинабадская обсерватория, перейдя на высокочувствительную эмульсию, удесятерила годовую продукцию своего патруля. За последние полвека светосила объективов возросла от $\Phi = 1:3$ до $1:0{,}6$ или в 25 раз, и достигла предела, тогда как чувствительность S фотоэмульсий повысилась от 1° до 30 000° Х и Д, т. е. в 30 тысяч раз и продолжает возрастать. Двадцать лет назад наиболее чувствительные пластинки «Ильфорд Метеор» имели $S = 2000°$ Х и Д, тогда как теперь отечественная кинопленка B или $Д$ имеет $S = 8000 — 10\,000°$ Х и Д. Рассмотрим далее необходимые для нас свойства фотоэмульсий, так как получение снимка метеора представляет цепь операций и недостаток работы одного звена может свести на нет успех в остальных.

1. Светочувствительность S есть мера способности фотоэмульсии создавать скрытое изображение. Так как она различна для разных длин волн, то повышение S возможно как за счет расширения области спектра, так и за счет увеличения ее в данной λ. Фотографическая плотность D зависит от освещенности E и продолжительности ее t, и на прямолинейном участке характеристической кривой, как известно, растет пропорционально Et^p, где p — показатель Шварцшильда, имеющий величину порядка 0,8. Ниже этого участка находится область недодержек, куда попадает около $^2/_3$ всех фотометеоров, а также начала и концы путей всех вообще снятых метеоров. Характеристическая кривая горизонтальна при плотности D_0, равной плотности вуали; до $D = +0{,}2$ ее фотометрически использовать нельзя, т. е. большинство слабых фотометеоров непригодно для фотометрии. В область передержек и соляризации попадают лишь немногие метеоры. Недостаточно чувствительные эмульсии (ниже 90 ГОСТ, 21/10 ДИН или 1800° Х и Д) применять нецелесообразно, высокочувствительные эмульсии сохраняются лишь 15—20 дней, поэтому важна гиперсенсибилизация пленок перед съемкой. Фотобумага Кодак RP 30 для катодного осциллографа имеет $p = 0{,}25$ и дает выигрыш на 2—3 зв. вел. для быстротечных явлений (Эпик).

2. Максимальная оптическая плотность D_m фотоэмульсий определяется наибольшим количеством выделившегося серебра и равна логарифму отношения коэффициентов поглощения самых непрозрачных и прозрачных частей негатива. Обычно $D_m = 2{,}5$, т. е. самые плотные части негатива в 300 раз или на 6,2 зв. вел. плотнее минимальных. Обычно яркости фотометеоров лежат в пределах от 0, +1 до —1, —2 зв. вел. и до D_m (при —5, —6 зв. вел.) не доходят, а видимое различие фотографий более ярких метеоров происходит из-за ореолов рассеяния и отражения от обратной стороны подложки.

3. Фотографическая вуаль неизбежна в фотопроцессе, но с ней можно работать; при ее плотности, растущей вместе с S и равной 0,18—0,30 при наивысшей S, теряется 0,4—0,75 зв. вел. Будем отличать от этой фотографической вуали вуаль, вызванную специальной засветкой эмульсии в целях повышения общей чувствительности.

4. Контрастность есть свойство эмульсии передавать степень различия яркостей. Она определяется тангенсом угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой γ. При $\gamma = 1$ контрастность нормальна. Но γ с увеличением S падает и потому изменения яркости метеора на более чувствительных эмульсиях менее заметны. Энергичное проявление повышает γ, но вместе с ней увеличивает и вуаль. В области недодержек γ крайне мала и потому нелегко разыскать слабые метеоры на негативе (как иголку на полу большой комнаты). Однако ее можно повысить контратипированием, а также физическим либо химическим усилением. Известен опыт Прокудина-Горского, доведшего многократным контратипированием высохший след капли воды на ватмане до вида черной кляксы. Этим методом, мало применяемым астрономами, можно было бы выявлять замечательные подробности. В 1950 г. очень удачные результаты по усилению крайне слабых фотометеоров получил Н. И. Гришин [253, 254]. Лучше усиливать не негатив, а его позитивную копию; для целей фотометрии такие контратипы, конечно, уже непригодны.

5. Фотографическая широта есть способность фотоэмульсии верно передавать весь интервал яркостей. Фотопленки имеют широту до 250, т. е. правильно могут передать яркость метеора на диапазоне 6 зв. вел., например от 0 до —6 зв. вел. Медленное проявление повышает широту.

6. Фотографическое рассеяние в фотослое расширяет изображение звезды и вместо предельного диаметра 25—30μ оно может доходить у ярких звезд до 500—1000μ (!), создавая изображение там, где оно отсутствует (рис. 71). Это приводит у метеоров к возникновению ложных ореолов, уширению пути, пропаданию деталей, подобно иррадиации хотя и способствует восприятию изменения яркости и облегчает ее оценку. Одно и то же количество люкс-секунд Et^p, действуя краткое время (полет метеора) или длительно (фотографирование слабой звезды) даст разный результат,

так как $p < 1$, и звезда выйдет слабее (поэтому астрономы увеличивают выдержку втрое, чтобы выиграть одну звездную величину). Таким образом, с этой точки зрения фотография более пригодна для съемки метеоров, чем звезд.

7. Разрешающая способность ν фотоэмульсии обычно 60—65 *штр/мм*, но, сильно снижая S, можно дойти до $\nu = 1000$; такие эмульсии для метеоров непригодны. Д. Д. Максутов вычислил ν объектива и глаза и нашел их отношение k; при $\Phi = 1:1$,

Рис. 71. Явление фотографической иррадиации (лунное затмение 19 января 1954 г., фото ААЛ).

1:2, 1:5 и 1:100 соответственно $k = 27$, 14, 6 и 1,2, т. е. в телескоп видно гораздо больше деталей, чем их можно им же сфотографировать, что давно известно из опыта. Лучшие фотографии метеоров, случайно полученные громадными рефлекторами, дают не больше деталей, чем их глаз видит в бинокль, и мы должны знать границу разумных требований.

8. Зернистость изображения связана с природой фотоэмульсии. Из-за нее разрывается изображение детали. Снижать зернистость можно медленным проявлением, применением некоторых проявителей, выбором соответствующих типов эмульсии.

9. Спектральная чувствительность S_λ играет важную роль, так как красные метеоры на не очувствленных эмульсиях вообще не выходят; 30% метеоров желтые, и применение ортохроматической эмульсии уже дает выигрыш. Наилучшие эмульсии — изопанхроматические; они ближе передают то, что видит глаз, и наиболее равномерно охватывают спектр. Применение инфракрасных эмульсий в метеорной практике ограничено тем, что у большинства метеоров максимум излучения лежит в ультрафиолете.

10. Гиперсенсибилизация повышает S после изготовления фотоэмульсии. Имеется ряд способов повышения S, например, засветка на несколько десятков секунд светом ночного неба при перезарядке, либо увеличение экспозиции на 10% против нормы, купание в течение 20 минут в обычной воде перед проявлением, применение проявителя, повышающего S при проявлении, как, например, стандартный проявитель Д-8. Хорошие результаты дает выдерживание несколько дней в «ртутном ящике»: пары ртути действуют через упаковку и повышают S по опытам Астрофизической лаборатории в Ашхабаде до 15—20 раз. Менее чувствительные эмульсии очувствляются сильнее (Г. А. Насыров, Ашхабад). Время выдержки в парах ртути сильно зависит от окружающей температуры.

11. Противоореольность эмульсии играет важную роль, позволяя избежать отражений от задней поверхности подложки, хотя этим самым делает более слабыми изображения метеоров (на несколько десятых зв. величины).

12. Прочие свойства фотоэмульсии. Известно влияние температуры t° на чувствительность S, например, иногда при $t^\circ = -20^\circ$ С S падает и теряется до 0,4 зв. вел. при кратковременной выдержке; при длительной выдержке S растет. Влияние t° неодинаково для ярких и слабых метеоров. С увеличением влажности S падает (на 0,5 зв. вел. при изменении влажности от 40 до 80%). Таким образом, в холодную ночь в сухом климате общий выигрыш достигает 0,8 зв. вел., что равносильно удвоению светосилы. Мокрая пластинка менее чувствительна (на 30—70%). Действие красного света на экспонированную пластинку ослабляет скрытое изображение (эффект Гершеля) и потому, стремясь на каждом звене процесса получения фотографии метеора добиться максимального выигрыша предельной звездной величины, мы должны проявлять в полной темноте. Из-за явления Костинского фотографические изображения близких звезд сближаются еще больше, например, на 3—8μ при расстоянии 20μ, что важно для двойных метеоров. При сушке слой стягивается, смещаясь даже на пластинке до 2μ, на освещенных местах сильнее (явление Росса), например, на 1,6μ при расстоянии 0,1 *мм*. Из-за необратимых процессов в слое и подложке со временем негативы делаются непригодными; копирование мало помогает, так как копия не может быть ни выше оригинала, ни равна ему. Из-за фотографической иррадиации отсутствует резкая граница фотоизображения и в зависимости от того, каким его местом пользоваться, ширина метеора получится или меньше, или больше истинной. В. В. Шаронов указывает, что следует брать ту точку, где кажущаяся освещенность равна 0,5 от истинной; кажущийся диаметр изображения растет, как $\lg t$ (t — выдержка). О применении цветной фотографии мы уже говорили.

§ 95. Проявление. Проявитель должен «вытягивать» самое слабое изображение метеора, следовательно, он должен быть без бромистого калия. Для сохранения постоянства щелочности нужен тетраборнокислый натрий (бура), обеспечивающий буферность (с борной кислотой). Проявитель должен быть мелкозернистым, контрастным, невуалирующим и повышающим S при проявлении. В итоге проявление должно быть медленным, с предварительным размачиванием в воде. В 1952 г. в Ашхабаде были испытаны проявители № 2, Д-8, Д-76, Д-82, НИКФИ. Наибольшую контрастность в ущерб зернистости дает Д-8 с потерей очень слабых звезд; наибольшую возможную плотность метеора дает Д-82, хотя с заметным зерном; число звезд при этом максимальное. Прекрасные по мелкозернистости фотографии обеспечивает Д-76, давая наибольшее число деталей, но по числу изображений звезд стоит на третьем месте. На втором месте оказывается проявитель № 2, повышающий S вдвое и достаточно мелкозернистый. Он взят как основной для работы и в Ашхабадской астрофизической лаборатории называется «метеорным». «Метеорный проявитель» имеет на 750 *см*³ воды метола 2 *г*, сульфита натрия безводного 100 *г* или кристаллического 200 *г*, гидрохинона 5 *г*, буры 8 *г*, борной кислоты 8 *г*, с добавкой воды до 1000 *см*³ (растворение в указанном порядке). Проявление длится 20—30 минут.

§ 96. Фиксирование. Фиксирование должно удалить более 95% галогенного серебра с астрономического негатива, поэтому для удаления прозрачной, но плохо растворимой комплексной соли $Na_3Ag(S_2O_3)_2$ негатив следует выдерживать в тиосульфате натрия (еще Гершелем неправильно названным гипосульфитом) еще столько же времени, сколько прошло, пока он стал прозрачным; дольше этого держать нельзя, так как начинается растворение Ag. Имея в виду длительное хранение, нужно вторично фиксировать в свежем растворе, что полезнее даже длительной промывки и предотвращает пожелтение. Последнее устраняется марганцевокислым калием или метабисульфитом калия, но при этом ослабляется изображение. При промывке, как известно, важна не скорость струи, а число ванн. Для метеорной фотографии быстрая сушка (вентилятор, спирт) нежелательна. Рекомендованный состав кислого фиксажа: воды 600 *см*³, гипосульфита 240 *г*, сульфита безводного 15 *г*, уксусной кислоты (28%) 47 *см*³, борной кислоты 7,5 *г*, алюминиевых квасцов 15 *г*, воды долить до 1 *л*.

§ 97. Другие виды фотографии. Проблема максимального повышения чувствительности (работа на сверхчувствительной эмульсии, преодоление области инерции, гиперсенсибилизация, уменьшение вуали, повышение S при проявлении, усиление негатива, усиление копий с негатива контратипированием, применение пленки, политой с обеих

сторон и прижатой к зеркалу) может решаться и принципиально иным путем, например, электрохимическим проявлением, которое может оказаться сильнее обычного химического. Кроме того, существуют электронно-оптические преобразователи, усиливающие изображение в сотни раз, после чего оно может быть сфотографировано. С их помощью можно снимать в ультрафиолетовой и инфракрасной областях.

Применение еще более длинных волн подводит нас к радиофизическим методам.

ГЛАВА 10

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРОВ

§ 98. Введение. Полет метеора в атмосфере связан с ионизацией воздуха как в голове самого метеора, так и в воздушном цилиндре, осью которого является траектория метеора. Ионизуются также частицы вещества самого метеорного тела. Поэтому не слишком короткие радиоволны могут отражаться от метеора и его цилиндрического следа, и это дает возможность определять их положение радиолокацией, измеряя время пробега радиоволны в оба конца радиотехническими приемами. Особая ценность метода состоит в том, что на распространение радиоволны не влияют ни облака, ни дневной свет и наблюдать метеоры, таким образом, можно круглосуточно. Далее, поскольку полет метеора вызывает изменение электрического состояния ионосферы, то изучение распространения волн радиостанций, как проходящих через область ионизации, так и отражаемых метеором, также способствует изучению метеорных процессов.

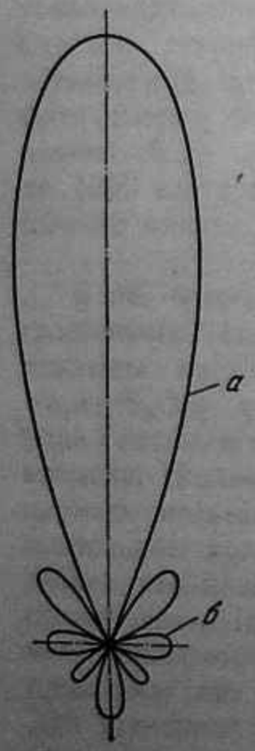


Рис. 72. Диаграмма направленности антенны:

а — главный лепесток; *б* — боковые лепестки.

Как мы знаем, радиометоды разделяются на активные, когда наблюдатель посылает и принимает радиоизлучение, и пассивные, когда он принимает радиоволны других источников, в том числе и радиоизлучение самого метеора и его следа.

В метеорной практике применяются радиоволны от 1 до 100 *м*, с излучением энергии отдельными импульсами или непрерывно, с мощностями от долей киловатта до 400 *квт*. Излучение может быть либо направленным в одну область неба (рис. 72) путем применения соответствующих антенн (рис. 73 и 74), либо (реже) ненаправленным. Радионаблюдения в комплексной программе сочетаются с визуальными, фотографическими, спектральными и другими видами наблюдений метеоров.

Отражения радиоволн (метеорные эхо или *радиометеоры*) на экране радиолокатора могут быть изображены отдельными импульсами на шкале времени, по положению которых можно определить расстояние до метеора (пространственно-временна́я развертка). Лучшие результаты дает развертка с модуляцией по интенсивности, когда метеорное эхо на экране дает светлое пятно, положение которого указывает расстояние, а при фоторегистрации на движущуюся пленку можно определить длительность эхо, а также скорость, направление движения, торможение и высоты метеора.

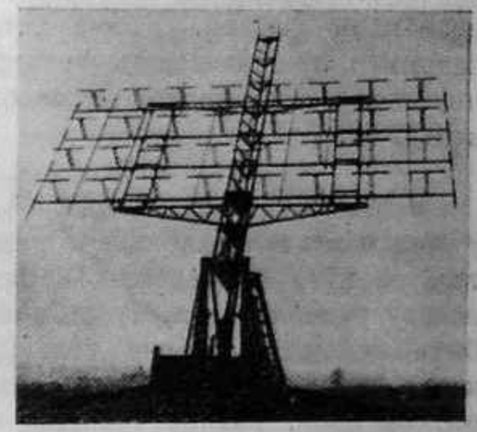


Рис. 73. Антенна с 32 диполями радиолокатора SCR-279-D, направленная под углом 45°, дает лепесток излучения 20° × 40°.

Радиометоды позволяют исследовать суточную и годичную вариации числа метеоров (зависящую также от λ и параметров станции, что осложняет задачу), их скорости, радианты и орбиты. Под влиянием диффузии и атмосферных ветров происходит расширение и смещение следа, прослеживаемое радиолокатором, что представляет интерес для метеорной геофизики. Ныне радиолокации доступны телеме-

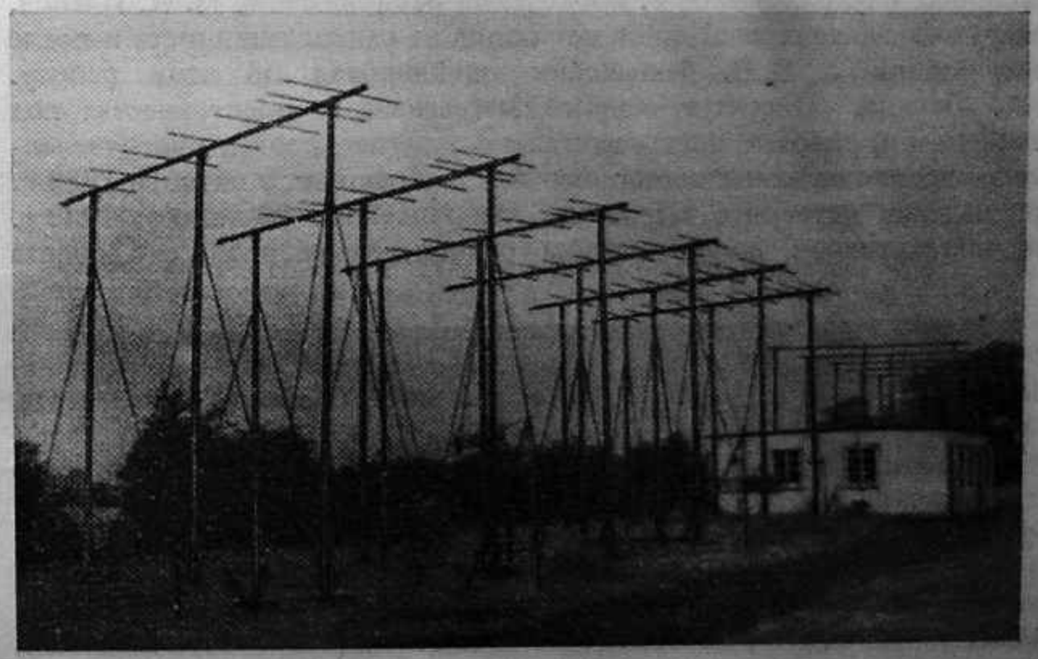


Рис. 74. Антенная система радиометеорной станции Манчестерского университета в Джодрелл Бэнк. Приемная аппаратура находится в здании.

теоры до 12—16 зв. вел. Вопросы механизма ионизации, ее интенсивность, поляризация следа, коэффициенты рекомбинации, электронная плотность, распределение максимумов по высоте и др. — важны для метеорной физики. Кроме того, радиометоды весьма эффективны, например, по сравнению с фотографией и более разносторонни, а также позволяют уже теперь исследовать скорости метеоров до $+10$ зв. величины.

§ 99. Развитие метода. А. С. Попов впервые в 1897 г. обнаружил изменение характера радиоприема при наличии постороннего тела на пути радиоволны и правильно объяснил его, положив тем основу радиолокации. Чтобы волна отразилась от тела, ее длина должна быть меньше размеров тела (из-за дифракции), поэтому радиолокация получила развитие лишь после освоения техникой ультракоротких волн. Распространение ультракоротких волн изучено в СССР Б. В. Введенским и В. А. Фоком, первое применение вращающихся направленных антенн осуществил М. А. Бонч-Бруевич. Советский радиолюбитель А. С. Астахов впервые высказал мысль о возможности обнаружить метеоры по радио. В 1925—1926 гг. он вел наблюдения полета метеоров в атмосфере при помощи радиоприемника. Длительность шумов, им описанная (от 1 до 5—6 секунд), вполне отвечает наблюдениям за шумами, происходящими при деионизации метеорных следов. В 1931 г. московский радиоинженер Н. А. Иванов, обнаружил влияние метеорной ионизации на радиослышимость и после консультации с В. В. Федынским опубликовал об этом работу. В. А. Леушин (Институт земного магнетизма и электричества под Ленинградом) впервые инструментально зарегистрировал многочисленные замирания во время метеорного дождя Драконид 9 октября 1933 г. При падении метеорита «Первомайский Поселок» 26 декабря 1933 г. при коллективном прослушивании радиопередачи в момент полета

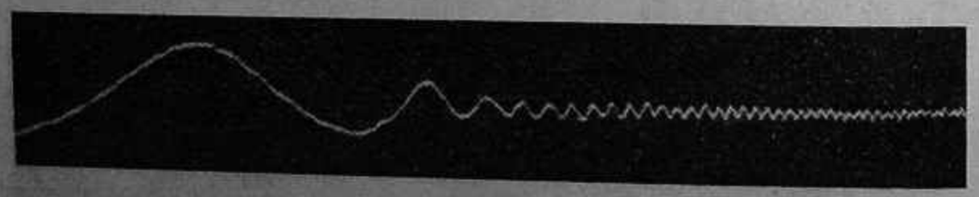


Рис. 75. Доплеровский свист приближающегося метеора (по оси ординат — сила поля приема, по оси абсцисс — время).

болида в репродукторе был отмечен «резкий свист». Теперь мы знаем, что это явление происходит при взаимодействии двух радиоволн — идущей от радиостанции и отразившейся от движущегося метеора. В 1941 г. Чаманлал и Венкатараман обнаружили это явление при пролете обычных метеоров и с 1947 г. эти «доплеровские свисты» широко используются при определении скоростей метеоров (рис. 75, 76).

В тридцатых годах начинается развитие импульсной техники, дающей возможность посылать десятки раз в секунду очень кратковременные (несколько микросекунд) импульсы, *пиковая мощность* которых в сотни раз выше средней мощности радиостанции; вследствие этого намного увеличивается радиус действия установки.

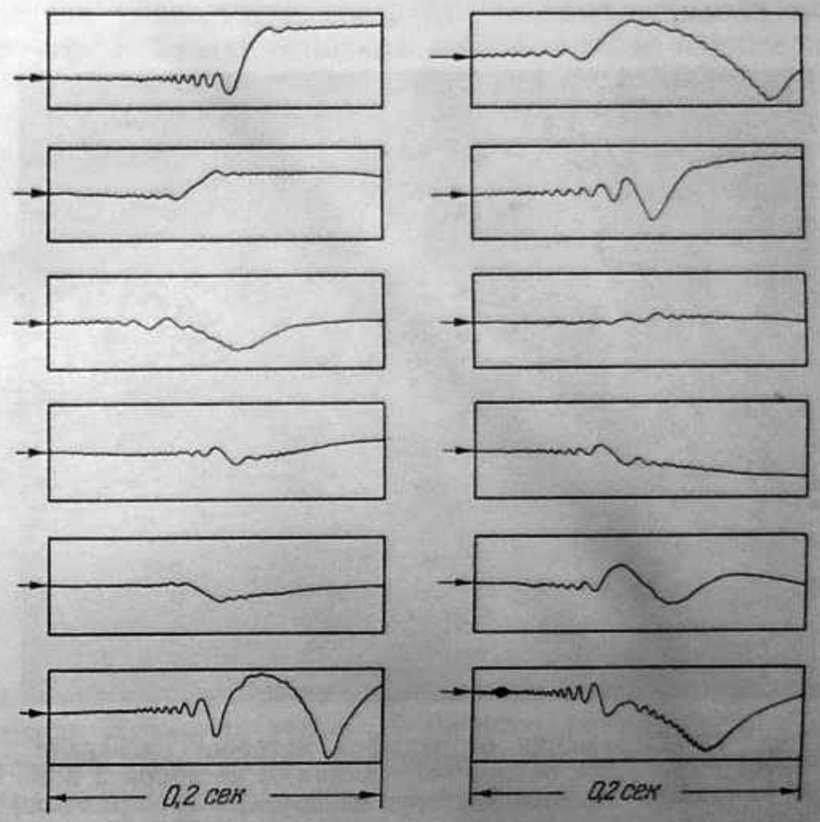


Рис. 76. Образцы записей дифракционной картины, полученные Мак-Кинли и Миллманом в Оттаве.

Электронно-лучевая трубка позволяет измерять ничтожные интервалы времени пробега радиоволны от станции до изучаемого объекта и обратно. На этом, как известно, основана работа ионосферных и радиолокационных станций (последние получили большое развитие во время второй мировой войны). Сначала применялись волны порядка десятка метров, между прочим, хорошо отражавшиеся от метеоров и их следов и потому даже вводившие в заблуждение радиооператоров. Затем, по мере применения меньших длин волн, уменьшились и габариты антенн, стали применяться параболические зеркала; вращая их, можно было заставлять радиолуч обегать пространство подобно лучу маяка. Так возникли локаторы с «трубками кругового обзора». Только очень яркие метеоры с высокой электронной концентрацией могут дать отражение на экране такой трубки (рис. 77), так как волны с $\lambda < 2$ *м* хуже отражаются — они слишком «жестки»

для электронных следов. В конце войны радиолокационные станции Англии по предложению Эпплтона были использованы для наблюдений метеоров. Было собрано много ценных наблюдений. Так, в Слоу, с конца 1943 г. велись круглосуточные наблюдения в течение всего года; максимум метеорных эхо падал на полдень, годичные максимумы — на периоды больших потоков; 90% эхо были на высоте $H = 108 - 87$ *км*.

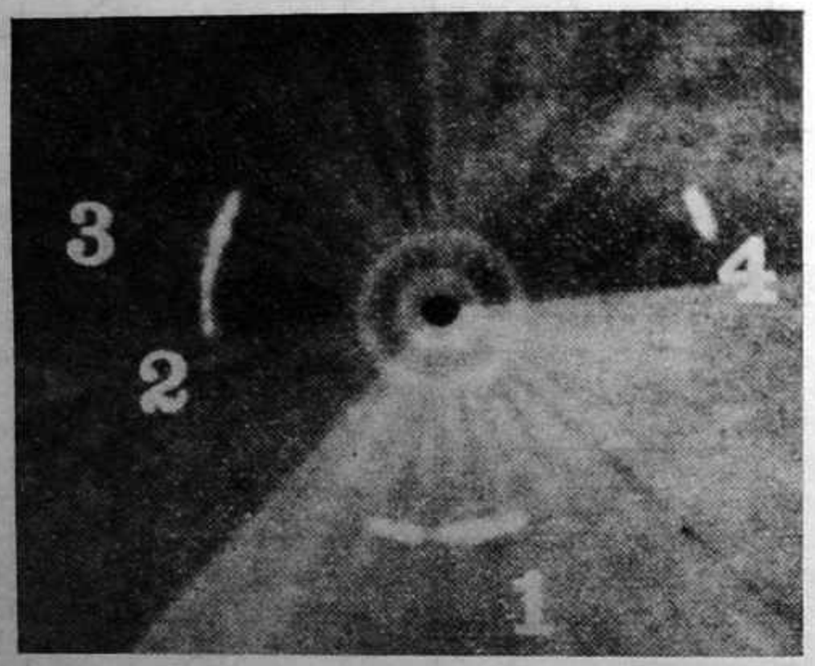


Рис. 77. Отражения от четырех метеоров на экране трубки кругового обзора (отражения от метеоров 2 и 3 наложились друг на друга).

Тогда же Хей и Стьюарт впервые нашли, что на экране видны эхо от метеоров слабее 6 величины. Эти исследователи начали работу с октября 1944 г. на волнах 4—5 *м*, при пиковой мощности импульса 150 *квт*; часовое число метеоров оказалось $n_h = 10$. В 1945 г. направленное излучение трех английских станций в Ричмонде, Уолмере и Альдебурге было сконцентрировано в одной области пространства на высоте $H = 100$ *км*. Из 2000 радиоэхо оказались общими только четыре. Это объяснилось тем фактом, что на волнах короче 10 *м* отражение от следов метеоров происходит зеркально и попасть обратно на станцию оно может лишь при падении волны под прямым углом к траектории. Хей и Стьюарт использовали затем это явление для определения радиантов.

В августе 1947 г. в Ашхабаде на $\lambda = 4$ *м* было найдено, что яркие метеорные следы, видимые несколько секунд, отражают также и по другим направлениям, т. е. диффузно. Из комбинации визуальных наблюдений, дающих угловую высоту, и радарных, дающих расстояние, там же было определено в 1947—1948 гг. свыше ста высот метеоров разных типов.

В США по окончании войны были испробованы установки, излучающие λ от 3 *м* до 3 *см*; было найдено, что сантиметровые и дециметровые волны для метеоров непригодны, так как они слишком «жестки» и пронизывают насквозь метеорные следы. Впоследствии Стэнфордский университет построил специальную радиометеорную обсерваторию. В Канаде основные работы в этой области принадлежат обсерватории доминиона в Оттаве, в Англии — Манчестерскому университету, построившему радиоастрономическую обсерваторию в Джодрелл Бэнк.

Рис. 78. Метеорный дождь Драконид 9—10 октября 1946 г., записанный на пленку с экрана радара Радиоисследовательской станции Слоу (Англия).

Мощный толчок развитию радиометеорных исследований дал метеорный дождь Драконид утром 10 октября 1946 г. (рис. 78), максимум которого (3 ч. 45 м. мирового времени) оказался лишь на 9 минут ранее предвычисленного Кэннингемом. Наблюдения радиолокаторами велись в СССР, Чехословакии, Англии, Канаде, США. Наблюдалось до 168 эхо в минуту; в Англии было открыто отражение от головы метеора («бегущее» или «головное» эхо), наблюдалось возникновение спорадического E-слоя ионосферы. Впервые была найдена (Хей) радиоскорость метеоров по бегущему эхо ($22{,}9 \pm 1{,}3$ *км/сек* против теоретической 23,7 *км/сек*).

С 1944 г. начались работы по радионаблюдениям метеоров в Ашхабаде, с 1947 г. — радиоопределения их высот, часовых чисел и радиолокация следов в сочетании с фотографическими, спектральными, телескопическими и визуальными работами.

С 1947 г. начаты серьезные работы Миллманом и Мак-Кинли в Оттаве, где были построены три базисные станции.

С 1948 г. радиолокация метеоров становится доступной даже любителям: описана установка, излучающая на $\lambda = 11$ *м*, с которой за два месяца получено 150 эхо и найдена суточная вариация среднего расстояния (209 *км* утром — 121 *км* вечером), вызванная дневной ионизацией.

С 1949 г. в Калифорнии автоматической радиометеорной обсерваторией Стэнфордского университета регистрируются расстояния и скорости метеоров до 7—8 величины. В СССР, кроме Ашхабада, с 1955 г. радиолокационные наблюдения метеоров ведутся в Казани (К. В. Костылев), Томске (Е. И. Фиалко), с 1956 г. — в Сталинабаде (Л. Н. Рубцов), Харькове (Б. Л. Кащеев), с 1957 г. — в Одессе и в Киеве.

§ 100. Методика исследования. Мы предполагаем у читателя общее знакомство с принципом радиолокации. Напомним, что радиоволнами условно названы электромагнитные колебания на диапазоне 10^4 — 10^{12} *гц*, т. е. от 30 000 *м* до 0,3 *мм*. Радиолокационные методы разделяются на две основные группы — системы импульсные и системы с непрерывным излучением. Последние могут работать или незатухающими колебаниями или колебаниями, где изменяется (модулируется) частота, амплитуда или фаза. В изучении метеоров применяются обе системы для определения расстояния и скорости полета метеоров или только скорости, а при добавочных приспособлениях — и направления.

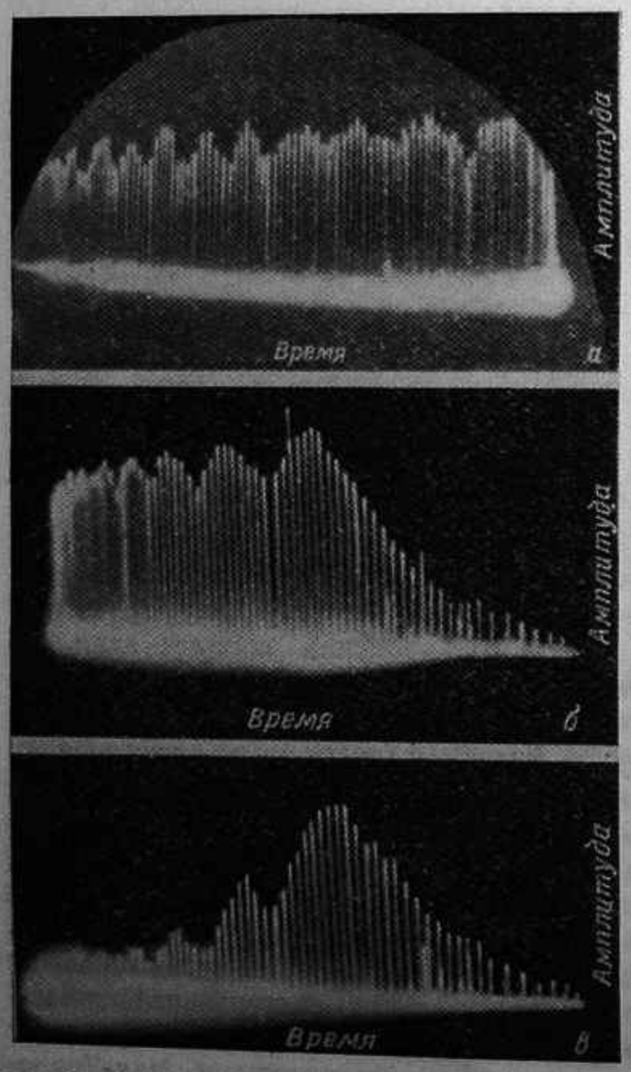


Рис. 79. Прохождение зон Френеля от метеора при применении импульсного метода (по Эллиэтту и Дэвису).

В 1948 г. Эллиэтт и Дэвис в Англии обнаружили предсказанное Херлофсоном явление дифракции радиоволн от метеорного цилиндра, аналогичное дифракции света от щели. Отражаясь от формирующегося следа, радиоволны в приемнике интерферируют. Таким образом, при полете метеора со скоростью v через приемную станцию как бы проходят зоны Френеля (рис. 79, 80) со скоростью, зависящей от кратчайшего расстояния до метеора r_0 и от скорости метеора v, которую отсюда можно найти. Из наблюдений силы поля приема находится величина амплитуды и промежуток между максимумами.

Сила поля приема E при полете метеора зависит от положения метеора относительно наблюдателя (ориентировки следа), поэтому на экране амплитуда сигнала будет варьировать. Эти вариации выражаются через интегралы Френеля C и S волновой теории, как показал в 1948 г. Ловелл, следующим образом:

$$E = E_0(C^2 + S^2) \ldots \quad (1)$$

По мере приближения метеора колебания возрастают по амплитуде и уменьшаются по частоте. На кратчайшем расстоянии r_0 до метеора в точке A_0 эти величины проходят через нуль и при удалении метеора повторяются в обратном порядке. Для их регистрации можно применить разные способы. Например, в Оттаве (Канада) передающая станция, излучающая незатухающие колебания, находится за несколько километров, чтобы ее излучение («земная волна») не «забивало» излучения, отразившегося от метеора («небесной волны»), но вместе с тем земная волна создает поле приема E_1; если ψ есть угол фазы между этой волной и небесной, то мгновенная интенсивность $E_{0,1}$ от действия обеих волн будет:

$$E_{0,1} = (E_0C + E_1\cos\psi)^2 + (E_0S + E_1\sin\psi)^2. \quad (2)$$

Практически наличие земной волны облегчает замеры. Так как частота вариаций обычно лежит в акустическом диапазоне, то амплитудные вариации называют «доплеровским свистом» (рис. 75 и 76). Иногда число колебаний — свыше сотни; первые из них используются для того, чтобы привести в действие автоматику фоторегистрации. При измерении колебаний для получения скорости v метеора по 10—12 колебаниям, ближайшим к нулевому, нужно применять строгую теорию дифракции, а для прочих так называемое приближение Коши. Тогда скорость $v = a\sqrt{\lambda r}/t$, где $2t$ есть промежуток между смежными максимумами, а $a \approx \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$. Мы видим, что в этом выражении надо знать расстояние r до метеора; таким образом, требуется вторая установка, являющаяся собственно радиолокационной (рис. 81). Она также включается в действие автоматически, когда, например, интенсивность отраженной радиоволны превзойдет наперед заданный предел. Чтобы посторонние помехи не заставляли автоматику «срабатывать» зря, применяется дискриминатор, задерживающий включение, если наблюдаемый сигнал вызван не метеором. В течение двух ночей декабря 1947 г. в Англии описанным дифракционным методом впервые была определена скорость 14 геминид (35,9 *км/сек*), совпавшая с фотографическими данными (36,0 *км/сек*), на получение которых в США ушло несколько лет.

Применение этого метода к Квадрантидам 3—4 января 1948 г. подтвердило наличие двух потоков с разными скоростями, открытых за два года до того Л. Г. Елисеевой [421] в Ашхабаде.

Станция в Джодрелл Бэнк (рис. 74) применяет не непрерывное излучение, как например канадская станция в Оттаве, а импульсами, но с большей частотой (600 раз в *сек*), причем наблюдается серия зон Френеля *после* прохождения точки A_0, ближайшей к станции. На каждую зону приходится по нескольку импульсов (рис. 79). Так же, но

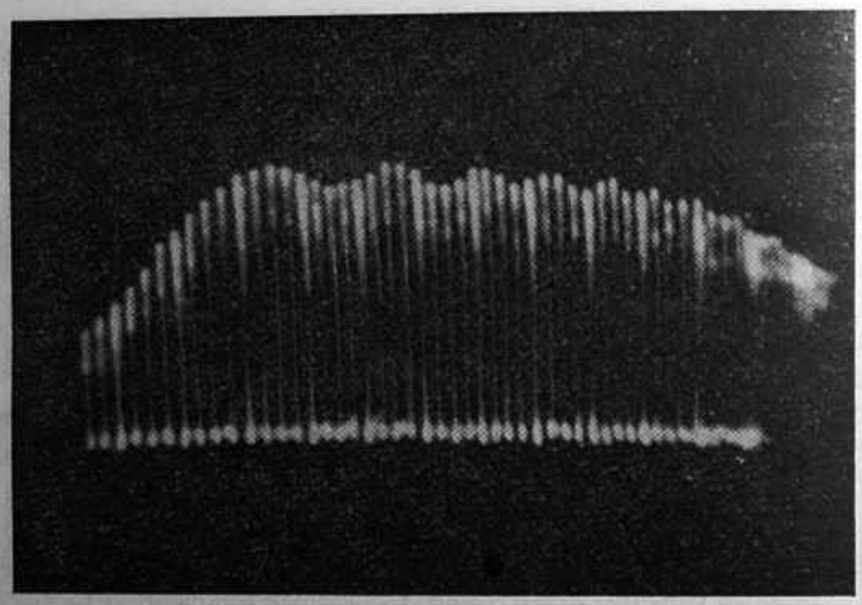


Рис. 80. Измерение скоростей метеоров дифракционным методом (Харьковский политехнический институт, Б. Л. Кащеев, Геминиды 1957 г.).

с частотой посылок 500 раз в секунду работает станция Харьковского политехнического института (Б. Л. Кащеев) (рис. 80).

Канадская станция излучает непрерывно с мощностью $P = 1{,}5$ *квт* на частоте $f = 30$ *Мгц* (волна $\lambda = 10$ *м*), так как опытом найдено, что индустриальных помех значительно меньше на частотах выше 20 *Мгц*. Полуволновой горизонтальный вибратор (диполь) поднят над почвой на $\frac{1}{4}\lambda = 2{,}5$ *м*. Приемная станция находится за 7,5 *км*, приемный диполь ее параллелен первому и оси обоих составляют продолжение одна другой, чтобы предельно ослабить земную волну. На пленку, фотографирующую экран, впечатываются марки времени (0,1 и 1,0 *сек*) и калибровка частоты 100 *гц* для контроля измерения частоты «свиста», по которому находится скорость v. Расстояние отдельно находится локатором. Особое радиотехническое устройство позволяет на экране создавать как бы оттенение эхо и тогда по длине «тени» легче судить об интенсивности разных его частей.

В Стэнфордском университете (Калифорния) на радиометеорной станции, расположенной за городом, тоже применяется техника незатухающего излучения. При этом также удавалось регистрировать отражения от движущейся головы метеора. Для определения скорости здесь измеряется высота звука, дающая частоту, в свою очередь определяющую промежуток времени t между прохождением максимума и минимума зоны Френеля.

В Оттаве записывается полностью вся кривая прохождения зон как до, так и после точки A_0, следовательно, записать можно гораздо большее число метеоров. Например, Миллман приводит для Оттавы [192] в 1954 г. опубликованные данные о средней скорости $v = 44{,}7$ *км/сек* по 11 073 метеорам и для Джодрелл Бэнк $v = 44{,}7$ *км/сек* только по 1838 метеорам *). Кроме того, запись со «смешением» земной и небесной волны до точки A_0 позволяет исследовать метеорный след до того, как он сместится действием воздушных течений. Это смещение за доли секунды может быть порядка длины волны λ и поэтому сильно искажает запись после прохождения метеором точки A_0.

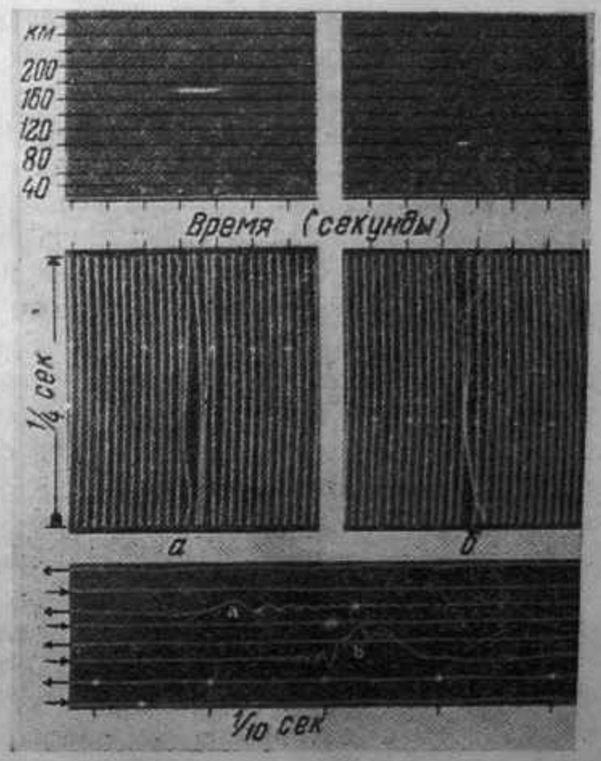


Рис. 81. Радиолокационные определения расстояния (вверху) и доплеровские свисты двух метеоров со скоростями 28 и 47 *км/сек* (по Миллману, Канада).

Имея три радиометеорные станции, каждая из которых позволяет найти расстояние до метеора, можно определить пространственное положение метеора, его траекторию и радиант. Наиболее удобно это можно сделать для тех метеоров, которые дают бегущее (головное) эхо, либо же при работе на волне $\lambda > 8$ *м*, когда отражение волны происходит уже не зеркально, а диффузно. Тогда расстояние метеора r известно для каждого момента от каждой станции. Следовательно, можно построить его траекторию и найти скорость в зависимости от расстояния $\left(\text{годограф } v = \frac{1}{\Delta t}\sqrt{r^2 - r_0^2}\right)$.

*) Как видим, оба эти определения хорошо совпадают. Заметим, что среднее из визуальных определений в Ашхабаде в 1943 г. (гл. 14) [424] дало еще в 1949 г. $v = 48$ *км/сек* ($n = 4000$).

Первый пример обработки наблюдений бегущего эха из трех станций в 1948 г. дали Миллман и Мак-Кинли: была найдена траектория и скорость дневного пегасида. Используя разность моментов t_0 для одного и того же метеора, отмеченных на разных станциях, можно независимо найти $v = \frac{A_{01}A_{02}}{\Delta t}$, где $A_{01}A_{02}$ — длина пути метеора между основаниями перпендикуляров r_{01} и r_{02}, опущенных из станций на его траекторию. В отличие от предыдущего способа, пригодного лишь для особо ярких метеоров (а их менее $2^0/_0$), здесь используется зеркальное отражение даже от телескопических объектов.

При этом маркировку времени нужно иметь с относительной точностью до 0,0001 сек. на всех трех станциях.

В 1953 г. Уэллс предложил использовать для нахождения v пересечение метеором зон интерференции двух вибраторов с узким лепестком излучения. Но лишь продолжительные метеоры могут пересекать две смежные зоны; метод дал низкую точность определения v.

В 1953 г. Дэвис в Джодрелл Бэнк дал наиболее совершенный способ, определяющий не только v метеора, но и его радиант R; три станции (одна передающая) расположены треугольником на расстоянии около 4 *км* одна от другой. Принимая отражение от метеора на всех трех станциях, по разности времен его прихода определяется направление и скорость полета. Уже в 1955 г. можно было получать за час 6—8 индивидуальных векторов, пригодных для определения орбит. Следовательно, установкой Дэвиса этим путем чрезвычайно эффективно разрешается одна из основных задач изучения метеоров — определение вектора их скорости. В технические подробности этих радиоустановок, достаточно сложных, потребовавших много изобретательности и остроумия, мы здесь вникать не можем и ограничиваемся лишь их принципиальной стороной. Рассмотрим лишь для примера работу импульсного радиолокатора.

§ 101. Импульсная техника. Импульсный радиолокатор должен передавать кратковременные, длительностью в микросекунды (!) импульсы с такой частотой, чтобы число этих отражений было бы достаточным за время видимости метеора (50—1000 импульсов/*сек*). Следовательно, нужен генератор импульсов и генератор частоты повторения, работа которого синхронизирована с излучением основного импульса. Нужную форму и длительность импульса создает модулятор. Передает их в эфир третий узел установки — импульсный передатчик, через специальную антенну, устройство которой зависит от назначения станции. Пока не возвратилась отраженная волна, особое автоматическое устройство выключает передатчик, и эта волна принимается на ту же антенну, откуда ее энергия попадает в приемник, который должен иметь нужную настройку и широкую полосу пропускания, чтобы принять возможно больше энергии отраженной волны (эта энергия, вообще говоря, ничтожна). На выходе приемника принятое эхо детектируется и усиливается. После этого импульс-эхо подается на катодно-лучевую трубку. Для того чтобы заставить бегать ее световое пятно, надо осуществить развертку, что достигается генератором, синхронным с генератором частоты повторения. Трубка с усилителем изображения (видеоусилителем) и развертывающим устройством называется индикатором. На экране индикатора мы видим основной импульс A и его эхо — отражение от метеора.

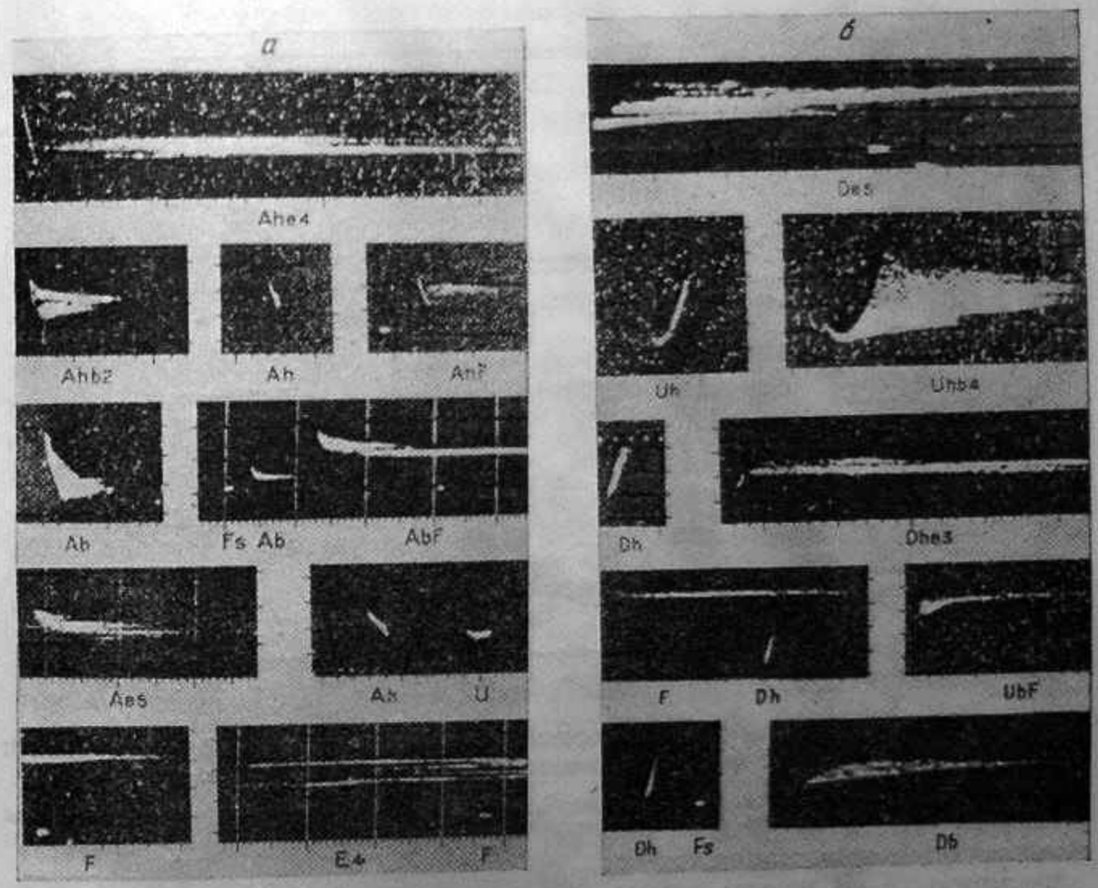


Рис. 82. Фотографии типичных радиоэхо от метеоров (яркостная модуляция). Вертикальный масштаб: 1 деление = 20 *км*, горизонтальный: 1 деление = 1 *сек* (по Миллману).

Расстояние между ними пропорционально удалению от метеора и может быть прямо отмечено на шкале расстояний в километрах тут же на экране. Если надо вести фоторегистрацию, то можно поставить ширму, закрывающую развертку, так, чтобы из-за ширмы выступал лишь отраженный импульс-эхо (радиометеор), и непрерывно протягивать киноленту перпендикулярно к линии развертки: тогда на ней по ее длине будет отложено время, а по ширине — расстояние до метеора (рис. 82 и 83). Этим путем записываются также гиперболические эхо от головы метеора.

Приемник должен обладать наивысшей чувствительностью, определяемой в основном уровнем шумов первого каскада усилителя высокой частоты, в свою очередь определяемых тепловым движением электронов. Мера того, насколько данный приемник хуже идеального, в котором действуют только тепловые шумы, называется шумовым

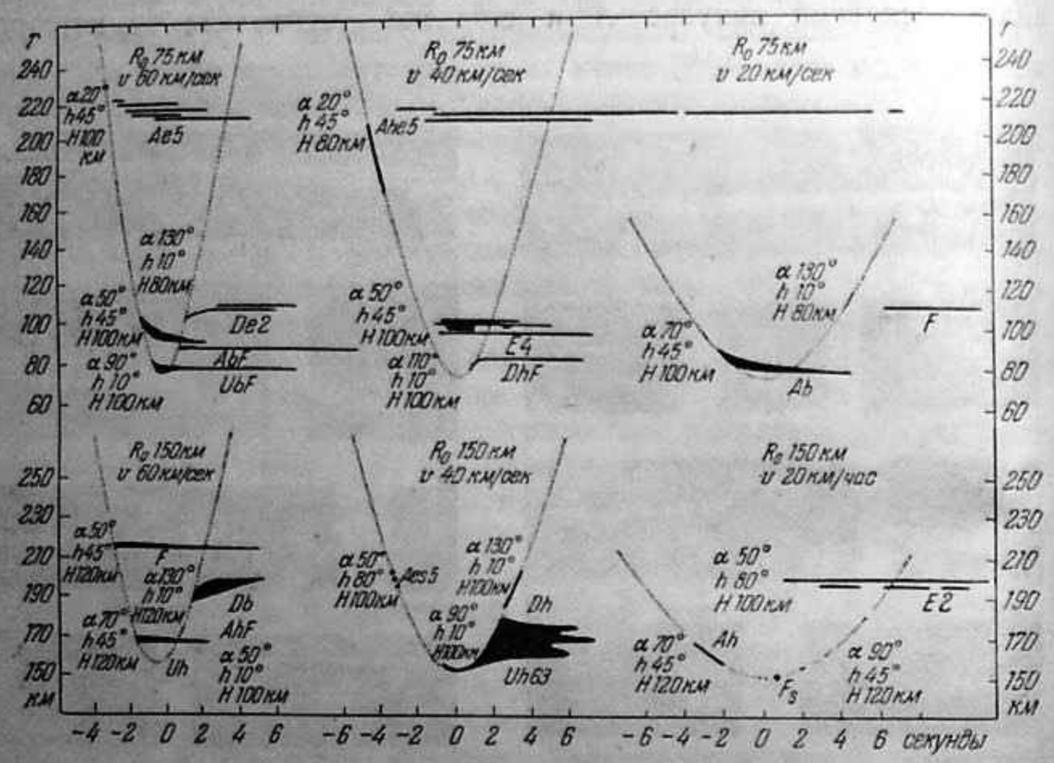


Рис. 83. Диаграммы «время — расстояние» для метеоров различной скорости и типичные формы радиоэхо от метеоров и их следов.

Верхний ряд — при R_0=75 *км*, нижний — при R_0=150 *км* (α — угол между траекторией и лучом зрения, *h* — высота радианта, *H* — высота метеора).

фактором N. В нашем случае можно довести N до 1,3—1,9 децибел. Мощности и напряженности поля при этом имеют порядок 10^{-13} *вт* и 10^{-6} *в*. Для сравнения заметим, что это соответствует энергии одного рентгеновского кванта и напряжению биотока в мозгу человека. Используя дифракцию волн, можно излучение вибраторов антенны дать в одном направлении, усилив его в G раз по сравнению с изотропным излучателем. Обычно G — порядка нескольких десятков. При идеальной радиопередаче создаваемая на расстоянии r *км* сила поля E передатчиком мощностью P *квт* относительно изотропного излучателя будет $E = 222\sqrt{2PG}/r$ *милливольт/метр*. Свойство направленного действия антенны принято характеризовать формой «диаграммы направленности», проведенной через точки, где энергия падает наполовину (рис. 72). Она имеет вид вытянутого лепестка, угловая ширина

которого $2\beta = \arcsin\left(\frac{0{,}61}{\rho}\lambda\right)$. Это известная формула диаметра дифракционного изображения звезды (диска Рэлея), если ρ — радиус объектива. В данном случае ρ — половина длины антенны.

Как в оптике нельзя избавиться от дифракционных колец, так и здесь нельзя уничтожить побочные «лепестки», поглощающие часть энергии и создающие паразитные отражения. В метеорной радиоастрономии лепесток может быть направлен вертикально или наклонно; в последнем случае он проходит большую толщу атмосферы и даст больше отражений, так как встретит больше метеоров. При падении радиоволны λ на метеор имеет место также оптическая аналогия. Если метеор рассматривать как проводящий шар радиуса ρ, то при $\rho \ll \lambda$ эквивалентная рассеивающая поверхность $A = 2\pi\rho^2\left(\frac{2\pi\rho}{\lambda}\right)^4$ и рассеяние происходит обратно пропорционально λ^4 (закон Рэлея); при $\rho \gg \lambda$ $A = \pi\rho^2$ и рассеяние не зависит от угла падения. Когда ρ и λ сравнимы, то при изменении $\frac{2\pi\rho}{\lambda}$ от 2,0 до 10 величина $A/\pi\rho^2$ изменяется в пределах от 0,7 до 1,4 шесть раз, стремясь к 1. Мы еще встретимся с этим явлением, рассматривая рассеяние света в пылевых следах метеоров. Мощность, воспринятая приемной станцией после отражения от метеора, есть $P_A = PGgA\lambda^2/64\pi^3r^4$, где g — коэффициент отражения от следа в данном направлении. Эта мощность должна соответствовать порогу $P_{пор}$ чувствительности, откуда находится дальность действия $r_{max} = \sqrt[4]{\frac{PGgA\lambda^2}{64\pi^3P_{пор}}}$. Например, дальность различения метеора, оставившего след с эффективной площадью $Ag = 1000$ *м*^{2}, при волне $\lambda = 15$ *м*, пиковой мощности $P = 10$ *квт*, шумовом факторе $N = 1{,}4$ децибел, полосе частот шириной $\Delta f = 0{,}4$ *мгц*, коэффициенте различимости сигнала $w = 1{,}5$ для горизонтально направленного излучения на пороге $P_{пор} = 10^{-13}$ и $G = 20$ (любительская установка), будет $r_{min} = 145$ *км*. На $\lambda = 15$ *м* ныне можно излучать $P = 1000$ *квт*; применяя малое G для возможно большего (тысячи квадратных радиусов) охвата неба ($G \sim 6$—10) при вертикальном излучении $r = H = 100$ *км* профессиональный приемник с $P_{пор} = 10^{-14}$ *вт* может принять эхо метеора, отразившееся от площади всего в $Ag = 0{,}2$ *м*^{2}. Однако надо помнить о том, что на волнах 2—20 *м* большое количество энергии идет от Солнца и из Галактики. Поэтому небо создает свою «шумовую» температуру $T = 14 \cdot \lambda^3$ °K или при $\lambda = 6$ и 12 *м* соответственно 3000° и 24 000 °K, которая может быть раза в два меньше или раз в пять больше в зависимости от направления оси антенны. При $\lambda \geqslant 15$ *м* из-за рассеяния радиоволн земная атмосфера начинает терять свою радиопрозрачность и тут начинают сильно сказываться помехи тропических гроз — атмосферики.

Представим себе, что мы способны видеть «радиоглазами» на диапазоне 4—6 *м*. Тогда дневное небо было бы таким же черным,

как и ночное, за исключением областей Млечного Пути, излучающих бледное сияние. Область центра Галактики была бы пятном, лишь вдвое менее ярким, чем Солнце с его короной, которое казалось бы сильно сплюснутым и размытым. В случае работы радиолокатора были бы видны метеоры до 7—10 величины, причем слабые — в виде коротких черточек около полуградуса длины, чрезвычайно кратковременные ($\tau = 0{,}02$ *сек*), мелькающие в 90° от радианта в количестве нескольких в секунду, либо на всем небе, облучаемом станцией (идеальный случай), либо временами вспыхивающие в той области, куда направлено излучение антенны. За пределами этой области изредка поблескивали бы крупные метеоры; 2% их были бы похожи на «оптические» метеоры и имели бы большую длину пути; отражения у них изотропны от головы — это те, которые дают «гиперболическое эхо». Иногда без видимого полета метеора где-нибудь на небе возникала бы светящаяся полоска — это отражение от следа, видимое от секунды до нескольких минут. Подчас такая полоска делалась бы видимой лишь 3—20 секунд спустя после пролета метеора, когда ее ширина из-за диффузии стала бы достаточной для отражения радиоволн. Положения радиометеоров и их следов было бы трудно фиксировать, так как обычные звезды на этом небе не видны. Ярко выделялись бы радиоисточники Лебедь-А и несколько других и лишь для мощного радиоглаза на пределе виднелись бы 2—3 тысячи радиотуманностей («радиозвезд»). Собственное радиоизлучение ярких метеоров мы смогли бы иногда наблюдать без радиолокатора на длинных волнах.

§ 102. Пассивные методы. Систематические наблюдения над метеорными свистами на фоне передач какой-либо работающей радиостанции в СССР были начаты в Ашхабаде в 1944 г. в эпоху Леонид. Наблюдения велись визуально, причем у наблюдателя были наушники от приемника прямого усиления. В августе 1945 г. наблюдения были продолжены, частично на фоне радиостанции Ашхабад. Персеиды —2 величины и ярче иногда давали одновременно явственный звук в приемнике типа легкого свиста, либо серии щелчков [154]. Таким образом, кроме ожидавшегося доплерова свиста было обнаружено *собственное радиоизлучение* метеоров, о чем будет сказано в гл. 28. Со свистами оказалось 0,5—1% метеоров. В эпоху Леонид 14 ноября 1945 г. «радиоакустичными» оказались два метеора из 33. Совершенно независимо от этих наблюдений с октября 1944 г. Ю. Н. Хлюстов в Заполярье начал свой ряд радионаблюдений, законченный в 1948 г. Ему удалось найти, что при деионизации следа на волнах $\lambda = 25$—40 *м* наблюдается быстро слабеющий шум в течение 5—10 секунд. Этот вопрос мы рассмотрим особо в гл. 28.

Доплеровы свисты метеоров на фоне радиопередач вообще известны довольно давно, но ими никто не занимался. Они отмечены, в частности, в 1921 г. Пикаром, как «атмосферики», Далькамбр

сообщил об «изменяющемся свисте» при полете болида 14 ноября 1928 г. в Атлантическом океане. В Индии в 1941 г. Чаманлал и Венкатараман обнаружили, что на фоне близкой мощной радиостанции их вообще можно наблюдать каждую ночь, особенно под утро. Они прослушивали станцию Радио-Дели за 16 *км* на волне $\lambda = 43$ *м*. Длительность свиста была от 0,2 до нескольких секунд; высота его быстро спадала, что тогда приписывалось торможению метеора. Иногда, пройдя через нуль, высота тона вновь нарастала. Гаррат на месте ознакомился с условиями наблюдения: свисты хорошо слышались на немодулированной частоте ($\lambda = 20$—60 *м*) на высокочувствительном приемнике. Он должен быть достаточно удален для ослабления земной волны. С 1943 г. в Индии их наблюдал Хастгир. В 1946 г. наблюдения над свистами были поставлены в США во время максимума Драконид 10 октября, когда Пирс отметил 3500 свистов. Улучшение техники за последующие годы позволило наблюдать свисты у метеоров до $+3$ зв. величины и записывать их на пленку магнитофона. В 1947—1948 гг. Миллман произвел 50 000 таких записей, ныне доступных даже радиолюбителям. Измеряя эти записи как записи волн Френеля, можно с достаточным приближением получить значения скоростей метеоров. Но так как при этом нельзя найти направление полета или положение траектории, то применимость метода ограничена, хотя он не требует громоздкой аппаратуры и вполне доступен большому кругу исследователей. Этот метод важно сочетать с параллельными визуальными наблюдениями.

§ 103. Другие исследования. Около 1947 г. несколько радиофизиков [298] обратили внимание на то, что на коротких волнах (15—20 *м*) возможна радиосвязь на расстояния 1000 *км* и более за счет отражений от метеоров, непрерывно появляющихся на линии связи в слое E (рис. 84). Сейчас разрабатываются установки для коммерческого использования этого явления: записанное с нормальной скоростью сообщение при появлении метеора автоматически передается в эфир с большой скоростью, пока отражение не прекратилось, затем оно передается при следующей «вспышке слышимости» и т. д. Можно доказать, что при этом отражение радиоволн производят вообще не ионы, а свободные электроны. Николе [302] и другие (1954 г.) полагают, что ночная концентрация электронов в E-слое ($N \approx 10^4$ *см*$^{-3}$) непрерывно поддерживается метеорами, без чего из-за рекомбинаций ночью слой E должен был бы исчезнуть. Во время дождя Драконид 1946 г. метеоры вызвали появление спорадического слоя $E_{сп}$; Эпплтон и другие склонны также приписывать метеорам возникновение $E_{сп}$. Если одновременно регистрировать на ленте не только амплитуды отраженных сигналов, но и фазы, как это предложили Маннинг, Виллард и Петерсон [306], то можно обнаружить сдвиг фазы из-за смещения следа, т. е. его атмосферный дрейф. Гринхоу в Англии, используя не непрерывное излучение, как в предыдущем

случае, а импульсное с частотой 600 импульсов/*сек*, с 1954 г. регистрирует радиальное смещение следов [302]. Если, например, изменение фазы на 360° произошло за 21 импульс, т. е. за $\Delta t = \frac{1}{600} \cdot 21 = 0{,}035$ *сек*, то это значит, что на расстояние длины волны $\lambda = 8$ *м* след сместился за время Δt, откуда скорость дрейфа $v_d = \lambda/\Delta t \cong 230$ *м/сек*. Повернув антенну на 90°, можно получить вторую компоненту ветра, для чего достаточно всего 10 минут, так как за сутки получается до 3500 значений дрейфа, который, таким образом, определяется очень уверенно. Обнаружены постоянная слагающая ветров с сезонной вариацией, а также суточная и полусуточная волны, подтвердившие прежние визуальные определения в СССР [185, 302].

За последнее время исследовалась поляризация метеорных следов. Диэлектрическая постоянная ε, определяющая отражение, равна $1 - Ne^2/\pi m\nu^2$, где e — заряд электрона, m — его масса, N — электронная концентрация и ν — рабочая частота излучения. Для $\nu = 10$—100 *Мгц* ε изменяется от $\varepsilon = +1$ вне следа до $\varepsilon < 0$ внутри следа. Посылая плоско-поляризованную радиоволну, можно видеть, что отражение будет неодинаковым, когда плоскость поляризации параллельна следу или перпендикулярна к нему. Отношение амплитуд эхо характеризует степень поляризации следа, причем сам след играет роль поляризатора.

В 1953 г. Кайзер дал теорию распределения по высоте наблюдаемых эхо от метеоров, зная вид диаграммы направленности антенны. Оказалось, например, что число отражений на данной высоте H определяется скоростью метеоров v. Высота H_{max}, где электронная плотность наибольшая, связана с атмосферным давлением p_m и физическими свойствами метеорного тела. Отсюда можно было найти данные о свойствах атмосферы, имеющие геофизическое значение. Получение этих данных составляет одну из важных задач радиолокации в метеорной геофизике. Для определения высоты H следа Клегг и Дэвидсон применили остронаправленную антенну, ведя прием на два диполя, расположенных на $\frac{1}{2}\lambda$ и $\frac{1}{4}\lambda$ над почвой. Тогда отношение напряжений в обеих антеннах меняется в зависимости от угловой высоты следа h, а, зная расстояние r, можно определить высоту $H = r \sin h$ с точностью до 1 *км*. Далее, измеряя минимальные r_m для метеоров известного потока, можно найти H и его изменение в течение суток. Этим путем Вольмер [316] в Медоне на волне 4 *м* в 1953 г. нашел, например, что более круто падающие метеоры глубже проникают в атмосферу (что было уже известно из визуальных наблюдений).

Наблюдаемая амплитуда метеорного эха должна быть исправлена за диаграмму излучения антенны и приведена к стандартному расстоянию ($r_0 = 100$ *км*). Она определяется погонной плотностью α электронной концентрации на 1 *см* длины следа, в свою очередь зависящей от массы и скорости метеорного тела (Ловелл, Клегг, Херлофсон). В силу диффузии, дрейфа и турбуленции след деформируется; так как, кроме того, из-за рекомбинации уменьшается число электронов, то разрушение следа идет быстро. Пирс еще в 1940 г. из наблюдения прекращения отражения от следа на разных частотах смог получить видимый (без учета диффузии) коэффициент рекомбинации k в следе. Действительно, пусть убывание концентрации идет по закону $N = N_0 e^{-kt}$. Тогда, зная N_1 и N_2 соответственно для моментов t_1 и t_2 из критической частоты, при которой прекращается отражение, можно найти k. Оно оказалось много меньше, чем в E-слое, так как

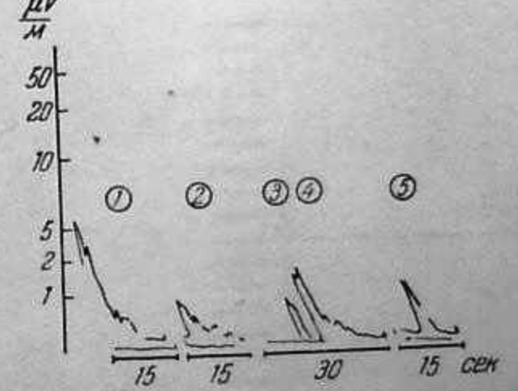


Рис. 84. «Вспышки слышимости» при радиоприеме на частоте 44 *Мгц*, вызванные метеорной ионизацией на пути радиолуча.

Запись силы поля приема (микровольты/метр) для пяти вспышек: *1*, 2 и *4* — от высоких, *3* и *5* — от низких метеоров (по Аллену, 1953 г.).

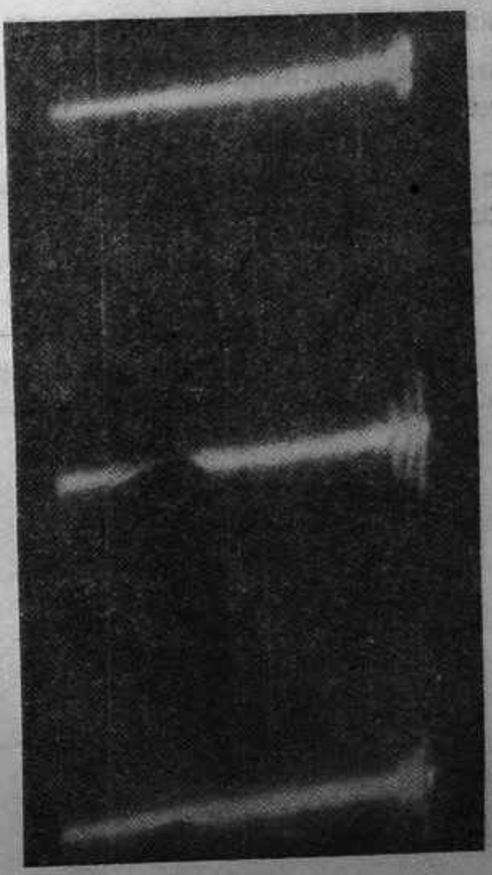


Рис. 85. Киносъемка экрана радиолокатора на частоте 9 *Мгц* (Ашхабад, Гемениды, 12 декабря 1953 г.). Между кадрами — $\frac{1}{6}$ *сек*. Видны радиоэхо от метеоров, появившихся пачкой (справа).

след перенасыщен электронами и им трудно найти положительные ионы. Видимое свечение следа вызвано «высвечиванием» ионов, поэтому длительность его не совпадает с длительностью эха на экране: последнее длится дольше и потому «радиоследы» при высокой чувствительности современной аппаратуры локализуются даже у очень слабых метеоров (до 10 величины). В 1953 г. в Ашхабаде проводились радиолокационные наблюдения Орионид и Геминид на субкритической частоте 9 *Мгц* ($\lambda = 33$ *м*). Тогда даже незначительное увеличение (например, втрое) плотности N_0 электронной концентрации,

вызванное полетом метеора, уже давало отражение (рис. 84); при $\lambda = 8$ *м* для этого необходимо увеличение N_0 в сотни раз. Отдельные флуктуации концентрации в ионосфере, создающие свои «рассеянные» отражения, отличаются от метеорных своим постепенным ростом и затуханием, тогда как метеорные отражения (рис. 85) возникают «всплеском» за время $\Delta t = \frac{\Delta L}{v} \cong 0{,}02$ *сек* [здесь ΔL — длина отрезка траектории, отражающего волну (~ 1 *км*), а v — скорость метеора].

Как увидим далее (гл. 25 и 26), радиометоды позволяют также получить параметры, важные для физики метеора — метеорную ионизацию, массу метеорного тела и др.

ГЛАВА 11

ЧИСЛЕННОСТЬ МЕТЕОРОВ

§ 104. Определения. Число n метеоров, видимых человеческим глазом в ясную безлунную ночь, невелико, и обычно равно 6—15 в час. Это часовое число n_h есть характеристика численности метеоров. Она применяется также в радиометеорных, телескопических и фотографических наблюдениях. «Мгновенное» часовое число находится из

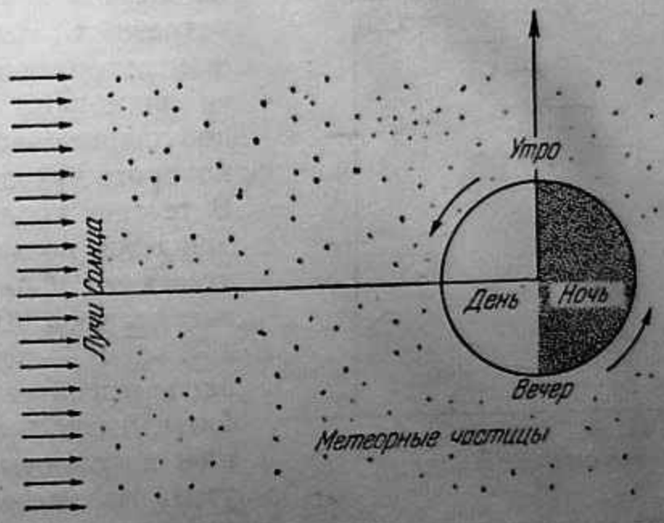


Рис. 86. Объяснение суточной вариации числа метеоров.

отношения $n_h = \frac{\Delta n}{\Delta t}$, где Δn — число метеоров за небольшой интервал времени Δt. Несколько раз в столетие Земля встречает сравнительно плотные скопления метеорных частиц, дающих метеорные дожди, для описания которых полезнее «минутное число» n_m, доходящее изредка до $n_m \approx 1000$. В «метеорную службу ночи» должно входить определение n_h. Так как Земля движется вперед утренней стороной (рис. 86), то n_h увеличивается в течение ночи, тем самым давая астрономической науке *метеорное доказательство движения Земли*.

§ 105. Суточная и годичная вариация. Изменение n_h в течение суток от указанной причины, открытое Брандесом в 1825 г., называется *суточной вариацией*; ее можно иллюстрировать, например, результатом наблюдений в стандартных условиях в Ашхабаде в 1942—1945 гг., когда за 836,2 часа наблюдений автор зарегистрировал 10907 метеоров (T означает среднее солнечное время).

T, часы	19—20	—21	—22	—23	—0	—1	—2	—3	—4	—5	—6	Всего
Метеоров .	114	375	857	1045	1274	1533	1843	1592	1374	654	276	10907
Часов . . .	13,7	45,8	88,2	97,2	111,8	118,0	125,3	100,0	81,5	40,2	14,5	836,2
n_h	8,3	8,2	9,7	10,8	11,4	13,0	14,7	15,9	16,9	16,3	17,0	13,04

То же дали наблюдения 16930 метеоров, представленные на рис. 87.

Годичная вариация. Вектор орбитальной скорости Земли направлен в точку небесной сферы, называемой *апексом* (латинское *apex* — вершина). Так как на Землю больше попадает встречных метеорных тел, чем догоняющих (рис. 86), то метеорами обильнее то полушарие неба, в полюсе которого находится апекс A. В течение года апекс перемещается по эклиптике, отставая от Солнца по долготе на угол $90° + \Delta\odot$, где $\Delta\odot < 1°$ — поправка за эксцентриситет земной орбиты. Апекс восходит в полночь и кульминирует в 6 час. утра, но на разной высоте h в течение года, от $h = 90° - \varphi + \varepsilon$ осенью до $90° - \varphi - \varepsilon$ весной (φ здесь широта места, ε — наклонение эклиптики к экватору). В Ашхабаде ($\varphi = 37°57'$) пределы h от $28°37'$ до $75°30'$ и часовые числа первого и второго полугодий по тем же наблюдениям равны 11,3 и 15,0 (рис. 88). В южном полушарии ход должен быть обратным, но действие больших потоков его маскирует так, что там максимум также падает на осень. К счастью для астрономической теории метеоров, это не было известно в прошлом веке, так как тогда этот наблюдаемый факт не мог бы быть объяснен, что могло бы задержать ее развитие. Приведем годичную вариацию для двух пунктов наблюдения, симметрично расположенных в северном и южном полушариях и содержащих наиболее полные ряды: Ашхабад (1945 г.) и Оклэнд (Новая Зеландия, $\varphi = 36°51'$, Р. А. Мак-Интош, 1930 г.).

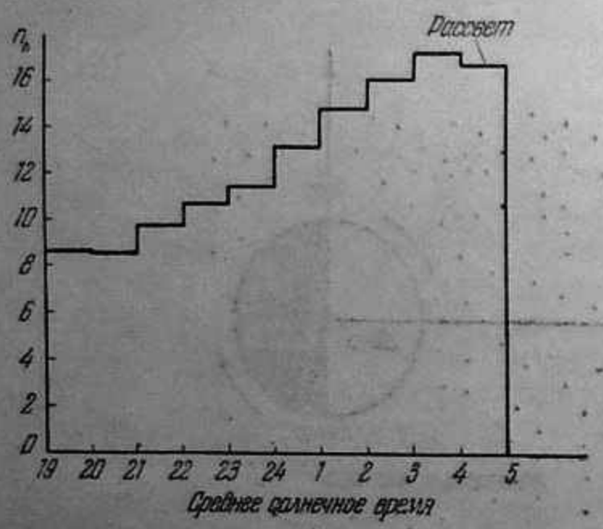


Рис. 87. Суточная вариация числа метеоров (по наблюдениям 16930 метеоров в Ашхабаде за 1124 часа, 1942—1945 гг.).

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Северное полушарие . . .	15,5	10,0	11,6	12,4	10,6	12,2	14,3	21,1	14,0	17,2	16,2	18,1	15,0
Южное полушарие . . .	11	11	14	15	19	17	20	20	13	19	9	15	12,0

Однородные ряды наблюдений указывают на удивительное постоянство среднемесячных n_h на протяжении ряда лет, характеризуя

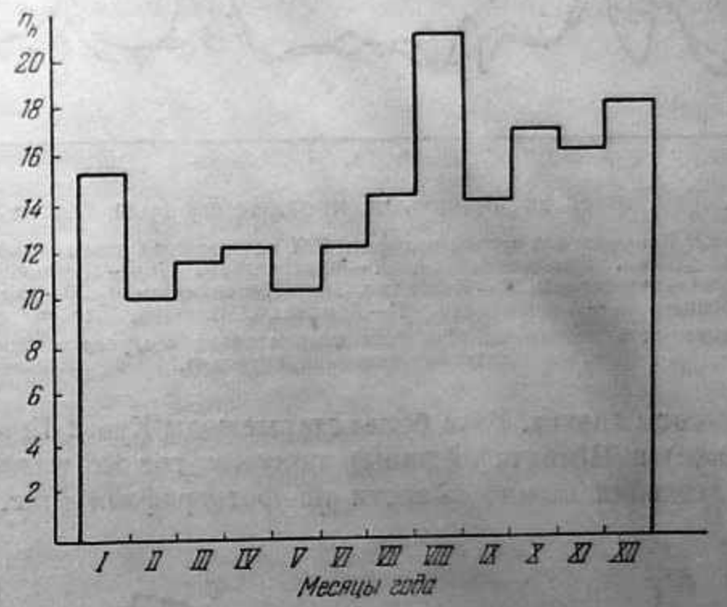


Рис. 88. Годичная вариация числа метеоров (по наблюдениям 16930 метеоров в Ашхабаде за 1124 часа, 1942—1945 гг). Среднее $n_h = 15$ метеоров в час.

активность «метеорного фона». В. И. Баранцева в Москве из наблюдений в северной полярной области неба ($\delta > +60°$) по часу в ночь (около полуночи) по исключении больших потоков получила за 114 ночей по 1085 метеорам следующие часовые числа:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1930	—	—	—	2,5	2,1	2,6	2,0	4,1	2,0	2,2	1,5	2,1	2,34
1931	2,7	2,5	2,7	2,4	1,9	2,5	1,8	3,8	2,1	2,5	1,7	1,9	2,38
1932	2,2	2,4	2,6	2,2	1,2	2,3	2,0	3,8	2,0	2,2	—	—	2,35

Среднее $n_h = 2{,}36 \pm 0{,}01$. Далее, сравнивая английские наблюдения В. Ф. Деннинга в прошлом веке с ашхабадскими (рис. 89),

мы видим, что годовой ход активности почти не изменился за $^3/_4$ столетия, хотя абсолютные числа n_h для широты Англии меньше из-за

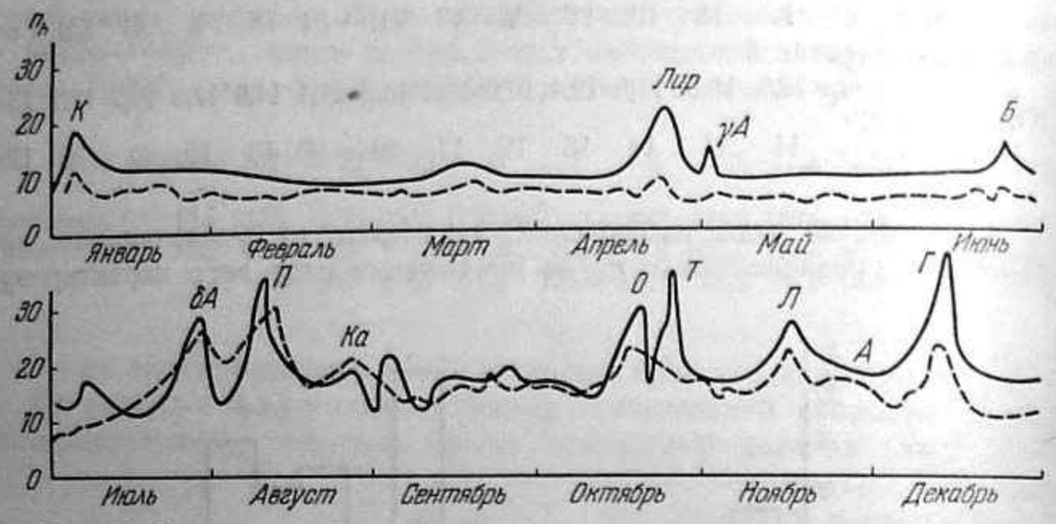


Рис. 89. Метеорная активность на протяжении года для каждого дня.

Пунктир — данные Деннинга для второй половины XIX в., сплошная линия — наблюдения в Ашхабаде (середина XX в.). Большие потоки: *К* — Квадрантиды, *Лир* — Лириды, *γА* — γ-Аквариды, *Б* — Боотиды, *δА* — δ-Аквариды, *П* — Персеиды, *Ка* — Камелопардиды, *О* — Ориониды, *Т* — Тауриды, *Л* — Леониды, *А* — Андромедиды, *Г* — Гемииды. Заметно, что n_h в Ашхабаде выше и что за $^3/_4$ века одни потоки иссякли (как Андромедиды), а другие возникли или изменили интенсивность (как Тауриды).

меньшей высоты апекса. Взяв более старые ряды Кувье-Гравье (Париж), Гейса (Аахен) и Шмидта (Афины), получим тот же вывод. Ныне ход годичной вариации можно вывести по фотографиям (рис. 90).

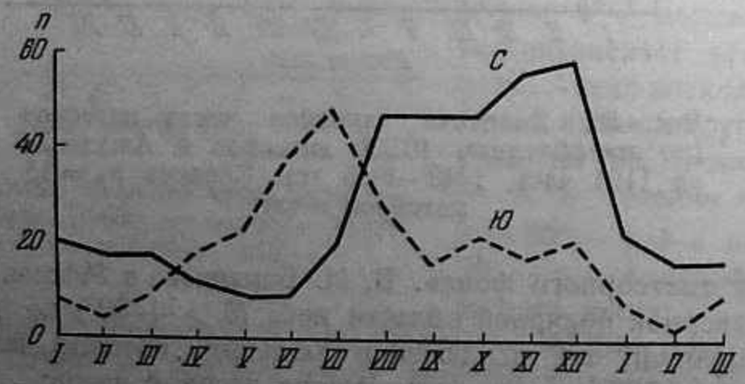


Рис. 90. Годичная вариация числа метеоров в северном и южном полушариях по фотографиям Гарвардской обсерватории и ее станций с 1889 по 1936 гг. (*С* — северное небо, 330 фотографий за 174 дня, *Ю* — южное небо, 252 фотографии за 157 дней).

§ 106. Широтная вариация. На географических полюсах апекс полгода находится под горизонтом и годичная вариация здесь заменяет суточную, которая отсутствует. На закате полярного Солнца апекс

имеет наибольшую высоту h. По мере приближения к экватору h апекса и n_h увеличиваются, например из трех рядов наблюдений: в Бристоле ($\varphi = +51°26'$, Деннинг, 1878—1918 гг., $n = 4213$), Ашхабаде ($\varphi = +37°57'$, Астапович, 1942—1945 гг., $n = 10907$) и в Хайдерабаде ($\varphi = +17°22'$, Мохаммед-Хан, 1941—1947 гг., $n = 3993$) средние часовые числа равны 11,51, 13,04 и 15,24. Если δ_A, t_A и z_A соответственно склонение, часовой угол и зенитное расстояние апекса, то

$$\cos z_A = \sin\varphi \sin\delta_A + \cos\varphi \cos\delta_A \cos t_A. \qquad (3)$$

Из этой формулы получим суточную вариацию, считая δ_A в течение суток неизменным, годичную вариацию, полагая в меридиане $t_A = 0$ и пределы изменения δ_A от $+23°,4$ до $-23°,4$, и широтную, считая переменным φ.

§ 107. Зенитная вариация. Это явление, известное свыше столетия, вызвано тем, что у горизонта из-за удаленности метеоров и атмосферного поглощения число метеоров минимально, а в зените оно также меньше, чем в иных областях, где луч зрения проходит большую толщу воздуха и потому встречает больше метеоров. Таким образом, по известной теореме анализа, между $z = 0$ и $90°$ должен существовать по крайней мере один максимум. Наблюдения действительно его указывают: он имеет место при $z = 60°$ для болидов, обычных и телескопических метеоров. Еще в 1865 г. Г. Ньютон получил по данным 40 наблюдателей:

Зенитное расстояние	0°—10	10—20	20—30	30—40	40—50
Метеоров	30	60	142	197	274
Зенитное расстояние	50—60	60—70	70—80	80—90°	Всего
Метеоров	304	245	110	31	1393

Таким образом, желая увидеть наибольшее число метеоров, мы должны наблюдать участок неба на высоте $h = 30°$; если надо видеть метеоры с кратчайшего расстояния и наиболее яркими, то фиксировать следует зенитную область.

§ 108. Азимутальная вариация. Эта вариация известна со средины XIX в. и определяется тем, что наибольшее число метеоров идет из апекса и из эклиптикальных радиантов. Поэтому в разных азимутах n неодинаковое, например, по Кувье-Гравье:

Пределы азимутов .	0°—45	45—90	90—135	135—180	180—225
Метеоров	235	248	287	247	137
Пределы азимутов .	225—270	270—315	315—360°	Всего	
Метеоров	80	87	141	1462	

Здесь счет азимутов геодезический (от точки севера). Таким образом, наибольшее число метеоров видно на юго-востоке на высоте 30°.

§ 109. Теория вариации числа метеоров. В предположении равновероятного распределения направлений метеоров в солнечной системе, движущихся с одинаковой скоростью v_h, можно доказать, что видимое число метеоров n меняется как $n = n_0\left(1 + \frac{v_t \sin h_A}{v_h}\right)$, где $h_A = 90° - z_A$ и v_t — орбитальная скорость Земли (формула А. Гершеля — Г. Ньютона). Из-за притяжения Земли n возрастает в $\left(1 + \frac{2gr}{v_g}\right)^{3/2}$ раз, где g — ускорение силы тяжести, r — радиус Земли и v_g — геоцентрическая скорость метеоров. По И. А. Клейберу (Петербург, 1884 г.) при $v_h = \sqrt{2}v_t$ (параболическая скорость) притяжение Земли увеличит n на 7,25%, причем число метеоров, идущих из апекса, увеличится в 1,038 раза, а из антиапекса — в 2,512 раза (так как последние дольше подвергаются действию притяжения). С целью найти v_h, Скиапарелли в 1867 г., Хеппергер и Гофмейстер с 1920 г. занимались этим вопросом, в 1922 г. Н. М. Штауде в Петрограде проинтегрировала сложное выражение Гофмейстера для n с учетом земного притяжения и нашла, что общее число $N = \frac{\pi}{2}\left(\frac{v_h}{v_t} + \cos^2 z_A\right)^2$. Как оказалось, гипотеза равновероятных направлений полета метеоров и постоянства v_h несостоятельна, поэтому v_h получается очень искаженным. Если бы Земля была неподвижна и метеоры налетали бы на нее «сами», то их число было бы в $1 + \frac{v_t^2}{3v_h^2}$ раз меньше n; для параболической v_h разница составила бы 16,7%. Это явление Клейбер называет *физическим сгущением* метеоров. Из-за движения Земли происходит их перераспределение, без изменения общего числа, и к апексу число метеоров увеличивается, уменьшаясь у антиапекса (*оптическое сгущение*). В направлении апекса физическое сгущение увеличивает число n в $\frac{v_h + v_t}{v_h}$ раз, оптическое — еще в $\left(\frac{v_h + v_t}{v_h}\right)^2$ раз; для антиапекса эти отношения равны $\frac{v_h - v_t}{v_h}$ и $\left(\frac{v_h - v_t}{v_h}\right)^2$. При $v_h = \sqrt{2}v_t$ общее сгущение даст соответственно 4,97 и 0,025, а с учетом притяжения 5,10 и 0,049, т. е. амплитуда вариации должна меняться в 150 раз. На самом деле этого не происходит и к утру число метеоров изменяется только в два раза, так как основная масса метеорных тел движется туда же, куда и Земля, нагоняя ее прямым движением.

§ 110. Влияние скорости. Сила света метеора примерно пропорциональна кубу его скорости v (гл. 24), поэтому два метеорных тела одинаковой массы при $v = 18$ и 72 *км/сек* будут различаться на $\Delta m = 2{,}5 \lg 4^3 = 4{,}5$ зв. вел. Следовательно, медленные метеоры из антиапекса, догоняющие Землю, будут сильно ослаблены и могут остаться незамеченными. Поскольку все же мы их видим в достаточном количестве, то также следует заключить, что Землю нагоняет в сотни раз большее число частиц, чем ее встречает.

При инструментальных наблюдениях вариации также обнаруживаются, как фотографией, так и радиометодами. Однако в последнем случае появляется вторичный максимум днем и летом из-за добавочной ионизации Солнцем, и должна быть еще 11-летняя периодичность n_h. Об увеличении к утру числа метеорных доплеровых свистов мы уже говорили.

Суточная и годичная вариации болидов, как и широтная, такие же, как у обычных метеоров; у телеметеоров суточная выражена слабо, годичная заметна хорошо, широтная не исследовалась, максимум зенитной вариации (А. К. Терентьева, Ашхабад, 1954 г.) лежит при $z = 60°$.

§ 111. Полное число метеоров на небосводе. Около ста лет назад Г. Ньютон определил увеличение видимого числа метеоров при увеличении числа наблюдателей от одного до 12 и получил следующее:

Число наблюдателей . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число метеоров	325	633	834	1000	1114	1200	1279	1342	1404	1456	1508	1560

Экстраполяция на бесконечное число наблюдателей дает $n' = 1700$ или в 5,6 раз больше того, что видит один наблюдатель. Клейбер в 1884 г. и Уайли в 1933 г. нашли, что восемь наблюдателей видят в 3,7 и 2,7 раза больше, нежели один, откуда можно найти «коэффициент внимания» π каждого наблюдателя. Теория вероятности дает другой способ найти полное число n' метеоров. Пусть n_1 и n_2 будут числа метеоров, замеченных соответственно двумя наблюдателями при параллельных наблюдениях, а n — число общих метеоров. Тогда $n' = \frac{n_1 n_2}{n}$. А. М. Лозинская из наблюдений четырех групп наблюдателей в Никольском близ Москвы обоими способами нашла следующие значения n' (метеоров в час):

Дата (1923, Август)	Способ экстраполяции	Способ теории вероятностей
9	290	275
10	342	357

Эпик считает, что коэффициент восприятия равен $p = \pi\chi$, где χ — функция яркости. Из наблюдений Персеид в 1920 г. (Ташкент) он получил:

Зв. вел. метеора .	$<2{,}7$	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Функция χ . . .	1,00	0,88	0,67	0,46	0,175	0,101

Отсюда следует, что даже идеальный ($\pi = 1$) наблюдатель сможет увидеть только 10% метеоров 5 величины. Если наблюдателей несколько и q — число необщих метеоров, то

$$n' = \frac{q}{1-(1-p_1)(1-p_2)\ldots(1-p_n)}. \qquad (4)$$

Коэффициент внимания в Ташкенте был 0,6—0,8, по нашим данным $\pi \approx 0{,}75$. Учитывая особенности бокового зрения, можно применить третий способ — метод зон видимости [157], зная, какую площадь S каждая зона охватывает и сколько метеоров данной яркости на этой площади наблюдалось. По 1594 метеорам (1925 г., Астапович, г. Николаев) и данным для S (гл. 4) имеем относительное число метеоров на полусфере, исправленное за потери:

Зв. вел. метеоров	<1	1	2	3	4	5	Всего
Видимое относительное число (%)	3	13	18	24	21	16	100%
Исправленное	6	30	55	104	226	471	892
Площадь зоны S (% от полусферы)	54	44	33	23	9,3	3,4	—
Исправленное n_h (метеоров/*час*)	1,0	4,8	8,8	16,6	36,2	75,4	142,8

Это дает полное число метеоров на полусфере в 9,4 раза больше, чем видит один наблюдатель (до 5 величины). Кроме того, на одну зв. величину n_h меняется вдвое. Таким образом, в среднем в обычную ночь полное часовое число $n_h \cong 150$ (до 5 зв. вел.).

§ 112. Индекс и ранг активности. Исследуя активность отдельного потока, выражаемую часовым числом принадлежащих ему метеоров, мы замечаем сильное влияние условий наблюдения, порою трудно учитываемых (туман, свет города и др.). Однако, используя постоянство метеорного фона, можно найти не абсолютную, а относительную активность; тогда влияние помех проявляется одинаково на числе метеоров и потока n_p, и фона n_ϕ (М. Е. Набоков, 1912, [323]). Отношение $i = \frac{np}{n\phi}$ назовем *индексом активности*. Для примера приведем несколько опубликованных наблюдений Деннинга за Персеидами; индекс активности мало меняется, тогда как n_h изменялось в 24 раза и могло бы привести к неверному выводу об «истощении потока»:

№	Дата	Интервал, часы	Персеиды, n_p	Метеорный фон, n_ϕ	Индекс активности, i	Примечание
1	1901 VIII 11	2	24,5	36,0	0,68	Очень ясно
2	1906 VIII 10	1¼	8,0	12,0	0,67	Много облаков
3	1909 VIII 10	1¼	9,6	15,2	0,63	Слегка туманно
4	1911 VIII 11	1	1,0	2,0	0,50	Полнолуние, туман

Для Персеид по 15 определениям средний индекс активности $i = 0{,}65 \pm 0{,}02$; он увеличивается к дате максимума и является удобной характеристикой при сравнении активности разных потоков. Недавно его стали вводить в Англии при обработке радионаблюдений n_h, очень сильно зависящих от параметров станций и настройки.

Ранг активности. В некоторых случаях нужно знать абсолютную активность потока. Условимся характеризовать ее десятичным логарифмом минутного числа n_m метеоров; тогда «ранг активности» $\rho = \lg_{10} n_m$.

Если $\rho > 0$, то будем говорить о метеорном дожде; для обычных активностей потоков $\rho < 0$. Некоторые метеорные дожди давали $n_m = 1000$ и ранг активности их доходил до $\rho = 3{,}0$. Это позволяет произвести классификацию метеорных дождей. Например, Дракониды 10 октября 1933 г. имели $\rho = 2{,}7$, Андромедиды 27 ноября 1885 г. в Петербурге по данным А. М. Васнецова $\rho = 2{,}0$ и т. д. Ранг $\rho = -0{,}5$ характеризует богатый поток, с $n_h = 17 - 32$; при $n_h = 1$ $\rho = -1{,}75$ поток очень слаб. Отсюда имеем:

n_h	≤0,5	1	2	3—4	5—8	9—16	17—32	33—64	65—128
Ранг ρ . .	≤−2	−1,75	−1,5	−1,25	−1,0	−0,75	−0,5	−0,25	0
Поток . . .	крайне слабый		слабый		заметный		богатый		«дождь»

§ 113. Метеорная плотность. В некоторых случаях, как, например, при телескопических и радионаблюдениях, полезно знать число метеоров на единицу поверхности небесной сферы, например, на 1 кв. градус. Часовое число метеоров на 1 кв. градус в зените условимся называть метеорной плотностью $\nu = \frac{n_h}{S}$, где S — площадь участка неба, охваченная наблюдениями. Для примера приводим определения метеорной плотности ν метеоров различной яркости по наблюдениям автора 1925 — 1943 гг. в околозенитной области неба с учетом коэффициента внимания ($\pi = 0{,}80$).

Зв. вел. метеора	<1	1	2	3	4	5
Площадь зоны S (кв. градусы)	>11 200	9070	6720	4760	1930	710
Среднее n_h	0,3	1,5	4,2	6,8	4,3	1,7
Метеорная плотность $\nu \cdot 10^5$.	<2,5	17	63	140	220	240

Телескопические наблюдения 1930—1933 гг. независимо дают почти те же значения ν [173].

§ 114. Число метеоров до данной яркости для Земли в целом. Этим вопросом занимался еще Клейбер (1884 г.) [11]. По Г. Ньютону это число N в 10 460 раз превосходит число n, замечаемое над горизонтом одной точки наблюдения.

Точка на горизонте наблюдателя, находящаяся на высоте $H = 100$ *км*, из-за кривизны Земли удалена на 1100 *км*.

Поэтому следует различать вообще число n'' метеоров над горизонтом наблюдателя от того числа n', какое он может видеть (так как более далекие метеоры будут слишком слабы и недоступны). Так как с высоты метеора $H = 100$ *км* обозревается $3 \cdot 10^6$ *км*^{2} или 1/170 поверхности земного шара, то и отдельный метеор, достаточно яркий, можно было бы увидеть с такой же площади при крайнем расстоянии между пунктами наблюдения в 2200 *км* (с учетом рефракции). Обычно, разумеется, метеор виден на меньшей площади. На основе приводившихся данных (§ 111 и 113) мы можем получить такую табличку, связывающую числа n'', n' и n_h:

Зв. вел. метеора (в зените) .	<1	1	2	3	4	5	Всего
Истинное часовое число n''	48	324	1193	2483	4202	4584	12 834
Доступное n'	0,5	3,5	13,0	28,8	45,3	49,4	140,5
Фактическое n_h	0,3	1,5	4,2	6,8	4,3	1,7	18,8
Потеря, %	40	57	68	76	91	97	Ср. 87%

Для Земли в целом это даст полное часовое число метеоров $N = 12834 \cdot 170 = 2{,}2 \cdot 10^6$. Мы видим, что идеальный наблюдатель ($\pi = 1$) в отличных условиях наблюдений может заметить 1 : 683 долю метеоров (ярче 6 величины в зените), пролетающих над плоскостью его горизонта; иначе говоря, под его «хрустальный колпак видимости» попадает лишь 1 : 92 истинного числа метеоров, из которых он замечает только 13%. Таким образом, подсчет для Земли в целом получится из-за экстраполяции довольно приближенным. Будем исходить из метеорной плотности ν. На высоте $H = 100$ *км* 1 кв. градус в зените вырежет площадку в 2,5 *км*^{2} или $1 : 2 \cdot 10^8$ часть площади Σ атмосферы Земли (на этой высоте $\Sigma = 525 \cdot 10^6$ *км*^{2}). Тогда получим:

Зв. вел. метеора в зените, m_z	<1	1	2	3	4	5	Всего
Метеоров в час на 1 *км*^{2} ($\nu_h \cdot 10^5$)	<1	6,8	25	56	88	96	$72 \cdot 10^{-5}$
Метеоров в час на Землю ($N_h \cdot 10^{-4}$)	$<0{,}5$	3,4	12,6	28	44	48	$136 \cdot 10^4$
Метеоров в год на Землю ($N \cdot 10^{-7}$)	4,5	30	112	250	390	430	$1200 \cdot 10^7$

Следовательно, часовое число метеоров до 5 величины для всей Земли N_h не превышает 1,4 миллиона, что близко к предыдущей оценке $N_h = 2{,}2 \cdot 10^6$. Для более слабых метеоров их число гораздо больше (гл. 33). В действительности с убыванием яркости число слабых метеоров не падает, как это кажется при наблюдении (рис. 91), а значительно растет. На нашем диапазоне 1—5 вел. наблюдения автора 1925 г. дают соотношение $\lg N_h = 0{,}274\ m_z + 0{,}45$. Изменение количества метеоров в зависимости от их яркости называется *функцией светимости* $N = f(m_z)$ и играет важную роль в метеорной астрономии (рис. 92).

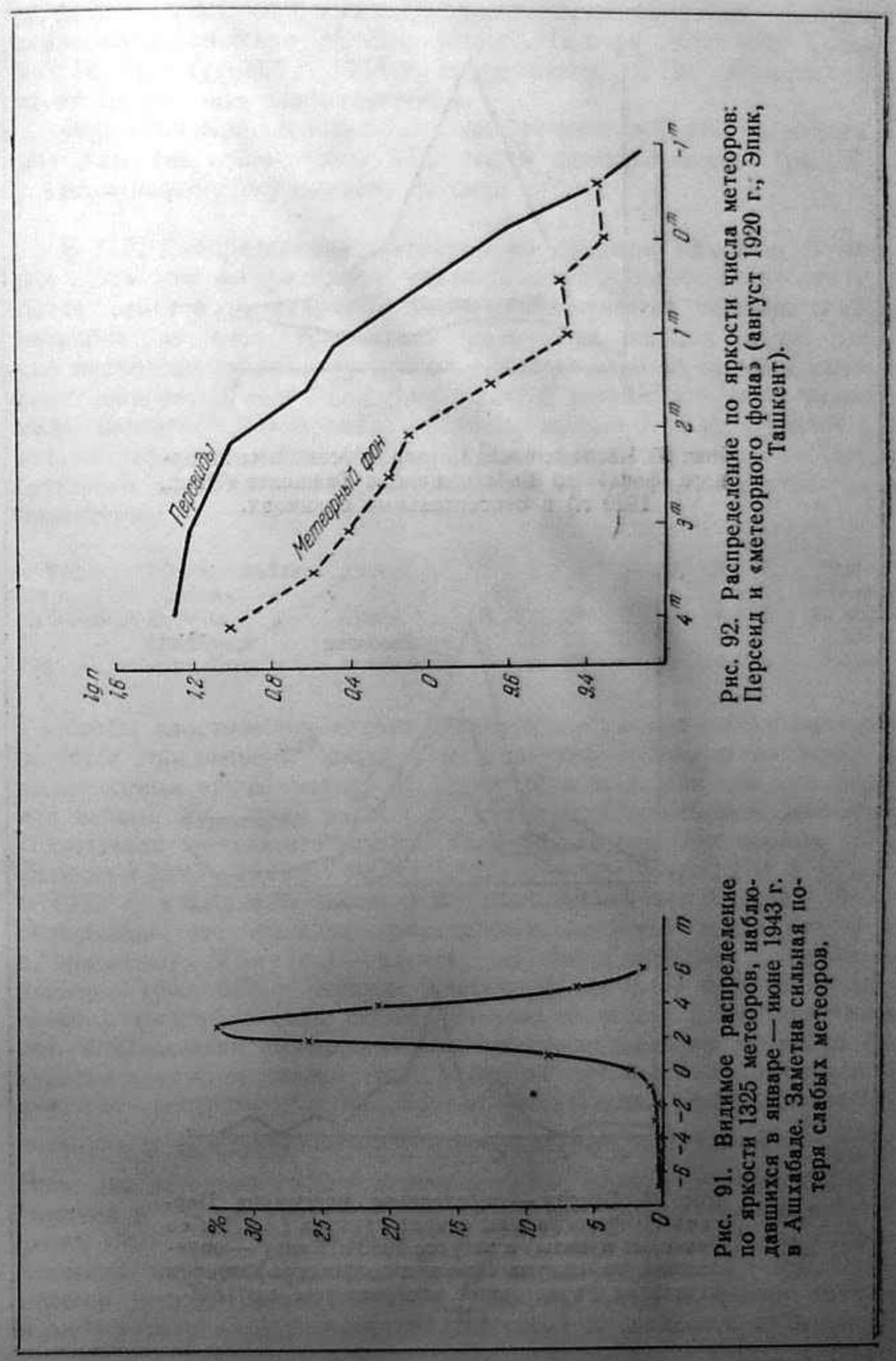


Рис. 92. Распределение по яркости числа метеоров: Персеид и «метеорного фона» (август 1920 г., Эпик, Ташкент).

Рис. 91. Видимое распределение по яркости 1325 метеоров, наблюдавшихся в январе — июне 1943 г. в Ашхабаде. Заметна сильная потеря слабых метеоров.

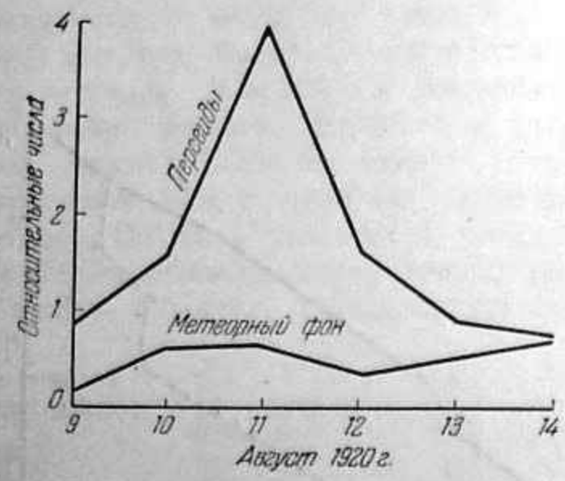


Рис. 93. Часовые числа потока Персеид и «метеорного фона» по наблюдениям в Ташкенте (Эпик, 1920 г.) в относительных единицах.

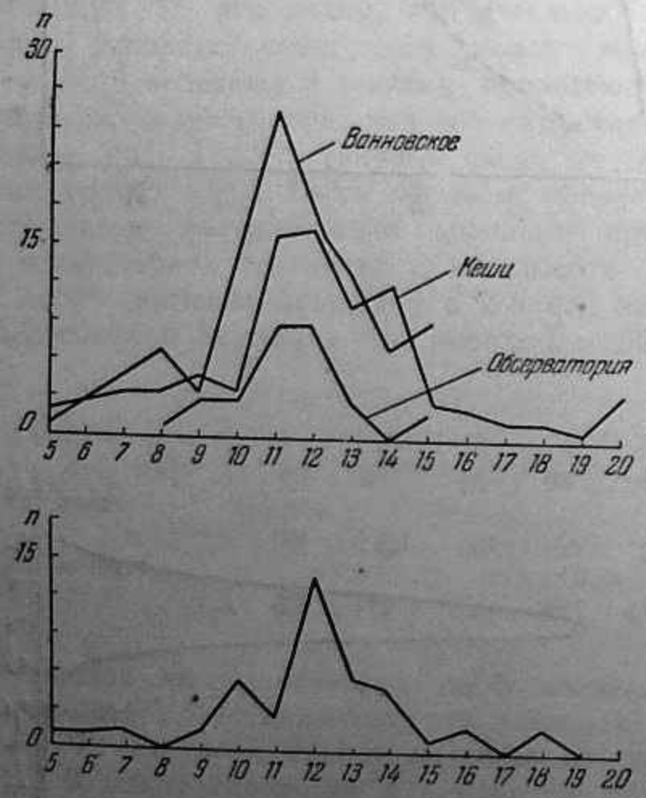


Рис. 94. Вверху — определение максимума Персенд по фотографиям в трех пунктах (ААЛ и ее базисные пункты) в августе 1953 г. Внизу — определение максимума Геминид по фотографическим каталогам Гарвардской обсерватории за 1887—1934 гг.

Не учитывая особенностей зрения, прежние авторы получали заниженные значения N, например, Г. Ньютон $7{,}5 \cdot 10^6$, Оливье $20 \cdot 10^6$ (за сутки). В 1938 г. автор нашел [320] $N = 800 \cdot 10^6$ за сутки, включая слабые метеоры.

Определение n_h потоков позволяет установить даты их максимумов как визуально (рис. 93), так и фотографически (рис. 94), а также найти $f(m_z)$ каждого потока.

§ 115. Распределение метеоров по видимой яркости. В течение суток это распределение меняется незначительно, в течение года более заметно (в феврале — марте увеличивается процент слабых метеоров за счет уменьшения количества ярких); кроме того, оно несколько различно у разных наблюдателей из-за систематических ошибок. У одного наблюдателя с годами это распределение мало меняется. Для примера приведем данные А. Кук (среднее для многих наблюдателей за 1833—1914 гг. по 96 565 метеорам) и автора (отдельно за 1925 г. и первое полугодие 1945 г.) в процентном распределении:

Годы	Место наблюдения	Автор	< 1	1	2	3	4	5	6	Всего метеоров
1833—1914	Европа	Кук	3	12	22	27	22	14	0	96 565
1925	Николаев	Астапович	3	12	17	23	20	18	8	1 594
1945	Ашхабад	Астапович	5	8	18	26	22	17	4	1 538

Чтобы удостовериться, что фотометрическая шкала наблюдателя остается постоянной, определим среднюю звездную величину m десяти самых ярких метеоров, затем 20 и т. д. для каждого ряда, или первых 5%, затем первых 10% и т. д. Стабильность m явится показателем постоянства шкалы. Так, Мак-Интош для первых 10% получил в 1925—1928 гг. $0^m{,}65$, в 1929 г. — $0^m{,}70$ и в 1930 г. $0^m{,}74$. В 1920 г. в Ташкенте были проведены наблюдения Персеид; было обнаружено, что функция яркости (ход изменения числа метеоров с яркостью) $N = f(m_z)$ — разная для спорадических и поточных метеоров (рис. 92): у первых зависимость $\lg N$ от m_z (пропорциональной логарифму силы света) линейна, тогда как у Персеид этого нет. Впоследствии обнаружилось, что распределение метеоров по яркости в каждом потоке свое: в старых потоках иное, чем в молодых, где дисперсия частиц более значительна. Отношение числа метеоров $m+1$-й величины к числу m-й зв. величины есть $k = \frac{N_{m+1}}{N_m}$. Эпик для метеоров 1920 г нашел $k = 3{,}0$, причем функция яркости Персеид в 1920 и 1921 гг. была одинакова. Новозеландские наблюдения 1925—1938 гг. дают для $m = 2$ и ярче $k = 2{,}1$; для спорадических метеоров Кузмин в Тарту нашел в 1938 г. $k = 2{,}5$, Гофмейстер — 3,5, Вильямс в 1940 г. нашел 2,3, а применив «метод подобия» теории вероятностей, дающий возможность от видимой

частоты распределения перейти к истинной, он нашел $k = 2{,}08 \pm 0{,}1$. Ф. Уотсон для обычных и телескопических метеоров сначала получил 4, но с критерием метода подобия — 2,7. Телеметеоры по наблюдениям в Тарту дали 3,2, а фотометеоры на диапазоне от — 2 до — 7 величины 3,5 (Миллман). Учтя потерю при боковом зрении, в 1930 г. автор получил $k = 1{,}9$ на интервале от 0 до 5 вел., а в 1946 г. по 855 ярким метеорам и болидам от 0 до —10 вел. $k = 1{,}91$.

М. Х. Кадыров исследовал эти метеоры отдельно; они составляют только 5,1% всех 16 761 метеоров 1942—1945 гг., но обнаруживают удивительное постоянство распределения:

Зв. вел. m . . .	0	—1	—2	—3	—4	—5	—6	—7	—8	—9	—10	Всего
I полугодие (%)	68,0	18,0	6,6	5,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	181
II » (%)	63,5	18,0	7,1	6,2	2,7	1,7	0,6	0,2	0	0	0	674
Метеоров . . .	552	156	60	51	19	12	5	1	0	0	1	855

Таким образом, можно написать, что $\lg N = 0{,}28m + 2{,}50$. Поскольку постоянство $k \approx 2$ нами проверено от + 5 до — 10 вел., допустим, что оно сохраняется и вне этих пределов. Тогда на один болид $m = -25$ вел. пришлось бы 24 болида —20 вел., 600 —15 вел. и 15 000 —10 вел. Метеоров нулевой вел. оказалось бы почти 10 миллионов, а всех метеоров ярче 5-й вел. —504 миллиона. Чтобы их видеть, например, в условиях Ашхабада, потребовалось бы $32 \cdot 10^6$ часов наблюдений. По подсчету Вильямса в объеме, равном объему Земли, заключается $60 \cdot 10^3$ метеоров от 6 величины и ярче. Для телеметеоров k в Тарту получилось 3,2, в Антарктической экспедиции Бэрда в 1934—1935 гг. 4, Вильямс давал 2,7, В. Е. Штепан из наблюдений в Чарджоу 1952—1953 гг. нашел $k = 2$; еще в 1935 г. автор показал [173], что при учете потерь боковым зрением $k = 2{,}5$, в интервале от 2 до 8 величины; по А. М. Бахареву для телеметеоров от 9 до 10 величины $k = 1{,}8$. Таким образом, с учетом потерь от 2 до 10 величины $k \cong 2$ в согласии со старым определением Деннинга. Возможно, что, начиная с некоторого m, k начнет убывать (из-за воздействия на метеорные пылинки радиации Солнца).

ГЛАВА 12

РАДИАНТЫ

§ 116. Введение. Явление радиации метеоров было открыто в 1833 г.; первый радиант — потока Леонид — был открыт по крайней мере в восьми пунктах западного полушария (в восточном полушарии был день) в ночь 11/12 ноября 1833 г. Олмстед, объяснивший это явление, писал: «Они (метеоры. — *И. А.*) начинались на разных расстояниях от радиирующей точки (radiant point), но пути, которые они описывали, если их продолжить, все сходились в этой точке» (рис. 95). Отсутствие ее параллакса и суточного смещения Олмстед объяснил явлением перспективы, а так как скорости метеоров составляли «несколько миль в секунду», то это доказывало космическую природу метеоров.

Второй радиант — потока Персеид — был открыт также в США Локе и Герриком из наблюдений 1834 г. и подтвержден Шаффером в 1837 г. Богуславский из базисных наблюдений Персеид 10 августа 1838 г. первым в Европе получил шесть радиантов, в том же году Геррик нашел радиант Лирид (заподозренный Араго еще в 1835 г.). Для нахождения радиантов неизвестных потоков («центра излучения» Шаффера или «точки схождения» Локе) Гейс с 1842 г. наносил на карту пути всех метеоров за две недели и обратным продолжением определял радиант, осуществляя этим «метеорную съемку неба». К 1867 г. он дал 84 радианта, на следующий год Грег, который ввел термин радиант, — еще 76, затем в 1867 — 1869 г. Скиапарелли определил еще 189 радиантов по 7000 метеоров, нанесенных Цециоли; для определенности он использовал наблюдения за одну ночь и радианты сравнивал не по календарным датам, а по долготе Солнца. Так как точные скорости метеоров не были известны, то по этим радиантам вычислялись параболические орбиты. Вейсс в 1867 г. решил обратную задачу и по элементам орбиты нашел теоретический кометный радиант. Первые радианты южного полушария получил Гейс (1868 г.) из наблюдений Неймайра (Мельбурн, 1856—1863 гг.). В 1873 г. Тёпмен из 3800 личных наблюдений вывел 102 радианта, а так как наблюдения каждой ночи он обрабатывал отдельно, то он смог найти суточное смещение радиантов. Это явление объяснил И. А. Клейбер, указавший, что Земля проходит через связку орбит

широкого потока. Лишь в 1869 г. Гейс нашел, что радианты имеют не только бо́льшие, но и малые потоки.

Когда были вычислены теоретические кометные радианты, то ташкентские астрономы И. И. Померанцев и П. К. Залесский первыми провели их наблюдения в 1883—1884 гг. и, получив радианты, вычислили

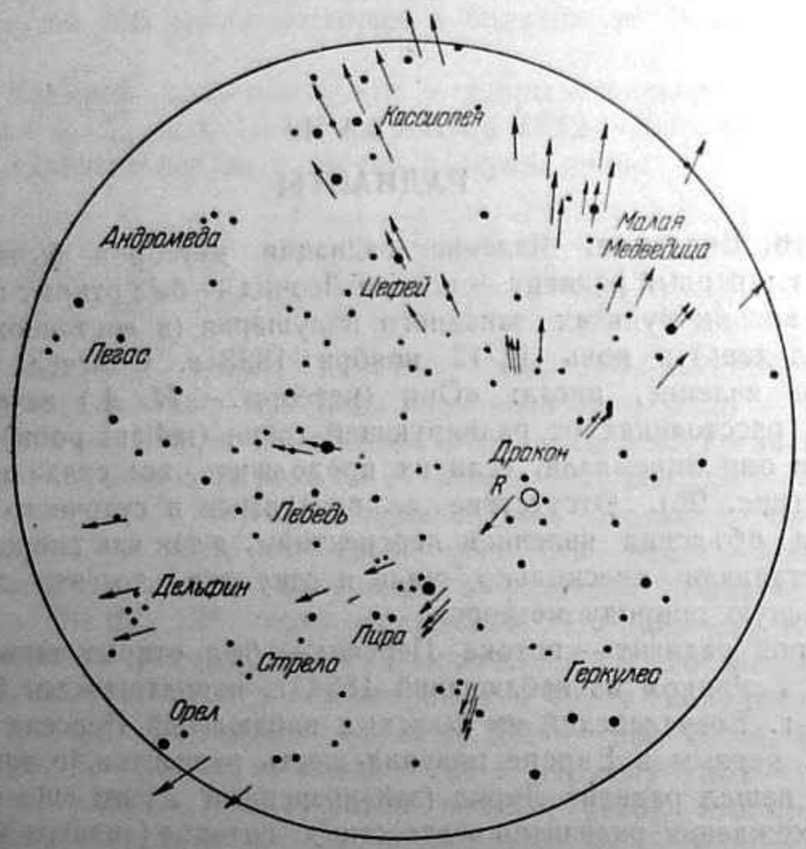


Рис. 95. Радиант Драконид 9 октября 1933 г. по наблюдениям И. С. Астаповича в Сталинабаде.

соответствующие орбиты. С 1890 г. Ф. А. Бредихин ставил систематические наблюдения Персеид в Погосте (близ Кинешмы), в 1901—1902 гг. их проводили К. Д. Покровский и С. Б. Шарбе в Юрьеве (ныне Тарту), в 1901 г. А. Я. Орлов в Москве, в 1905 г. С. И. Белявский в Туле и т. д. В России обработки наблюдений публиковались возникшими в 1909 г. Московским обществом любителей астрономии и Русским обществом любителей мироведения (в Петербурге). Однако систематическое изучение радиантов началось в нашей стране только после 1917 г. и ныне их количество превышает 3000. Н. М. Штауде и К. Д. Покровский публиковали списки радиантов, требующих проверки (1922—1939 г.), В. А. Мальцев, В. В. Федынский и Н. Н. Сытинская обрабатывали многочисленные наблюдения, поступавшие с периферии (1925—1941 гг.), кроме того, из своих наблюдений Н. Н. Сытинская в 1938 г. вывела каталог 829 радиантов [354]. С 1926 г. списки радиантов систематически публикуются Метеорным отделом Московского отделения Всесоюзного астрономического общества [341]. В 1929 г. производилось сравнение кометных радиантов с наблюдавшимися в СССР и найдена связь в ряде случаев [337]. В 1950 г. Е. Н. Крамер вычислил каталог 320 теоретических кометных радиантов 280 комет; 80 из них подтвердились наблюдениями [345, 346]. С 1935 г. В. В. Федынский и К. П. Станюкович разрабатывали методику определения радиантов, как по визуальным, так и по фотографическим наблюдениям [95, 353]. Списки радиантов с 1933 г. публикует Сталинабадская обсерватория [356], с 1946 г. Астрофизическая лаборатория в Ашхабаде, в том числе десятки фотографических радиантов [350]. 10 и 12 августа 1921 г. Эпик на Московской обсерватории впервые применил кометоискатель к определению точных радиантов телескопических метеоров; с 1937 г. эту работу проводили В. Е. Штепан в Саратове и А. М. Бахарев в Сталинабаде.

За рубежом большую работу по определению радиантов провел В. Ф. Деннинг в Англии; с 1866 г. по 1929 г. он наблюдал 30 000 метеоров, из которых нанес на глобус 18 000. Собрав 120 000 наблюдений XIX в., он составил «Общий каталог» 4367 радиантов [357]. Он полагал, что некоторые радианты могут действовать в одной точке неба несколько месяцев. Бредихин [13] показал, что это — результат перспективного наложения радиантов совсем разных потоков и тем разрешил проблему «стационарных радиантов». С 1898 г. Оливье в США дал ряд радиантов, а с 1911 г. организованное им Американское метеорное общество выпустило четыре каталога и ряд списков, в целом более 3000 радиантов [366]. Это общество в 1917 г. предложило особые правила для вывода радиантов, но они не учитывают ни физических, ни кинематических, ни геометрических особенностей. Тот же недостаток имеется в работе К. Гофмейстера «Метеорные потоки» (1948 г.), где он из 36 000 своих наблюдений получил только 43 радианта, введя формально четырехступенчатую сортировку их [362]. За 120 лет изучения радиантов их общее число составляет около 15 000 (только Персеиды дают более 1000), но, вероятно, достоверных из них около 8000, принадлежащих всего нескольким сотням потоков и «спорадическим» радиантам, которые составляют около половины всех радиантов.

С 1945 г. в Англии начато применение радиометодов к нахождению радиантов: Хей и Стьюарт, используя неподвижные антенны направленного действия, расположенные в трех точках и ориентированные в разных направлениях, 26 июля—1 августа нашли первый радиорадиант ($\alpha = 345°$, $\delta = -10°$, поток δ-Акварид). В 1946 г. Клегг использовал одну направленную антенну, но работающую то в одном, то в другом азимуте так, что по максимуму числа отражений можно было найти координаты радианта большого потока. Впервые этот способ был применен к Персеидам. В 1949 г. Миллман

и Мак-Кинли в Канаде получили первые радиорадианты в США из элементов траектории, найденной по трем станциям. С 1946 г. в Англии по способу Клегга начато определение *дневных* радиантов

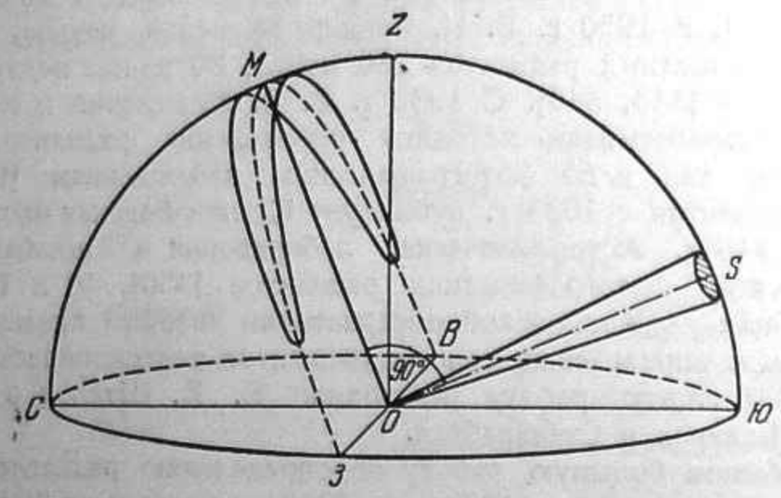


Рис. 96. Антенна, направленная по оси OS, принимает в основном отражения от метеоров из области S, удаленной на 90° от «круга радиантов» $ВМЗ$.

(рис. 96). Теоретический список таких радиантов, связанных с кометами, дал Е. Н. Крамер (Одесса) [345, 346]. Дневные Ариетиды оказались даже богаче Геминид, самого обильного ночного потока. Точность определения радиорадианта, вначале низкая, ныне может доходить до 1°.

§ 117. Основные определения. Условимся считать путь метеора в атмосфере прямолинейным. Его продолжение вперед пересечет

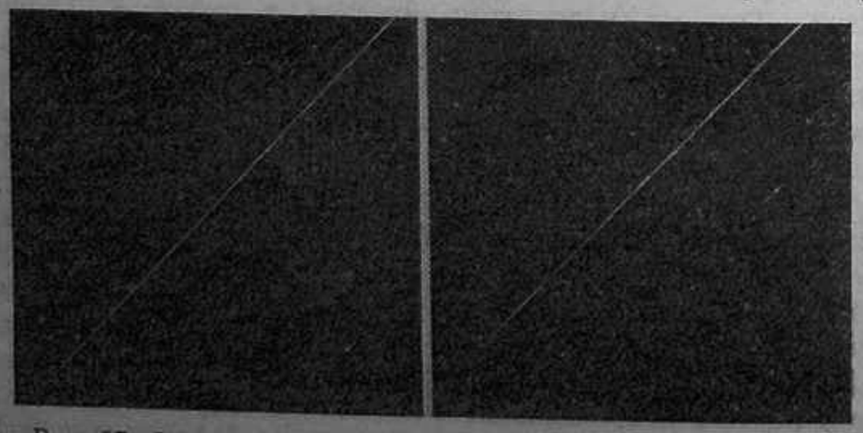


Рис. 97. Стереоскопическая фотография метеора, полученная М. Вольфом в 1904 г. в Гейдельберге.

плоскость горизонта наблюдателя в *земной точке ЗТ*. Из этой точки летящий по лучу зрения метеор будет казаться неподвижным (*стационарным*) (рис. 35). Следовательно, стационарный метеор прямо определяет положение радианта. Таким образом, *радиант* есть точка пересечения обратно продолженной прямолинейной траектории метеора

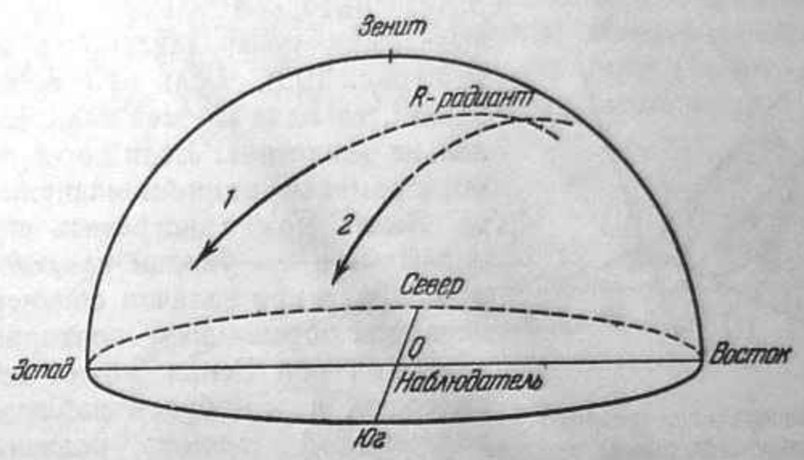


Рис. 98. Нахождение радианта на сфере по двум метеорам одного потока (1, 2), замеченным в пункте O, или по двум положениям одного метеора (1, 2), наблюденным в точке O и в другом пункте.

с небесной сферой, центр которой совмещен с земной точкой. Направление на бесконечно удаленную точку траектории метеора есть направление на радиант. Второй метеор, параллельный первому, будет иметь тот же радиант. Поэтому метеоры одного потока дают радиант в точке пересечения обратно продолженных их видимых путей на сфере (рис. 38 и 98) или на ее центральной проекции (рис. 95). То же в силу геометрического дуализма относится и к радианту метеора, замеченного из двух пунктов (рис. 98): его траектория проектируется на разные места сферы и единственной общей точкой видимых путей является точка бесконечно удаленная, т. е. радиант (рис. 99). Эти условия необходимы и с учетом направления — достаточны. Однако практически из-за возмущений пути метеорных частиц не строго параллельны, вследствие чего радиант их оказывается не точкой, а площадкой, называемой *площадью радиации* группового (поточного)

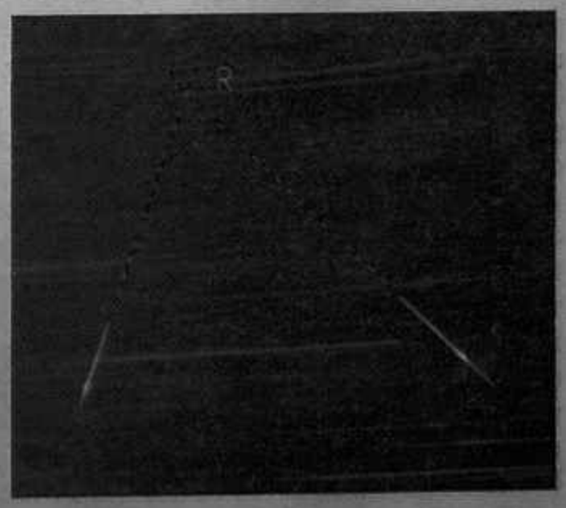


Рис. 99. Совмещенные базисные фотографии метеора 15/16 августа 1953 г. (Ашхабад — Ванновское). Обратное продолжение траекторий дает радиант R.

радианта; на ней расположены индивидуальные радианты каждого метеора. Ее размеры могут быть от нескольких кв. минут до сотни кв. градусов, форма — эллипс, ориентировка которого зависит от причин, вызвавших непараллельность траекторий (рис. 100). Если это возмущения планет, то одна из осей эллипса параллельна эклиптике. Если метеорные тела образовывали один компактный рой, то Земля может встретить его лишь однажды, и мы увидим *спорадический радиант*, а при наличии соизмеримости периодов обращения — повторно. Протяженный рой Земля может встречать ежегодно, и мы будем наблюдать *периодический поток*; радианты его будут *поточными*. Наибольшая группа таких потоков находится близ эклиптики; их радианты назовем *эклиптикальными*. Они имеются также и на дневной стороне неба.

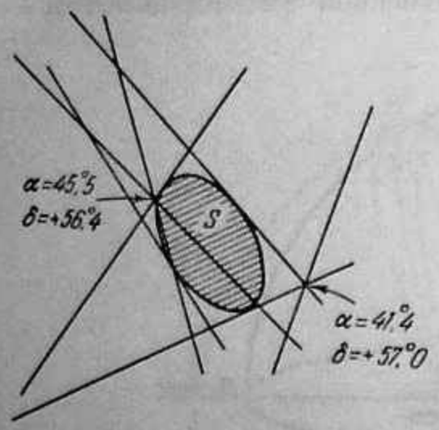


Рис. 100. Площадь радиации S для семи фотографических метеоров за 10 августа 1893—1896 гг. (по Элькину). Диаметр S более 4°. Зенитное притяжение и суточная абберация учтены.

Может случиться видимое совпадение двух радиантов разных потоков — это *оптическое наложение* радиантов. Разделить их можно по скорости и иным признакам. При наличии широкого потока Земля может проходить его в течение нескольких недель, при этом радиант не может оставаться на одном месте и мы наблюдаем *смещение радианта*. Последнее происходит также от других причин—сопротивления воздуха, вращения и притяжения Земли и ее орбитального движения. Таким образом, эфемерида каждого поточного радианта достаточно сложна. В прошлом веке были обнаружены у больших потоков *побочные и паразитные* радианты — первые вызваны отдельными ветвями главного потока, вторые — (это фиктивные радианты) — следствие ошибок наблюдений (рис. 101).

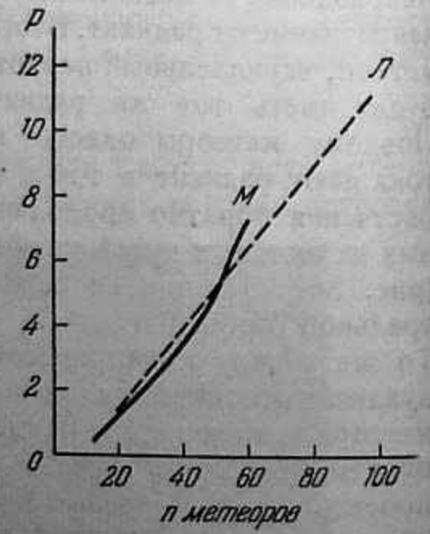


Рис. 101. Вероятное число P фиктивных радиантов по n метеорам, случайно расположенным.

Результаты опытов с бросанием иголок: *М* — В. А. Мальцев, *Л* — Т. Е. Лыткина (10 000 бросаний).

§ 118. Поправки радианта. Полученный из наблюдений радиант $R(a_R, h_R)$ или $R(\alpha, \delta)$ называется *видимым*, отнесенным к моменту наблюдения, с координатами эпохи звездного каталога или карты,

которые надо привести к началу года. Кроме того, при большом интервале наблюдений (несколько часов) следует учитывать *суточное смещение* R. Затем вводим поправки на следующие эффекты.

а) Сопротивление воздуха. Из-за сопротивления воздуха скорость метеора убывает и под влиянием земного притяжения он движется по более крутой траектории, чем если бы этого сопротивления не было (рис 102). Угол между касательными к обеим

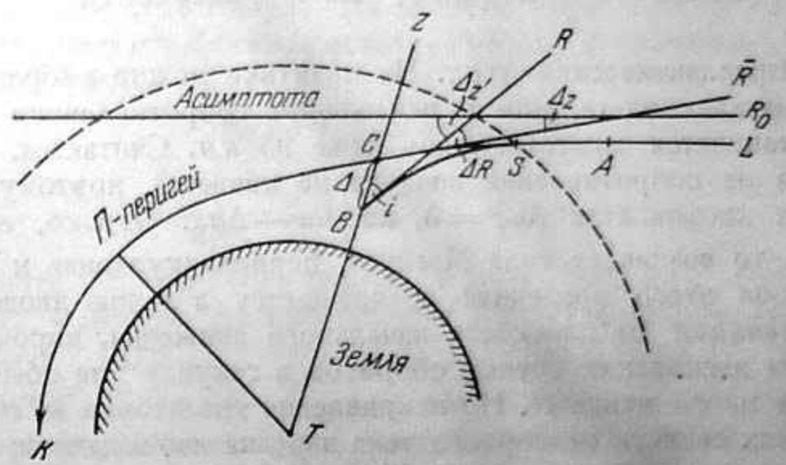


Рис. 102. Траектория метеорного тела относительно Земли при отсутствии атмосферы (*LASCПK*) и при наличии атмосферы (*LASB*).

Δz — естественная, $\Delta z'$ — истинная кривизна траектории. R — кажущийся радиант, $\bar{R}$ — исправленный радиант, R_0 — топоцентрический радиант. $\Delta R = \Delta z' - \Delta z$ — кривизна сопротивления.

траекториям в соответствующих точках на одной вертикали есть $\Delta R = h'_R - h_R > 0$, где h'_R — угол наклона траектории, искаженной сопротивлением воздуха. Внешняя баллистика дает возможность находить изменение его тангенса в зависимости от изменения длины проекции L' траектории на горизонтальную плоскость, вызванного торможением:

$$\Delta \operatorname{tg} h_R = \frac{g}{v_x^2} \Delta L'.$$

Здесь g есть ускорение силы тяжести, а v_x — горизонтальная проекция скорости. Для обычных метеоров торможение заметно лишь в конце полета и Δh_R ничтожно. Например, для метеора 15 августа 1950 г., сфотографированного в Ашхабаде и на базисной станции, при длине пути $L = 26{,}5$ *км*, $h_R = 50°18'$ и скорости $v_0 = 34{,}6$ *км/сек*, уменьшившейся на протяжении последних 11 *км* пути до 32,5 *км/сек*, вычисленное $\Delta h'_R = 0',1$. Однако для долго и полого летящих болидов, скорость которых уменьшается до 1,5—2 *км/сек*, Δh_R может составить несколько градусов, для падающих метеоритов — десятки

градусов, так что, например, направления пробитых ими отверстий в почве отнюдь не могут дать направления на радиант.

Также очень значительно влияние сопротивления воздуха на положение радианта $R(\alpha, \delta)$ телескопических метеоров; для медленных метеоров Δh_R также может составить десятки градусов. При не слишком больших Δh_R поправки $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ радианта таковы:

$$\Delta\alpha \cos\delta = +\Delta h_R \sin Q; \quad \Delta\delta = +\Delta h_R \cos Q, \tag{5}$$

где Q — параллактический угол. На практике можно выбрать направление в начале полета, еще не искаженное сопротивлением воздуха, которое становится заметным лишь ниже 95 *км*. Считается, что азимут полета от сопротивления воздуха не меняется, поэтому в горизонтальных координатах $\Delta a_R = 0$, $\Delta z_R = -\Delta h_R$. Однако, если тело вращается, то возникает сила Магнуса, перпендикулярная к траектории, и из-за этого последняя превращается в линию двоякой кривизны. *Девиация* от плоскости начального движения, впрочем, мала и даже при нескольких сотнях оборотов в секунду для обычных метеоров она много менее 1′. Но искривления траектории за счет аэродинамических свойств метеорного тела изредка наблюдаются; их влияние исключается выбором направления в начале полета.

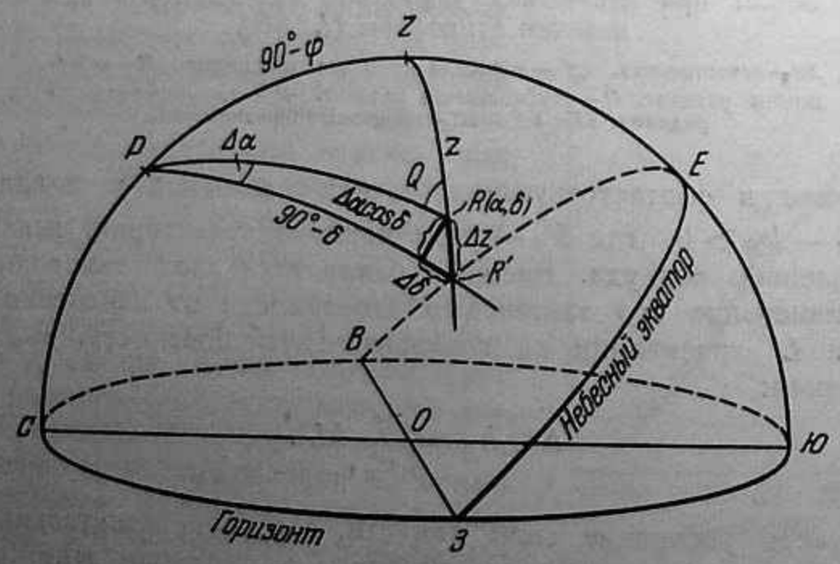


Рис. 103. Влияние зенитного притяжения Δz на координаты α и δ радианта R. Q — параллактический угол.

б) Зенитное притяжение. Под действием земного притяжения первоначальное направление движения метеорного тела искривляется по направлению к центру Земли на угол Δz (рис. 103); обратная ему по знаку величина называется *поправкой зенитного притяжения* и дается формулой Скиапарелли:

$$\operatorname{tg}\frac{\Delta z}{2} = \frac{v_g' - v_g}{v_g' + v_g} \operatorname{tg}\frac{r_R'}{2}, \tag{6}$$

где $v_g' = +\sqrt{v_g^2 + 2gr}$ есть *геоцентрическая скорость* метеора v_g, искаженная земным притяжением, g — ускорение силы тяжести, r — радиус-вектор метеора. Из-за зенитного притяжения радиант (a_R, z_R') оказывается ближе к зениту, поэтому поправки его координат будут (рис. 103):

$$\Delta a = 0, \quad \Delta z = z_R - z_R',$$

или

$$\Delta\alpha \cos\delta = -\Delta z \sin Q, \quad \Delta\delta = \Delta z \cos Q. \tag{6′}$$

В зените $\Delta z = 0°$, обычно $\Delta z = 1$—$3°$, но близ горизонта для медленных метеоров Δz превосходит 20°. Для упомянутого метеора 15 августа 1950 г. $v_g' = \sqrt{20{,}3^2 + 124{,}9} = 23{,}17$ *км/сек* и $\Delta z = +2°03'$. Видимый радиант после введения поправки ΔR за сопротивление воздуха будет *«исправленным»*, после учета зенитного притяжения Δz — *топоцентрическим*, после учета вращения наблюдателя с Землей — *геоцентрическим* и после поправки за орбитальную скорость Земли — *гелиоцентрическим*. Если метеорное тело проникло в солнечную систему извне, то можно найти его *космический радиант* $R_*(\alpha_*, \delta_*)$. Так последовательно мы освобождаемся от влияний таких факторов, как наличие атмосферы на Земле, ее притяжение, вращение и обращение вокруг Солнца и, наконец, положение в солнечной системе.

в) Суточная аберрация. Сферическая астрономия учитывает влияние суточного движения наблюдателя со скоростью $v_e \cos\varphi$, где v_e есть линейная скорость точки экватора, а φ — широта места. Если v есть *мгновенная* скорость метеора, то

$$\Delta\alpha = -\frac{v_e \cos\varphi}{v} \cos t_R \sec\delta_R; \quad \Delta\delta = -\frac{v_e \cos\varphi}{v} \sin t_R \sin\delta_R. \tag{7}$$

Численно $\frac{v_e}{v} \cdot \frac{1}{\text{arc } 1°} = 26°{,}57/v$ *км/сек* и $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ составляют доли градуса. В нашем примере часовой угол радианта $t_R = -34°08'$; ($\delta_R = +44°07'$), $v_e \cos\varphi = 0{,}367$ *км/сек*, $v = 20{,}3$ *км/сек*, $\Delta\alpha = -1°19'$, $\Delta\delta = +0°40'$. Полная поправка за суточную аберрацию ΔA будет

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta\alpha \cos\delta)^2 + (\Delta\delta)^2}.$$

г) Годичная аберрация. Пусть v_t есть скорость Земли на орбите, направленная к апексу A, а v_h — *гелиоцентрическая скорость* метеора по направлению из истинного (гелиоцентрического)

радианта R', который мы ищем (рис. 104). Угол между направлениями на A и R' есть *истинная элонгация* ε'. В результате геометрического сложения скоростей получается *геоцентрическая* скорость v_g из геоцентрического радианта R, имеющего *видимую элонгацию* ε от апекса. Из наблюдений известны ε и v_g; тогда по теореме синусов находим ε' и v_h:

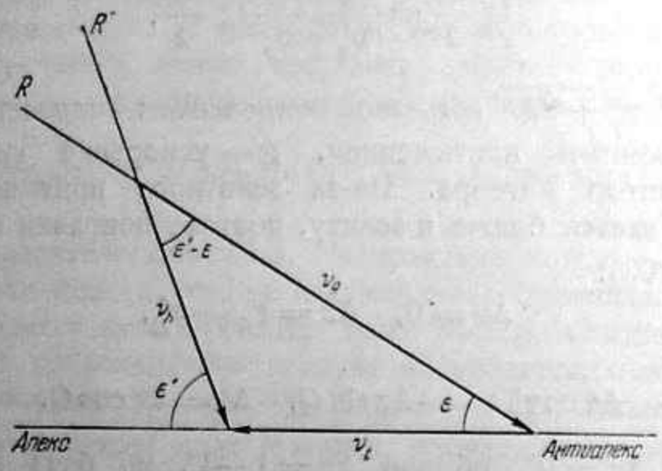


Рис. 104. «Треугольник скоростей». Определение истинного положения радианта R' по видимому R.

$$\operatorname{tg}\varepsilon' = \frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{1 - \frac{v_t}{v}\sec\varepsilon};$$

$$v_h = v_g \sin\varepsilon \operatorname{cosec}\varepsilon'. \qquad (8)$$

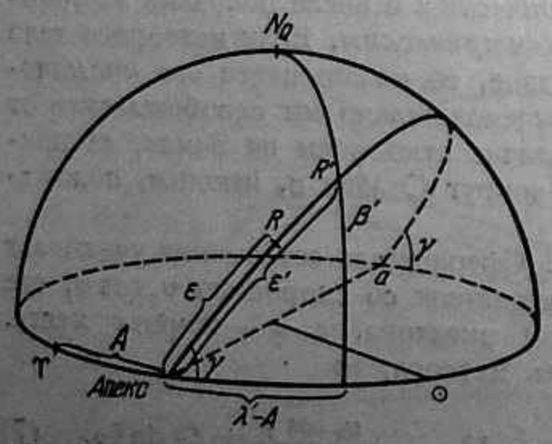


Рис. 105. Истинный радиант R' (λ', β') лежит дальше от апекса, чем видимый радиант R (λ, β).

Вводить поправки ΔR и Δz было удобнее в горизонтальной системе координат, ΔA — в экваториальной, здесь же удобнее эклиптическая система (λ, β). Так как векторы v_t и v_h лежат в одной плоскости, то апекс A, геоцентрический радиант $R(\lambda_R, \beta_R)$, истинный радиант $R'(\lambda'_R, \beta'_R)$ и антиапекс лежат на одном большом круге небесной сферы, пересекающем эклиптику под углом γ (рис. 105). Тогда решение сферических треугольников с общим углом γ и сторонами ε, $\lambda - A$, β и ε', $\lambda' - A$, β' дает

$$\sin\gamma = \sin\beta \operatorname{cosec}\varepsilon;\quad \sin\beta' = \sin\varepsilon' \sin\gamma;\quad \cos(\lambda' - A) = \cos\varepsilon' \sec\beta', \qquad (9)$$

откуда получаем координаты истинного радианта $R'(\lambda'_R, \beta'_R)$. Долгота апекса $A = \odot - 90° + \Delta\odot$, где $\Delta\odot = 0°,96 \sin(\odot - 102°04',8)$,

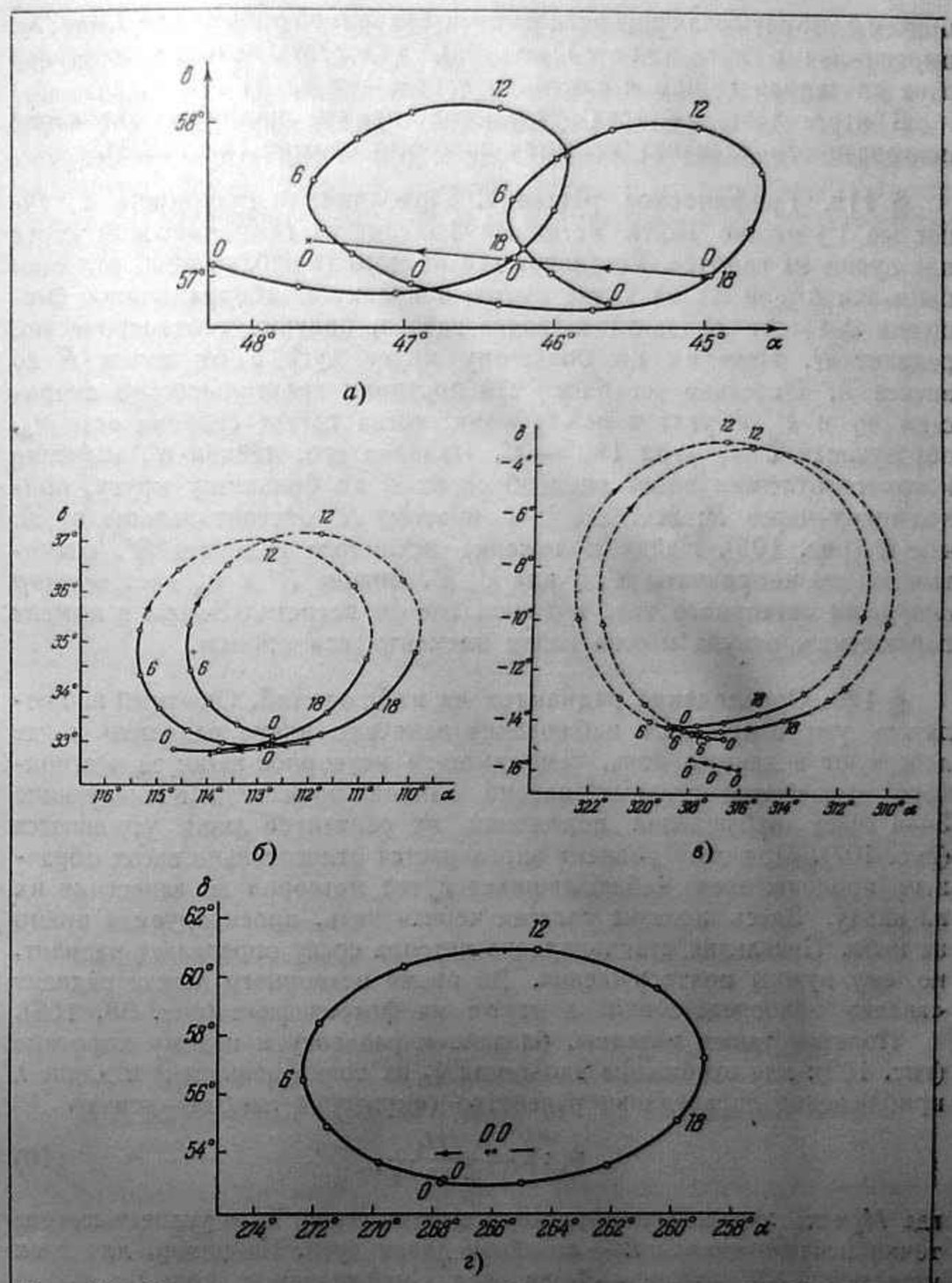


Рис. 106. Смещение радиантов потоков Персеид (*а*), Геминид (*б*), δ-Акварид (*в*) и Драконид (*г*) за 2 суток с учетом зенитного притяжения, суточной аберрации и движения радианта.

Прямые — движение исправленного R, кривые — видимого R. Числа на кривых указывают часы суток. По расчету А. Н. Симоненко.

причем 0°,96 есть величина эксцентриситета земной орбиты ($e=0{,}01673$), выраженная в дуге (e : arc $1^\circ = 0{,}96$), а долгота земного перигелия дана для эпохи 1950,0 и ежегодно возрастает на 61″,9.

В итоге действия всех указанных причин видимое положение исправленного радианта меняется довольно сложно (рис. 106).

§ 119. Графическое решение. Приближенно (например, с точностью 1°) можно найти истинный радиант на гномонической карте или лучше на глобусе. Установив его на момент наблюдения, отложим поправки Δh_R и Δz на круге высот, поправку за аберрационное смещение ΔA — от радианта к точке запада, получим геоцентрический радиант R. Измерим по большому кругу дугу ε от точки R до апекса A. Отдельно на плоскости построим треугольник по скоростям v_t и v_g и углу ε между ними; тогда третья сторона есть v_h, образующая с v_t угол $180^\circ - \varepsilon'$. Измерив его, найдем ε', значение которого отложим вновь на глобусе от A по большому кругу, проходящему через R; всегда $\varepsilon' > \varepsilon$, поэтому R' отстоит дальше от A, чем R (рис. 105). Найдя положение истинного радианта R', отсчитываем его координаты α', δ' или λ', β'. Знание R' и v_h дает *вектор скорости* метеорного тела в точке, где он встретил Землю в момент наблюдения, откуда можно найти элементы его орбиты.

§ 120. Определение радиантов из наблюдений. Опытный наблюдатель уже в процессе наблюдения замечает, какие радианты и где действуют в данную ночь, чем «дышит» метеорное небо; за час-полтора выясняются главные потоки данной ночи и в последующие 3—4 часа наблюдений положения их радиантов лишь уточняются (рис. 107). При этом радиант определяется относительно звезд обратным продолжением наблюдавшихся путей метеоров до занесения их на карту. Здесь полезна толстая черная нить, проектируемая прямо на небо. Появление стационарного метеора сразу определяет радиант, но ему нужны подтверждения. Во время метеорного дождя радиант «виден» непосредственно, а также на фотографиях (рис. 38, 108).

Полезны также метеоры, близкие к радианту и потому короткие (рис. 109): для отношения элонгации ψ_1 их точки появления к длине λ приближенно справедливо равенство («критерий ламбда—пси»)

$$\psi_1 : \lambda = \frac{H_2}{L \sin h_2}, \qquad (10)$$

где H_2 есть линейная высота точки исчезновения, h_2 — угловая высота точки исчезновения и L — линейная длина пути. Например, для трех метеоров $+5$, $+2$ и -1 зв. вел., наблюдаемых при $z = 45^\circ$ и высоте радианта $h_R = 45^\circ$, отношение $\psi_1 : \lambda$ примерно равно 18, 10 и 5. Это значит, что метеор длиной $\lambda = 1^\circ$ появится соответственно на 18, 10 и 5° от радианта, при $\lambda = 2^\circ$ — пропорционально дальше. Близ зенита $\psi_1 : \lambda$ было бы меньшим. Очевидно, что с уменьшением ψ и h угловая скорость ω также уменьшается.

При определении радиантов следует возможно точнее определять положение большого круга, вдоль которого летит метеор, даже положения точек *появления* A и *исчезновения* B менее важны. Учет общности физических характеристик метеоров, перспективного сокращения λ и угловой скорости ω позволяет отсеивать фиктивные радианты. Очень большие λ имеют метеоры из радиантов, находящихся на горизонте; у метеоров с параллельными траекториями $\psi \approx 90^\circ$ и т. д.

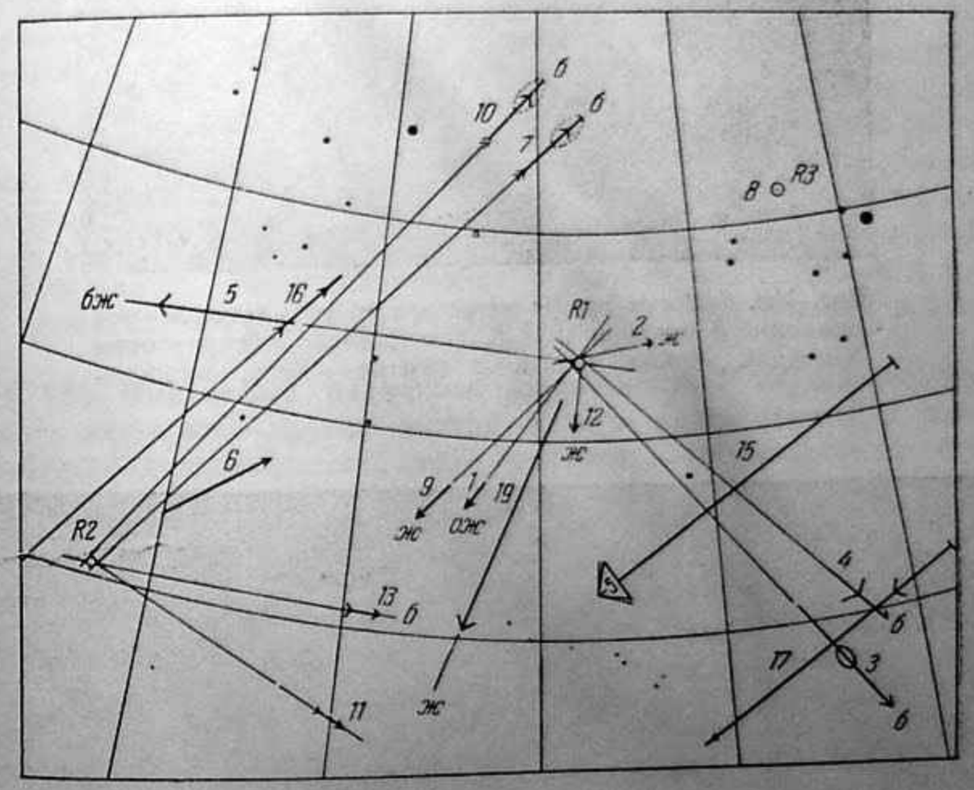


Рис. 107. Определение радиантов (на карте в гномонической проекции).

Обратно продолженные пути метеоров дали радианты *R1* и *R2*, стационарный метеор *8* — радиант *R3*. Метеоры *6* и *19* не принадлежат радиантам *R2* и *R1* по соображениям перспективы (условие $\lambda < \psi$) и являются спорадическими. Болид *15* и метеор *17* параллельны — их радиант отстоит на $\phi \sim 90^\circ$. Метеор *16* плохо нанесен и не учитывается при определении положения радианта *R2*, хотя по физическим свойствам отнесен к нему.

За радиант на карте принимается центр малого круга возможно меньшего радиуса, через который проходят или которого касаются все метеоры данного радианта. Метеоры, которые по своим характеристикам тоже могут принадлежать этому радианту, но проходящие только вблизи него, указываются в скобках и для определения положения радианта не учитываются (рис. 107). При нанесении на одну карту 100—120 метеоров за ночь радиант по четырем метеорам, круги которых проходят внутри окружности 3° диаметром, при близости значений $\omega_z = \omega \sec z \operatorname{cosec} \psi$ и «фамильном» сходстве имеет

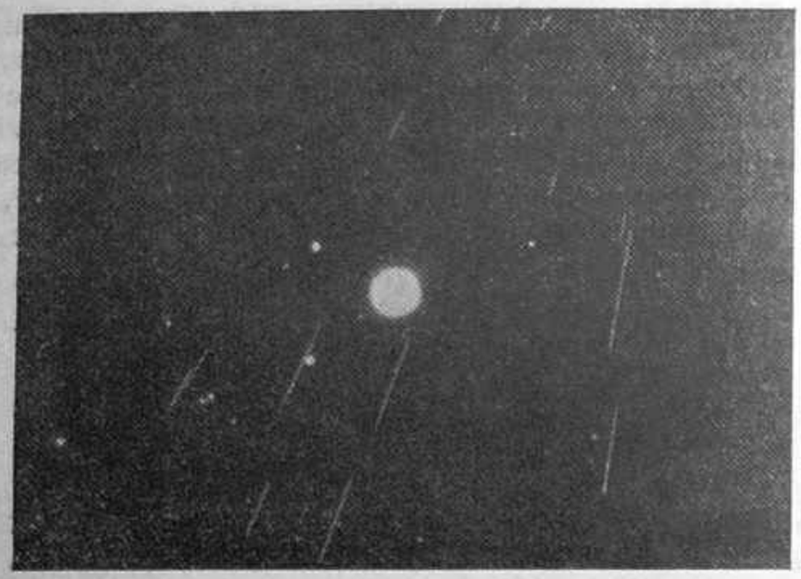


Рис. 108. Фотография 25 метеоров во время максимума Драконид 9 октября 1933 г. (по Кенниссе, обсерватория Жювизи). Яркая звезда в центре — Вега, площадь снимка $11 \times 15°$.

Рис. 109. Два метеора из общего радианта (Персеиды, 11 августа 1953 г.), снятые через обтюратор. Интервал между перерывами — 0,04 *сек*.

минимальный вес. Если он подтвердится в смежные ночи или при той же долготе Солнца ⊙ в другие годы, то может считаться достоверным радиантом потока.

Однако множество факторов осложняют положение: эклиптикальные радианты очень размыты, полет метеора в беззвездной области неба снижает точность наблюдений, быстрые метеоры наблюдаются хуже, чем медленные, метеоры со следами — много точнее, чем без следов, более короткий метеор кажется более быстрым, более яркие метеоры — более белыми, чем прочие метеоры того же потока, и т. д. Формальный подход здесь неуместен и в каждом отдельном случае исследователь должен сам судить о качестве выводимого радианта. Обычное число радиантов — около $^1/_{10}$ от числа нанесенных метеоров. Поточные радианты активны 2—5 дней. Параллельные наблюдения, обработанные независимо, дают хороший контроль, но при больших расстояниях (сотни *км*) наблюдаются разные группы метеоров и радианты у них могут слегка различаться. Метеоры одного радианта имеют тенденцию появляться парами или группами в течение немногих минут, давая иногда только спорадический радиант.

§ 121. Фиктивные радианты. Вероятность P случайного пересечения метеорных кругов внутри малого круга радиуса ρ (задача Клейбера) — невелика: так, если учитывать направление и брать $\phi < 90°$, то при $\rho = 1$ и 4° для трех больших кругов $P = 1:391$ и $1:101$ соответственно (Чепмен, 1905 г.). В 1929 г. В. А. Мальцев, а затем Т. Е. Лыткина бросали иголки на гномоническую карту, прочерчивали их пути, как если бы они были метеорными, и искали «радианты» по 2, 3, 4 и более «метеорам». Таких бросаний Лыткина проделала 10 000. Фиктивных радиантов в обоих опытах оказывалось вдвое меньше, чем обычно выводится радиантов по такому же числу метеоров (рис. 101). В 1948 г. Гофмейстер составил особые таблицы для учета фиктивных радиантов, и, кроме того, решил задачу для части сферы радиусом 25° при $\rho = 3°$ и числе метеоров $n > 25$. Оба способа показали, что при формальном подходе 50% радиантов фиктивны. Применяя уже описанные физические, кинематические и геометрические критерии, В. В. Федынский еще в 1935 г. показал, что можно отсеять до 95% фиктивных радиантов, что и делается в СССР.

§ 122. Методы нахождения радиантов. Радианты одиночных метеоров могут быть найдены односторонним, двухсторонним и многосторонним способом. В первом случае требуется какое-либо дополнительное условие, позволяющее решить уравнение метеорного круга с двумя неизвестными координатами радианта. Радиант из двухсторонних наблюдений находится совместным решением уравнений (15) двух метеорных кругов: одна из двух точек их пересечения есть радиант R. Многосторонние наблюдения относятся обычно к ярким болидам и

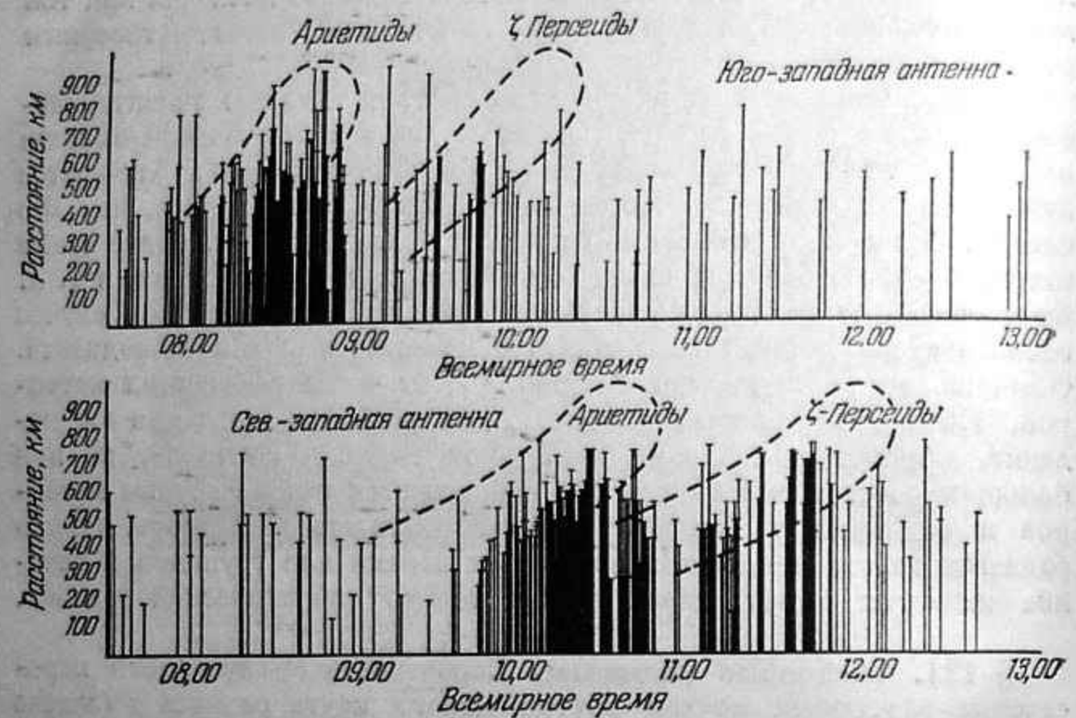


Рис. 110. Моменты появления и дальность метеоров из дневных радиантов по радионаблюдениям 9 июня 1950 г. на двух антеннах (метод Хея и Стьюарта).

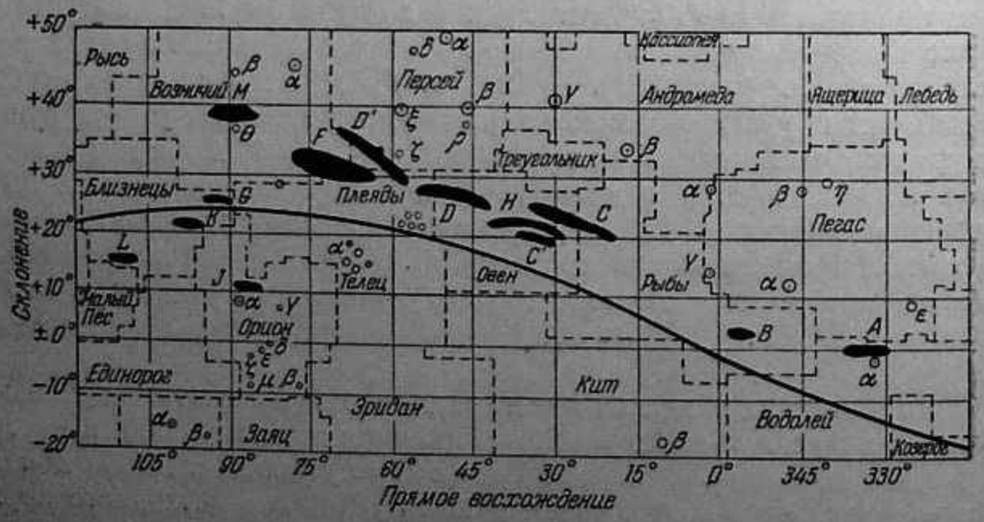


Рис. 111. Дневные метеорные радианты (зачерненные области), найденные из радионаблюдений в 1949 г. (по Ловеллу и Клеггу).

число их может доходить до 500—600, поэтому такие наблюдения позволяют найти наивероятнейший радиант по способу наименьших квадратов.

Еще в 1901 г. Деннинг нашел хорошее согласие групповых радиантов с двухсторонними; пятьдесят лет назад в Англии определение 15 двухсторонних радиантов за одну ночь вызвало восторг наблюдателей метеоров, ныне такой же фотографический материал является обычным делом. Радиометоды определения радиантов, как мы видели, также основаны на работе одной или нескольких станций. В методе Клегга используется то, что эхо видно при $\lambda < 8$ *м* только при $\psi = 90°$, откуда, зная направление излучения, можно найти большой круг, на котором расположен радиант; переменив направление антенны, находим второй большой круг; пересечение обоих кругов дает точку R. Другой метод Хея — Стьюарта при этом использует одновременно работающие две станции, излучающие в разных направлениях (рис. 110). Некоторые результаты таких определений представлены на рис. 111. Канадский метод дает линейное расстояние до метеора в данное мгновение от трех станций, что однозначно определяет его пространственное положение; то же находится для другого момента, откуда получается направление на радиант.

§ 123. Односторонние методы определения радиантов. Между элонгацией (ψ_1, ψ_2) от радианта R начала (A) и конца (B) пути метеора, угловой длиной пути $AB = \lambda$, зенитным расстоянием (z_1, z_2) точек A и B, их линейными высотами H_1, H_2 и длиной L существует зависимость (см. § 139):

$$\sin\psi_1 = \frac{H_2}{L}\cdot\frac{\sin\lambda}{\cos z_2};\quad \sin\psi_2 = \frac{H_1}{L}\cdot\frac{\sin\lambda}{\cos z_1}. \tag{11}$$

Для метеоров данной яркости по эмпирическому соотношению можно найти отношение $H_2 : L$ (К. П. Станюкович [388]) и отношение $H_1 : H_2$ (§ 140), а зная из наблюдений z_1, z_2 и λ, найдем отсюда ψ_2 и ψ_1 с контролем $\lambda = \psi_2 - \psi_1$. Для коротких λ заменяем синус дугой и, деля числитель и знаменатель на продолжительность τ, найдем другое выражение:

$$\sin\psi_1 = \frac{H_2}{\cos z_2}\frac{\omega}{v}\frac{1}{\text{arc } 1°};\quad \sin\psi_2 = \frac{H_1}{\cos z_1}\frac{\omega}{v}\frac{1}{\text{arc } 1°}. \tag{12}$$

Линейную скорость v здесь следует найти косвенным путем, например по цвету, и зная ω из наблюдений, независимо получаем ψ_1 и ψ_2. Рассмотренный выше способ нахождения R при малой λ или $\lambda = 0$ есть частный случай одностороннего метода. Наконец, исключая L, находим ψ_1 и ψ_2 из двух уравнений:

$$\frac{\sin\psi_1}{\sin\psi_2} = \frac{H_2}{H_1}\cdot\frac{\cos z_1}{\cos z_2};\quad \psi_2 - \psi_1 = \lambda. \tag{13}$$

Здесь $H_1 : H_2$ можно найти из контурных наблюдений (§ 140). При

наличии таблиц отношений $H_1 : L$ и $H_2 : L$ в функции яркости m_0, скорости v и наклона траектории h_R точность определения ψ около $10^0/_0$. Обычно опытный наблюдатель на основании практики учитывает эти обстоятельства при наблюдении и уже по общему виду метеора может определить ψ до $\pm 5°$. Метод полезен для бедных потоков и в случае близких траекторий, дающих плохую засечку радианта, а также при решении вопроса о принадлежности метеора тому или иному радианту. В обычную ночь за четыре часа по 60 метеорам можно найти 6—8 поточных радиантов, тогда как односторонние методы теоретически должны дать все 60 радиантов, практически же 30—40. Знание только высоты h_R радианта в комбинации с положением метеорного круга также дает R из очевидного соотношения

$$\sin h_R = \frac{H_1}{L} - \frac{H_2}{L}. \qquad (14)$$

Для примера приведем определение координат R односторонними методами для метеора 1944 X 25 21 *ч.* 13 *м.* MB (Ашхабад), $m = 5$ *вел.*, $\lambda = 11°$, $p = 0{,}6$, $\tau = 0{,}40$ *сек*, $\alpha_1 = 33°$, $\delta_1 = 0°$, $\alpha_2 = 23°$, $\delta_2 = -6°$. Вычисления дают:

Метод определения	Координаты радианта α_R	δ_R
Оценка наблюдателя в журнале наблюдений . .	95°	+22°
Формула (14) по H_1, H_2 и L	99	+24
» (12) по H_1, H_2, v и ω	101	+25
» (13) по H_1, H_2 и L через высоту h_R .	93	+21
Из наблюдений других метеоров этого потока .	98	+22
Среднее	97°	+25°

§ 124. Двухсторонние методы. Эти методы основаны, как мы видели, на том, что радиант является единственной общей точкой видимых с концов базиса путей метеора и потому находится на пересечении их метеорных кругов. Уравнения последних можно писать в виде:

$$\operatorname{tg}\delta_R \sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \operatorname{tg}\delta_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_R) + \operatorname{tg}\delta_1 \sin(\alpha_R - \alpha_2) = 0 \qquad (15)$$

и аналогично для второй станции. Совместное их решение дает $R(\alpha_R, \delta_R)$. Для уверенной засечки длину базиса следует брать $b = 30$—50 *км*.

§ 125. Многосторонние методы. Они основаны на том же принципе, что и двухсторонние. Радиант можно находить так же, как он определяется по наблюдениям нескольких метеоров в одном пункте, если пути нанесены на звездную карту в гномонической проекции; если точки пути метеора даны в горизонтальных координатах, то их следует для каждого пункта перевести в экваториальные. При пользовании глобусом его следует ориентировать по горизонту каждого пункта. Для получения наивероятнейших координат радианта R можно наложить условие, чтобы сумма квадратов сферических перпендикуляров, опущенных из R на каждый круг, была минимальной, или чтобы сумма квадратов ошибок углов поворота траекторий была наименьшей (принцип Лежандра).

§ 126. Точность определения радиантов. Ошибка в определении положения R вызовет соответствующую ошибку в элементах орбиты. Точность определения радианта зависит от точности определения положения метеора при базисных наблюдениях (включая радиофизические) и, кроме того, от дисперсии точек на эмпирических кривых, привлекаемых как добавочные условия в односторонних методах.

Уже при первых определениях положений метеоров в 1798 г. Брандес и Бенценберг пробовали для повышения точности применять сделанные ими деревянные приспособления. С тех пор было предложено свыше десятка разных метеороскопов, как механических, так и оптических, однако они не увеличивали точности наблюдений, а работу усложняли. Бессель (1839 г.) и Кетле предлагали учитывать только направление траектории, точное до $\pm 1°$ (Вейсс, 1870 г.). Лабораторные испытания, проведенные тахистоскопом Н. М. Субботиной (1912—1918 гг.), проекционным аппаратом В. В. Федынским и Б. М. Машбицем (1930 г.), Хоппе в планетарии в Иене с помощью «метеорного аппарата» (1935 г.), чешскими и английскими наблюдателями в 1935—1937 гг., — указали на наличие ошибок в положении точек A и B порядка 1—2° и в направлении до 1°. Сравнение параллельных фотографических и визуальных наблюдений (Лыткина, 1934 г.; Гофмейстер 1934 г.) подтвердило это.

Положение точечного радианта по Деннингу определяется не точнее 1—2°, А. Кинг давал 0°,5, Ниссль считал ошибку $\varepsilon = \pm 3°{,}3$ при $n = 12$—15, до 0°,4 в случае многих наблюдений (Лириды). Куксон полагал пределом 0°,2—1°,1 при $n = 20$—30, лабораторные опыты Свободы дали $\varepsilon = \pm 0°{,}5$ при $n = 15$—20. В 1936 г. Уотсон и Кук для опытного и неопытного наблюдателя нашли $\pm 4°$ и $\pm 12°$. Так как к радианту на практике относят метеоры, проходящие на 2—3° от него, то при $\psi = 45°$ это дает ошибку поворота $2°{,}8$—$4°{,}2$. Из параллельных наблюдений малоопытных лиц И. А. Дюков (Казань) в 1925 г. нашел разницу 5°,5 в положении радианта Персеид, Машбиц в 1926 г. — всего 1°,4 на более обширном материале. Автор полагает, что довольно редко $\varepsilon = \pm 0°{,}5$, так как площадь радиации не бывает точкой. Хорошо замеченные метеоры, длинные или со следами, обеспечивают $\pm 1°$, часто $\pm 2°$, при $n = 6$—8. Диаметр площади радиации часто составляет 2—3°, иногда до 6°.

Таким образом, практический предел ε около $0°{,}5 - 1°$.

Применение телескопа повышает точность в G раз, где G — применяемое увеличение; в 1921 г. с помощью кометоискателя Московской обсерватории Эпик нашел, что площадь радиации Персеид больше поля зрения этого прибора. В 1930 г. из базисных

телескопических наблюдений в Ленинграде автор уточнил радиант Лирид [173], в 1932 г. — радиант сентябрьских Цигнид (в бинокль), А. М. Бахарев в Сталинабаде с 1937 г. радианты Орионид и других потоков. Поправки радианта ΔA, Δz при этом следует вычислять точно. Точность фотографических радиантов по нескольким метеорам в одном пункте ограничена площадью радиации, при базисных снимках — углом q между направлением параллактического смещения и полета метеора; когда метеор летит в плоскости базиса, $q=0$, и радиант определить нельзя*). Обычно короткофокусные камеры дают R с точностью до нескольких десятков минут, иногда до $1'$, редко до $0',1$. Радиорадианты в первое время имели точность до $10°$, теперь метод Клегга может дать $\pm 1°$, канадский метод для отдельных метеоров $\pm 0°,1$. Наконец, радианты болидов, полученные из массовых наблюдений случайных очевидцев, определяются с точностью до $\pm 6°$ (Ниссль).

§ 127. Статистический подход к определению радиантов. При обработке визуальных наблюдений Аризонской экспедиции 1931—1933 гг. ввиду значительных ошибок $\Delta\delta$ Эпик предложил рассматривать радиант не как абсолютно достоверный, а лишь как вероятный. Пусть доля K ошибок $\Delta\delta$ находится на одной половине интервала распределения, а $(1-K)$ — на другой. Из n_ϕ метеоров фона в эти интервалы попадет одинаковое число, а из n_p метеоров потока, если он реален, — разное число. Тогда число всех метеоров в первой половине интервала будет $n_1 = Kn_p + 0{,}5n_\phi$, а во второй $n_2 = (1-K)\,n_p + 0{,}5n_\phi$. Условимся степень достоверности потока характеризовать концентрацией $C = \frac{n_1}{n_2}$. При этом число метеоров потока будет $n_p = \frac{n_1 - n_2}{2K-1}$, а фона $n_\phi = n_1 + n_2 - n_p$. Вероятность P того, что полученный радиант фиктивен, дается теорией вероятностей

$$P = \frac{n_1 + n_2}{n_1! n_2!} \cdot p^{n_1} (1-p)^{n_2}. \qquad (16)$$

Здесь $p = \frac{1}{2}$ есть вероятность случайного метеора в нашем интервале. Суммируя все P, находим математическое ожидание E фиктивных радиантов на нашей карте неба. Например, по аризонским данным:

№	Дата	α	δ	Поток	Концентрация	Ожидание E
15	1931 X 16	95°	+16°	Ориониды	58 : 30	0,04
31	1931 XI 16	152	+22	Леониды	326 : 43	10^{-22}
130	1932 VIII 6	74	+63	Персеиды	73 : 35	0,004

*) За исключением случаев, когда на траектории заметны взрывы или другие физические особенности, позволяющие отождествить их в обоих пунктах наблюдения.

Из 2000 предварительных радиантов Аризонской экспедиции после отсева R с $C < 0{,}2$ осталось 223. В 1949 г. к этому методу вновь обратился Гофмейстер. Недостаток метода заключается в необоснованном применении теории вероятностей к малому числу метеоров (4—8, редко больше) и в отсеве заведомо реальных радиантов, когда у них мало n_p.

§ 128. Графическое определение радиантов. О применении для этой цели гномонической сетки или звездного глобуса нами упоминалось (рис. 51, 97, 107). Для этой же цели может служить планисфера В. В. Каврайского и отчасти сетка Вульфа. Далее, так как при отсутствии дисторсии объектив дает на негативе центральную проекцию небесной сферы, то радиант потока можно найти на том же негативе обратным продолжением путей фотометеоров (рис. 99, 108 и 109). Предварительное графическое нахождение R полезно и при аналитическом решении.

§ 129. Аналитическое определение радиантов. Способ И. А. Клейбера (1884 г.). Раскроем скобки в уравнении (15) и введем обозначения:

$$a = \frac{-\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\operatorname{tg}\delta_1 \sin\alpha_2 - \operatorname{tg}\delta_2 \sin\alpha_1}; \quad b = \frac{\operatorname{tg}\delta_2 \cos\alpha_1 - \operatorname{tg}\delta_1 \cos\alpha_2}{\operatorname{tg}\delta_1 \sin\alpha_2 - \operatorname{tg}\delta_2 \sin\alpha_1};$$

$$x = \operatorname{tg}\delta_R \sec\alpha_R; \quad y = \operatorname{tg}\alpha_R.$$

Тогда уравнение метеорного круга напишется в виде $ax + by + 1 = 0$; такое же уравнение будет для второй траектории. Решая их совместно, находим α_R, δ_R. Если обрабатываются метеоры одного потока, то для момента полета каждого следует ввести поправки радианта $\Delta\alpha_R$, $\Delta\delta_R$; в силу их малости, имеем:

$$\operatorname{tg}(\delta_R + \Delta\delta_R)\sec(\alpha_R + \Delta\alpha_R) = x + \Delta x; \quad \operatorname{tg}(\alpha_R + \Delta\alpha_R) = y + \Delta y. \qquad (17)$$

Если подставить эти значения в уравнение метеорного круга и разделить его на $a\Delta x + b\Delta y + 1$, то вновь получим уравнение того же вида, но с немного отличными коэффициентами, и находим сразу геоцентрический радиант.

Способ Болина (1905 г.). Из уравнения (15) найдем такую точку $E(\alpha_0, \delta_0)$, где метеорный круг пересекает небесный экватор ($\delta_0 = 0$):

$$\operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{\sin\alpha_2 \operatorname{tg}\delta_1 - \sin\alpha_1 \operatorname{tg}\delta_2}{\cos\alpha_2 \operatorname{tg}\delta_1 - \cos\alpha_1 \operatorname{tg}\delta_2}; \qquad (18)$$

угол наклона l метеорного круга к небесному экватору в точке E найдем из

$$\operatorname{tg} l = \frac{\operatorname{tg}\delta_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_0)} = \frac{\operatorname{tg}\delta_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_0)}. \qquad (19)$$

Тогда координаты одного из полюсов метеорного круга будут: $\alpha_p = \alpha_0 - 90°$, $\delta_p = 90° - i$. Проделаем то же для второго метеора и найдем его полюс. Проведем далее третий большой круг через оба полюса: один из его полюсов будет радиантом. Следовательно, искомый радиант есть «полюс круга полюсов метеорных кругов»; другой полюс есть *антирадиант*; различать их можно из условия $\psi < 180°$. Так же можно поступить, если наблюдений имеется несколько.

Способ Клейбера для многих наблюдений. В этом случае мы получим столько уравнений вида $ax + by + 1 = 0$, сколько у нас наблюдений. Будем рассматривать их как условные; сложим квадраты всех коэффициентов при x и y, получим суммы $A = \sum a_i^2$, затем

$$B = \sum a_i b_i, \quad C = \sum a_i, \quad D = \sum b_i^2, \quad E = \sum b_i,$$

после чего составим уравнения

$$Ax + By + C = 0; \quad Bx + Dy + E = 0 \tag{20}$$

и решим их. Как известно, значения x, y будут наивероятнейшие. Зная их, определим радиант. Следует заметить, что аналитические способы трудоемки по сравнению с графическими.

Способ Ниссля для многосторонних наблюдений (1910 г.) является одним из наиболее удобных. Пусть $S = \operatorname{tg}\delta_1 \operatorname{ctg}\delta_2$, тогда $\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha_0) = \frac{S \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{1 - S\cos(\alpha_2 - \alpha_1)}$, и, наконец,

$$\operatorname{tg} i = \operatorname{tg}\delta_1 \operatorname{cosec}(\alpha_1 - \alpha_0); \quad \sin(\alpha_R - \alpha_0)\operatorname{tg} i = \operatorname{tg}\delta_R.$$

Пусть сумма квадратов ошибок поворота будет минимальна. Ищем такие поправки $x = \Delta\alpha_R \cos\delta_R$, $y = \Delta\delta_R$ предварительно найденных координат α', δ' радианта, чтобы выполнялось это условие. Для этого обозначим

$$a = -\sin i \cos(\alpha_R - \alpha_0); \quad b = -\cos i \sec\delta_R; \quad l = -\sin\Delta\delta$$

и вычислим a, b, l для каждого метеора. Затем составим, как выше, систему условных уравнений и решая ее способом наименьших квадратов, найдем x и y и поправки. Тогда $\alpha_R = \alpha'_R + \Delta\alpha_R$; $\delta_R = \delta'_R + \Delta\delta_R$. Чтобы короткие траектории не искажали результат, каждое условное уравнение помножим на вес $\sqrt{p} = \sin(\psi_2 - \psi_1)\operatorname{cosec}\psi_2$.

Еще один аналитический метод, пригодный для обработки двух- и многосторонних наблюдений, был предложен в 1936 г. А. С. Яголимом (Москва), однако этот метод довольно громоздкий. К числу аналитических методов относятся также уже рассмотренные односторонние, дающие элонгацию $\psi_{1,2}$. Чтобы по координатам метеора и

элонгации найти радиант, нужно дважды решить сферический прямоугольный треугольник с углом i при вершине $E(\alpha_0, 0)$. В связи с тем, что много фотографий метеоров получается с марками обтюратора, К. П. Станюкович [353] и П. Миллман предложили использовать перспективное сокращение длины отрезков для определения угла ракурса, т. е. элонгации ψ.

Способ Миллмана-Хоффлейт (1936 г.). Будем измерять положения марок обтюратора на оси x, направленной вдоль фотографии метеора на негативе, и вычислим скорость метеора на негативе $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ *см/сек*. Как показали авторы способа, $v = ax + b$; построим график этой прямой на осях (x, v); из-за торможения в конце полета он слегка загибается вниз. Прямолинейную часть его продолжим до пересечения с осью x; тогда длина отсеченного отрезка $x_0 = -\frac{b}{a}$, а $2\frac{b}{a}$ есть расстояние на негативе до радианта. Отложив его, отмечаем R на негативе и отсчитываем его координаты (α_R, δ_R). Если отметить на пластинке оптический центр и измерить расстояние p от него до начала A отсчета x (точка A — начало свечения), и расстояние q до R, то при длине пути метеора l на пластинке и L в атмосфере можно найти расстояние до метеора:

$$r = \frac{L}{l} \cdot \frac{p}{q} \cdot \left(l - \frac{2b}{a}\right).$$

Способ В. В. Федынского. На участке траектории, где торможение еще незаметно, можно пользоваться формулой Федынского (1951 г.):

$$\operatorname{ctg}\psi_1 = \frac{\operatorname{ctg}(\lambda - \Delta\lambda_1) - n\operatorname{ctg}(\Delta\lambda_1)}{n-1}, \tag{21}$$

где $\Delta\lambda_1$ есть длина первого отрезка, а n — число марок. Практически за первый отрезок берется каждый по очереди и определяется соответствующее ψ, откуда затем находится среднее из всех значений ψ. Таким образом, определяется R по односторонним фотографиям с маркировкой времени. Если известны зенитные расстояния z_k каждой марки k, то К. П. Станюкович предлагает находить зенитное расстояние радианта z_R из соотношения

$$\frac{z_R - z_1}{z_R - z_{k+1}} = \frac{v_k}{v_1} \cdot \frac{z_k - z_1}{z_{k+1} - z_1}, \tag{22}$$

беря в первом приближении $v_k = v_1$. Р. Л. Хотинок (Ашхабад, 1952 г.) использовал выражение, полученное автором,

$$\operatorname{ctg}\psi_1 = \operatorname{cosec}(\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2)\left[\frac{\Delta L_1}{\Delta L_2}\frac{\sin\Delta\lambda_2}{\sin\Delta\lambda_1} - \cos(\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2)\right], \tag{23}$$

где ΔL_i — линейная длина отрезка, в первом приближении принимаемая постоянной. Иногда полезно следующее соотношение:

$$\cos z_R = (\sin\psi_2 \cos z_1 - \sin\psi_1 \cos z_2)\,\mathrm{cosec}\,\lambda; \quad \lambda = \psi_2 - \psi_1. \qquad (24)$$

В 1938 г. в Москве автором был предложен еще аналитический способ определения радианта по направлению линии пересечения двух *метеорных плоскостей*, каждая из которых проходит через станцию наблюдения и через видимое положение метеора [374]. При этом определение радианта является частным этапом при нахождении элементов траектории. Этот метод подробно излагается в курсах определения орбит [342] и здесь мы его не касаемся.

§ 130. Графоаналитические способы. Громоздкость аналитических методов вызвала потребность применить другие методы, в частности, комбинацию графических способов с аналитическими. В. К. Цераский [355] предложил использовать карту с нанесенными траекториями метеоров, уравнения каждой из которых имеют вид

$$\xi\cos\alpha + \eta\sin\alpha - p = 0,$$

где p — длина перпендикуляра, опущенного из начала координат (ξ, η) на траекторию, а α — угол между направлением p и оси ξ. Чтобы сумма всех p_i^2 была наименьшей, должно выполняться условие:

$$2x\sum\cos^2\alpha + y\sum\sin 2\alpha - 2\sum p\cos\alpha = 0;$$
$$x\sum\sin 2\alpha + 2y\sum\sin^2\alpha - 2\sum p\sin\alpha = 0. \qquad (25)$$

Здесь x, y — координаты искомого радианта. А. А. Аленич [334] предлагает с помощью прозрачного масштаба отсчитывать α и p и, найдя указанные $\sum$ в (25), получать алгебраически x, y.

§ 131. Каталоги радиантов. «Изучение радиантов уже принесло прекрасные плоды», писал еще в 1884 г. И. А. Клейбер, составивший наиболее полный каталог своего времени, содержавший 2800 радиантов [11]. К 1940 г. в Москве в Государственном астрономическом институте им. Штернберга автором было закончено составление карточного каталога радиантов XX в.; он содержит практически все радианты, выведенные после появления каталога Деннинга 1899 г. (4367 радиантов XIX в.). [357, см. также 338]. Московский каталог содержит 13 000 радиантов. Однако «желательно, чтобы наблюдатели не столько старались найти как можно больше радиантов, как изучить уже известные» (Клейбер). В 1956 г. опубликован каталог 897 наиболее достоверных радиантов XIX в. [338].

Радиант важен не только как необходимый элемент для вычисления орбиты. Форма и размер площади радиации указывают на возмущения, которым подвергался поток; по величине зенитного притяжения радианта можно найти неизвестную геоцентрическую скорость, по суточному смещению — гелиоцентрическую, по продолжительности действия — ширину потока. Сравнивая теоретические и наблюдаемые радианты, можно доказать или опровергнуть связь потока с кометой.

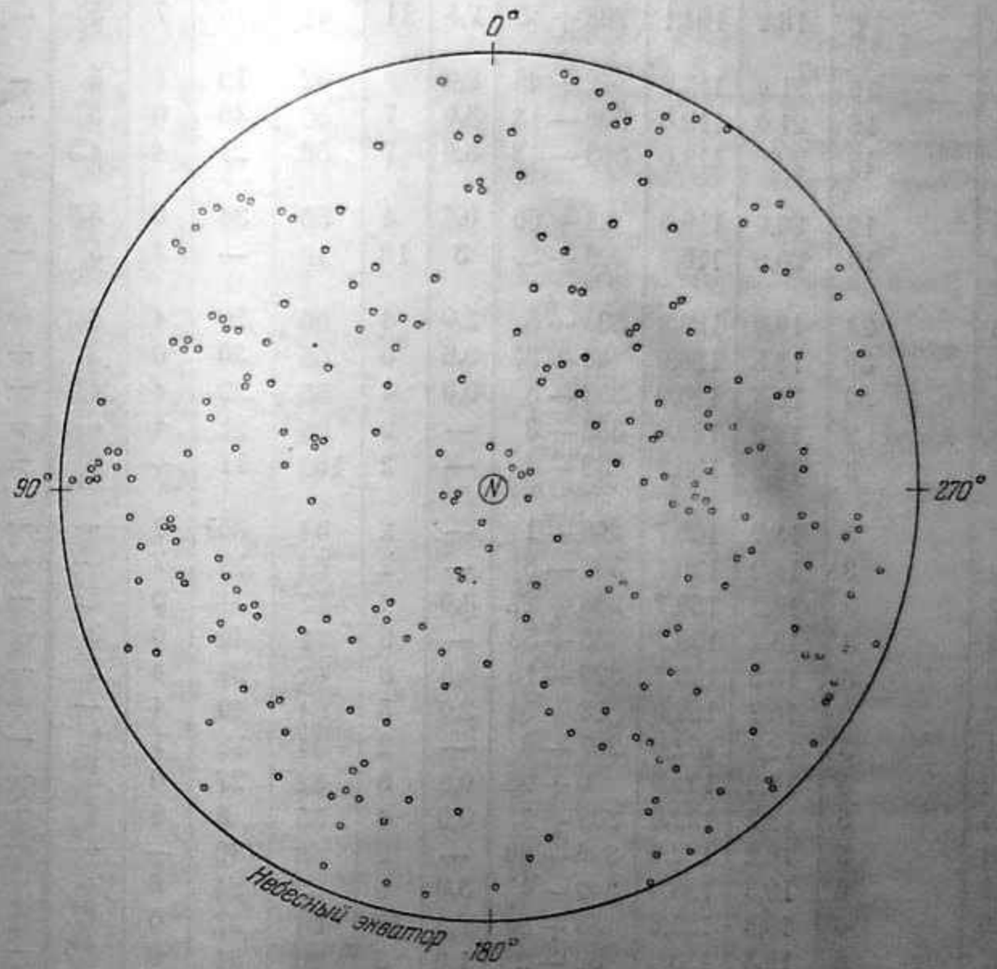


Рис. 112. Равномерность распределения радиантов в северном полушарии неба (по систематическим наблюдениям в течение всего года, Ашхабад, 1944 г., каталог Е. М. Проскуриной).

Особый интерес представляют кратковременные спорадические радианты. Сравнение радиантов с большой разностью эпох позволяет делать выводы об эволюции потоков и вещества в потоке. Видимое распределение радиантов дано на рис. 112.

Приведем некоторые результаты определения радиантов. Форма окончательного современного каталога дана в табл. 4.

Форма окончательного каталога метеорных радиантов

№	Дата 1942 г.	Средн. мир. вр. T	⊙	${}^{\alpha}R$ ${}^{\delta}R$	Δ	n	Ср. $\bar{z}_R$	$\bar{\omega}_z$	$\bar{c}$	$\bar{o}$	S	$\bar{p}$
1	Июль 4	18,5	102°,2	291° + 63°	2°,0	7	28°	20°	6	5	—	—
2	4	18,5	102,2	252 — 8	—	3	50	33	0	4,5	—	—
3	5	18,2	103,1	292 + 72	0,5	5	42	20	6	5	—	—
4	6	18,2	104,1	208 + 55	2,5	11	44	15	7	5	—	0,8
5	16	21,0	113,6	2 + 46	2,0	9	42	19	6	5	—	0,9
6	16	21,0	113,6	306 — 18	3,0	7	55	40	0	5	—	0,6
7	18	20,6	113,6	303 — 18	3,0	7	56	21	4	4,5	—	0,8
8	19	20,6	116,5	24 + 50	0,5	4	56	34	0	3,5	+	0,6
9	19	20,6	116,5	308 + 29	3	10	10	—	4	5	—	0,7
10	23	19,0	120,3	335 — 5	2,0	4	56	20	4	4	—	0,5
11	30	18,5	126,9	40 + 57	0,6	6	65	30	0	3	+	0,7
12	30	18,5	126,9	335 — 5	0,0	4	55	22	4	4,5	—	0,5
13	Август 2	19,2	129,8	338 — 3	—	2	56	21	4	—	—	—
14	3	18,2	130,7	33 — 4	—	2	102	11	—	5	—	?
15	3	18,2	130,7	306 — 1	—	2	44	35?	?	—	—	0,7
16	3	18,2	130,7	335 — 8	—	2	65	19	7	—	—	0,5
17	3	18,2	130,7	288 + 21	3,0	4	17	34	0	5?	—	0,9
18	3	18,2	130,7	35 + 53	—	9	71	42	0	3	+	0,5
19	3	18,2	130,7	320 — 15	0,5	3	62	23	4	5	—	0,9
20	5	18,2	132,6	38 + 54	2,0	5	64	40	4	—	+	0,5
21	5	18,8	132,6	297 — 6	—	2	44	19	7	3	—	0,7
22	5	18,2	132,6	0 + 90	0,8	5	52	27	0	3	—	0,7
23	5	18,2	132,6	339 + 3	0,0	4	55	6	6	4	—	0,9
24	5	18,2	132,6	296 — 30	—	2	68	30	—	—	—	0,7
25	6	19,3	133,6	340 — 4	3,0	9	55	24	6	—	—	—
26	6	19,3	133,6	38 + 54	2,5	16	64	37	0	4,5	+	0,5
27	6	19,3	133,6	33 — 2	1,0	3	90	54	0	3,5	—	0,5
28	6	19,3	133,6	170 + 52	—	2	84	30	—	3	—	—
29	6	19,3	133,6	329 + 10	0,0	4	53	54	0	3,5	+	0,5
30	6	19,3	133,6	297 + 31	—	2	10	19	6	5	—	0,8

Примечание. В этой таблице, представляющей собой первую страницу каталога радиантов ААЛ, T означает момент наблюдения, Δ — поперечник площади радиации, n — число метеоров, z_R — зенитное расстояние радианта R, ${}^{\varepsilon}A$ — его элонгацию от апекса A, c — цвет метеоров (шкала Остгофа), ω_z — редуцированную к зениту угловую скорость, S — наличие (+) или отсутствие (—) следов, o — очерченность, p — положение максимума яркости метеоров, v — атмосферную скорость, ⊙ — долготу Солнца в момент T. Черточка над буквой означает усредненные величины.

по визуальным определениям (Ашхабад, 1942 г.) Таблица 4

$\bar{v}$ км/сек	A	${}^{\varepsilon}A$	Поток	Примечания
24 ± 1	12°,2	82°	о-Драконіды	Активный
39 ± 6	12,2	120	—	Положение радианта неточно
24 ± 1	13,1	83	о-Драконіды	См. № 1
19 ± 1	14,1	120	Боотиды	Радиант кометы Понса-Виннеке. Хороший. К нему болид — 5,5 вел. Иногда метеоры видны попарно
22 ± 3	23,8	42	—	
46	23,8	81	Каприкорниды	Оптич. наложение разных радиантов
29 ± 1	23,8	83	»	Авг. 19 только 2 метеора этого радианта
48 ± 2	26,7	40	—	Четкий поток, не Персеиды
27 ± 4	26,7	74	—	Слабые метеоры; пачка $n = 3$ за 5 секунд
35 ± 1	30,6	53	δ-Акватиды	Еще 6 других слабых радиантов
48 ± 2	30,3	43	—	Неуверенно. Похожи на Персеиды
38 ± 3	37,3	61	δ-Акватиды	Определен неточно. Один из потоков
28 ± 2	40,2	62	»	Один из потоков δ-Акварид
13 ± ?	41,2	224	—	Радиант под горизонтом (!), определен неточно
45	41,2	93	Каприкорниды?	Из эклиптикальной связки.
23 ± 4	41,2	63	δ-Акватиды	Метеор 0 вел. имел $c = 0$
49 ± 3	41,2	104	—	Два метеора одновременно
57 ± 5	41,2	38	Персеиды	Яркие, v по 5 метеорам
30 ± 6	41,2	83	Каприкорниды	На эклиптике; 1 метеор $v = 45$
63	43,2	38	Персеиды	Главный радиант; побочных нет
20 ± 2	43,1	105	—	Радиант, возможно, западнее
44 ± 2	43,1	73	—	Возможно наложение двух радиантов
22 ± 3	43,1	64	δ-Акватиды	Радиант по 3 метеорам
40 ± ?	43,1	112	Сагиттариды	Из эклиптикальной связки
29 ± 4	44,1	65	δ-Акватиды	Вполне уверенны ${}^{\alpha}R$, ${}^{\delta}R$ и v
57 ± 1	44,1	37	Персеиды	Известный поток
75 + ?	44,1	24	Цетиды	Метеоры идут на предельной высоте. Весьма быстрые, близ апекса
42 + 3	44,1	98	—	Возможно ${}^{\alpha}R = 164°$, ${}^{\delta}R = +62°$. Неточно
65	44,1	76	Пегасиды	Одновременно 3 метеора (!) этого радианта
22 + 3	44,1	95	Цигниды	Известный радиант, хотя $n = 2$

§ 132. Распределение видимых траекторий. Видимые траектории метеоров определяют положение радианта. С другой стороны, положение радианта на небесной сфере имеет первостепенное значение в вопросе о распределении направлений и длин как истинных, так и видимых траекторий метеоров. Рассмотрим данные о последних. В зависимости от зенитного расстояния радианта z_R, элонгации $\psi_{1,2}$ метеора и его зенитного расстояния $z_{1,2}$ видимая длина пути λ может быть найдена из выражения

$$\sin\lambda = \sec z_R\left(\sin\psi_2\cos z_1 - \sin\psi_1\cos z_2\right). \qquad (26)$$

Стационарный метеор при всяком z_R имеет $z_1 = z_2$, $\psi_1 = \psi_2$ и потому $\lambda = 0°$; практически можно принять $\lambda \leqslant 0°,1$ или $\lambda \leqslant 0°,3$; теоретически таких метеоров в среднем 1 на 13 000 или 1 на 1000. Из той же формулы видно, что λ растет с увеличением z_R; поэтому пути метеоров из низких радиантов всегда длинные (они даже могут выйти из атмосферы). В литературе описаны «сверхдлинные» пути с $\lambda > 90°$, например, 20 августа 1943 г. (Центральные Каракумы, 97°,7), или 26 августа 1949 г. (Чехословакия, 106°), до $\lambda = 130°$ (Деннинг). Обычно при этом велико и L, например у болидов до 1000 *км* и более. Средняя видимая длина пути λ зависит от условий наблюдения, качества прибора и опытности наблюдателя, яркости и скорости метеора, времени года и суток и т. д.

По 1254 метеорам, наблюдавшимся вне действия потоков в первом полугодии 1943 г. в Ашхабаде, среднее арифметическое $\bar{\lambda} = 7°,4$, мода 5°, длиннее 20° было 22 метеора (1,7%), с $\lambda \leqslant 1°,0$ их было лишь 1,6%. Между $\lambda = 4$—8° заключалось 61% путей (ср. рис. 46). До и после полуночи распределение было таким:

Длина λ . .	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	$\geqslant$10°	Сумма	Метеоров
До 0 ч . .	0	1	2	7	13	19	12	12	8	3	23	100%	442
После 0 ч .	0	2	2	7	8	17	14	13	8	3	26	100	812

Следовательно, до полуночи коротких метеоров больше, чем после. Более подробный анализ провела Е. Ф. Разумова (1951 г.). Обнаружилось наличие двух групп метеоров — более медленной и более быстрой. К первой принадлежат длинные (вечерние) метеоры 2—3 вел. и ярче, число которых к утру убывает. К утру возрастает количество быстрых неярких метеоров, причем с увеличением скорости при прочих равных условиях возрастает энергия и длина пробега, и поэтому λ к утру растет. В итоге оба явления складываются и дают минимальную $\bar{\lambda}$ между 1—3 *час* местного времени, одинаково в обоих полугодиях. Если брать только метеоры 2—4 вел., то для трех лет (1942—1945) имеем ($n = 2888$):

Ср. солнечное время	19—20	20—21	21—22	22—23	23—0	0—1
Среднее $\bar{\lambda}$	7°,7	7,3	7,3	7,4	7,0	7,3
Ср. солнечное время	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	Среднее
Среднее $\bar{\lambda}$	6,8	6,8	6,7	7,2	7,3	(5,2)	7°,02

Таким образом, суточная вариация длин $\bar{\lambda}$ сильно усложнена. Годовой ход $\bar{\lambda}$ несколько различен для метеоров ярче 2—3 вел. и для более слабых, как видно из данных Е. Ф. Разумовой по двум круглогодичным циклам наблюдений автора 1942—1945 гг. (число метеоров: 414, 646, 1139, 730 и 465):

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1 вел. . .	8°,2	11°,3	10°,1	10°,3	9°,7	9°,1	8°,9	9°,2	11°,8	10°,8	10°,2	12°,7	9°,87
2 » . .	7,9	8,0	8,3	7,8	9,5	8,3	7,6	7,3	7,8	7,8	8,3	7,2	7,98
3 » . .	6,5	7,1	6,5	7,5	7,5	7,4	7,4	7,5	7,5	6,8	7,5	7,3	7,14
4 » . .	5,6	6,2	5,6	6,0	6,5	5,5	6,1	6,7	6,5	5,8	5,0	5,8	5,97
5—6 вел.	3,8	4,4	4,9	5,1	5,3	4,8	5,0	5,9	6,0	4,8	5,1	—	5,06

Среднее $\bar{\lambda} = 7°,12$ по всем 3394 метеорам. Наиболее многочисленные метеоры 3 величины в летнем полугодии почти на 1° длиннее, чем в зимнем, однако годичный ход в целом спокойнее, чем суточный. Из этой же таблицы видна зависимость $\bar{\lambda}$ от яркости: в интервале 1—6 зв. вел. длина пути изменяется примерно на 1° при изменении яркости на 1 зв. величину:

Зв. величина метеора .	$\leqslant$1	2	3	4	$\geqslant$5
Ср. длина пути $\bar{\lambda}$ . . .	9°,9	8°,8	7°,1	6°,0	5°,1

Сравнивая данные суточной и годичной вариаций $\bar{\lambda}$, мы видим, что изменение термического режима в атмосфере играет меньшую роль, чем высота эклиптики, апекса или неоднородность метеорного материала и его распределения. На λ также сказываются лунные приливы.

Перспективное сокращение по второй теореме Клейбера *) уменьшает λ в $\frac{\pi}{4}$ раз, поэтому исправленная $\lambda = 7°,4 \cdot \frac{4}{\pi} = 9°,4$, что на высоте $H = 85$ *км* дает $L = 23$ *км*. При среднем $\bar{\tau} = 0,5$ *сек* это дает среднюю скорость $\bar{v} = 46$ *км/сек*.

Чтобы сделать сравнимыми λ разных метеоров, их надо «повернуть» перпендикулярно к лучу зрения делением на $\sin\psi$ и привести к кратчайшему расстоянию в зените, деля на $\cos z$, тогда $\lambda_z = \lambda \sec z \operatorname{cosec}\psi$. Для недлинных λ приближенно $\lambda_z = \frac{L}{H}\,\mathrm{arc}\,1°$. У телеметеоров λ короче и L — порядка километров. При $\lambda = 2$ и 4° и $z_R = 45°$, $z_2 = 47$ и 49°, траектории обоих метеоров начинаются соответственно на 10°,3 и 16°,6 от радианта. Видимый на небесной сфере угол наклона $i_{\text{вид}}$ траектории λ к горизонту не может быть меньше

*) Согласно первой и второй теоремам Клейбера, средняя величина проекции отрезков, беспорядочно ориентированных в пространстве, на какую-нибудь ось и на какую-нибудь плоскость, равна соответственно $\frac{1}{2}$ и $\frac{\pi}{4}$ средней длины отрезков (см. П. П. Паренаго, Курс звездной астрономии, 2-е изд., Гостехиздат, 1946, стр. 79—80).

истинного угла i и лишь в точках горизонта, удаленных на $\psi = 90°$ от радианта, $i_{вид} = i$, так как $\sin i = \sin i_{вид} \sin \psi$. Подобно этому истинный азимут траектории равен видимому только у траектории, проходящей через зенит.

Еще Сенека указывал на преобладание направлений видимого полета метеоров из одной области неба. Точный ответ на этот вопрос дает определение радиантов. Статистически достаточно наблюдать

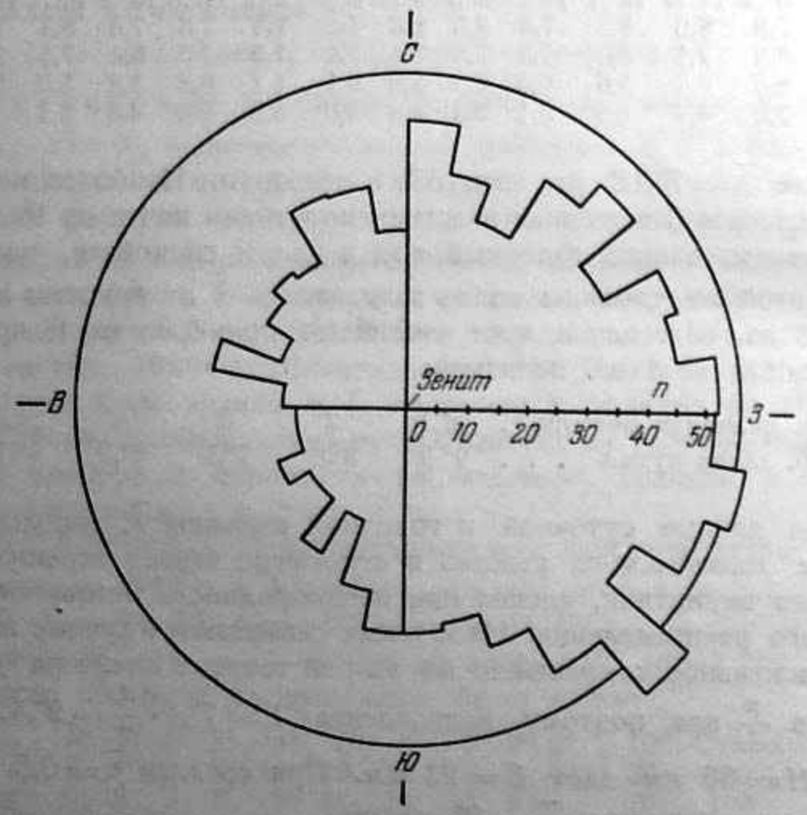


Рис. 113. Распределение азимутов направлений 1297 метеоров по наблюдениям в зените (Ашхабад, 1942—1945 гг.). Видно влияние апекса в восточной части неба. n — число метеоров.

зенит, где азимут движения не искажается влиянием угла наклона траектории к горизонту. В. В. Нардин обработал ашхабадские наблюдения 1942—1945 гг. зенитных метеоров, которых оказалось 1297, и получил следующее распределение по азимутам:

Азимут	0°—30°	30—60°	60—90°	90—120°	120—150°	150—180°
Число метеоров	114	153	161	145	133	123
Азимут	180—210°	210—240°	240—270°	270—300°	300—330°	330—360°
Число метеоров	107	86	67	59	63	86

Таким образом, наибольшее число метеоров идет с ВСВ (в основном за счет крупных потоков), а наименьшее с ЗСЗ (область

антиапекса) (рис. 113). Симметрию нарушают метеоры из области эклиптики, с юга, особенно из области апекса, после полуночи. Это распределение сохраняется, даже если наблюдать не в зените, а на 20 и 45° от него к востоку и западу, так как влияние углов наклона при этом несколько компенсируется, как показал В. В. Нардин (1953 г.):

Азимуты	0—89°	90—179°	180—269°	270—359°	Всего	
$z = 0°$ . . .	32%	31%	21%	16%	100%	$n = 1297$
20° к В . .	45	32	13	10	100	132
45 »	49	31	14	6	100	39
20° к З . .	36	33	16	16	100	113
45 »	39	20	9	32	100	44

Для телескопических метеоров влияние эклиптикальных радиантов оказывается более резким, а после восхода апекса его влияние становится очень значительным: возникают два максимума в распределении направлений — из антигелия на север и из апекса на антиапекс (см. гл. 33). Когда эклиптика находится близ зенита (весной), то распределение направлений зенитных телеметеоров, естественно, становится более беспорядочным, чем осенью. Наблюдения В. Е. Штепана (Чарджоу, 1952—1954 гг.) это хорошо подтверждают.

ГЛАВА 13

ВЫСОТЫ МЕТЕОРОВ

§ 133. Введение. После первых определений высот метеоров из базисных наблюдений, выполненных в 1798 г. Брандесом и Бенценбергом (§ 16), Брандес [395], а также Ольберс опубликовали способы определения высот. С 1817 г. Брандес возобновил высотные определения. В 1824 г. обнаружилось, что с уменьшением яркости метеоров убывает и их высота. Бельгийский физик Кетле в 1825 г. дал графический, а в 1837 г. аналитический способ вычисления высот; ряд работ на эту тему сделали Мольвейде, Эйе и другие.

Первую важную работу по высотам сделал Бессель в 1839 г. в Кенигсберге [394], установив «критерий *одновременности*», т. е. условие, что наблюдаемые одноименные точки траектории метеора должны лежать в плоскости базиса. Поразительно, что за рубежом критерий Бесселя игнорировался почти на протяжении целого столетия, хотя падения ярких болидов непрерывно побуждали исследователей заниматься их высотами. В России в Митаве в 1844 г. были изданы «Астрономические письма» Медлера с данными о вычислении высот. В 1851 г. Ф. Пти в Тулузе дал работу по аналитическому исследованию параллакса и траектории болидов; он переопределил высоты ряда болидов XVIII — XIX вв. Секки в Италии организовал наблюдения на базисе Рим — Чивита-Веккиа. С 1863 г. А. Гершель в Англии начал работы по определению высот, которые были продолжены затем Деннингом, Кингом, Прентисом и Портером. Гейс в Германии в 1866—1868 гг. дал методы нахождения высот и обработал много наблюдений [401], с 1868 г. Галле [400] дал примеры обработок многосторонних наблюдений; в 1872 г. методика определения высот метеоров впервые изложена в курсе теоретической астрономии Клинкерфюсом, Германия [см. 47]. В США в 1863 г. Г. Ньютон [14] дал сводку 342 высот, определенных к тому времени, в 1894 г. Шеберле (Ликская обсерватория) определял высоты Персеид. Ниссль из Брно в течение почти полувека (с 1870-х годов) определял высоты болидов и в 1907 г. дал сводку по методике этой работы; в 1925 г. его каталог 611 траекторий был издан в Вене Гофмейстером [365]. Последний построил в Зоннеберге (Тюрингия) обсерваторию, а в 1909 г. основал Центральное метеорное бюро для обработки наблюдений и дал много хороших траекторий [402]. Венский академик Э. Вейсс в 1905 г. рассмотрел математически наиболее полно эту проблему [413]. В 1912 г. метод нахождения высот по фотографиям дал Пекюле, а при очень коротком базисе — Гофмейстер (1934 г). В Чехословакии с 1924 г. Сикора, затем Гут, а с 1951 г. Линк, Плавец, Цеплеха и другие проводят визуальные и фотографические определения высот и ценные теоретические исследования [396, 399, 415].

Первые тригонометрические работы в России начаты К. Д. Покровским и С. Б. Шарбе [392] в Юрьеве (ныне Тарту) с 1899 г. Уже в 1900 г. С. Н. Блажко [379] исследовал траекторию метеорита Леоновки, а Г. А. Тихов [390] метеорита Томаковки; с 1907 г. И. И. Сикора в Ташкенте начал определение высот с применением фотографии; сводку 386 визуальных высот в 1926 г. дал П. А. Савицкий [409]. Теоретическими обобщениями там же занимался В. А. Мальцев (1931—1934). С. П. Глазенап в 1921 г. указал на возможность применения «обобщенного метода линий положения» В. В. Каврайского для нахождения высот. Коллектив наблюдателей Московского отделения ВАГО еще в 1932 и 1934 гг. получил удачные результаты по определению высот по фотографиям. С 1937 г. в Сталинабаде метеорным патрулем определено около 100 высот. Несколько сотен высот, преимущественно метеоров особых типов, было определено в Ашхабаде с 1947 г. визуальным, телескопическим, фотографическим и радиометодом. Удобный и точный метод обработки фотографических наблюдений разработали в 1935 г. В. В. Федынский и К. П. Станюкович: теперь он вытеснил в СССР все другие методы. Проблему определения высот метеоров ныне следует считать полностью решенной.

§ 134. Общие соображения. Определение высот H_1, H_2 метеоров необходимо для нахождения линейной длины пути L и скорости v_g; без последней невозможно решение основной задачи — определения орбиты. Изменение скорости позволяет вычислять плотность воздуха на высоте, соответствующей полету метеора; для геофизики знание высот также необходимо при изучении метеорной ионизации, скорости и направления воздушных течений, находимых по смещению метеорных следов (газовых и пылевых), при исследовании акустических явлений. Оно также необходимо для метеорной физики (начало, максимум и конец свечения метеора, дробление и распыление метеорного тела, ионизация воздуха и отражение радиоволн) и динамики метеорного тела (потеря космической скорости, падение метеорита).

§ 135. Методы определения высот ныне распадаются на *геометрические* и *физические*. В зависимости от цели, условий и материала наблюдений в одном случае наилучшим оказывается один

метод, в другом случае — другой. Например, различными будут способы обработки пары точных базисных фотографий метеора или сотни показаний случайных очевидцев болида. Геометрические методы могут быть *тригонометрическими* и *статистическими*; первые из них распадаются на *односторонние*, *двухсторонние* и *многосторонние*. Комбинация физического метода с геометрическим дает *смешанный* метод. Геометрические методы могут быть *точными* и *приближенными*. Приближенные методы не учитывают ошибки неодновременности и кривизну Земли.

§ 136. Основные определения. Пусть метеор находится в атмосфере на расстоянии R от центра планеты и пусть ρ есть радиус-вектор той точки поверхности планеты, в зените которой находится метеор. Тогда *линейной высотой* H метеора назовем $H = R - \rho$. Практически удобно различать *высоту появления* H_1 в точке A и *высоту исчезновения* H_2 в точке B. Тогда $AB = L$ есть *линейная длина пути* (рис. 36). *Расстояние* от наблюдателя S до метеора M есть $SM = r$; тогда $H = r \sin h = r \cos z$. При точных наблюдениях надо ввести поправку за кривизну Земли $\Delta_1 H$ и за высоту $\Delta_2 H$ наблюдателя. Таким образом, задача определения высот H сводится к нахождению *геоцентрического* R или *топоцентрического* r расстояний, что и составляет задачу тригонометрических методов.

§ 137. Тригонометрические методы. Параллакс метеора. Пусть в точках S_1 и S_2 определены координаты (α, δ) метеора и звездный момент s его полета (рис. 114). *Длина базиса* есть $S_1S_2 = b$. Пусть на S_1 второй конец базиса проектируется на небесную сферу в этот момент в точку S_2, экваториальные координаты $S_2(A, D)$ которой вычислены по горизонтальным координатам: $a_{s_2} = a_1$ (азимут базиса), $z_{s_2} = 90° + \frac{\psi}{2}$, где $\psi = \frac{b}{\rho} \cdot \frac{1}{\text{arc } 1°}$. Далее, пусть одна и та же точка M траектории усмотрена из S_1 в направлении $M_1(\alpha_1, \delta_1)$ и из S_2 в направлении $M_2(\alpha_2, \delta_2)$. Обозначим теми же буквами S_1 и S_2 углы между этими направлениями и линией базиса; на сфере получим:

$$\left.\begin{aligned} \cos S_1 &= \sin\delta_1 \sin D + \cos\delta_1 \cos D \cos(\alpha_1 - A); \\ -\cos S_2 &= \sin\delta_2 \sin D + \cos\delta_2 \cos D \cos(\alpha_2 - A); \\ \cos\pi &= \sin\delta_1 \sin\delta_2 + \cos\delta_1 \cos\delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1), \end{aligned}\right\} \quad (27)$$

где $\pi = 180° - (S_1 - S_2)$ есть *параллакс метеора*. Проведем плоскость через S_1, S_2 и M. В треугольнике S_1S_2M сторона $S_1M = r_1$, $S_2M = r_2$. Тогда $r_1 = b \sin S_2 \operatorname{cosec}\pi$, $r_2 = b \sin S_1 \operatorname{cosec}\pi$, следовательно, расстояния найдены по параллаксу. Далее находим высоту точки M: $H = r_1 \cos z_1 + \Delta_1 H + \Delta_2 H$, причем z определяется из наблюдений или вычисляется по известной формуле $\cos z = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos(s - \alpha)$, поправка $\Delta_1 H = \frac{r \sin z}{2\rho}$, а $\Delta_2 H$

снимается с гипсометрической карты. То же получаем для второй станции. Степень сходимости обоих значений H укажет на качество работы; хорошие визуальные наблюдения обеспечивают сходимость до 1—2 *км*, фотография — до 0,2 *км*, если точка M хорошо выражена (например, взрыв). Видимое смещение на небесной сфере точки M при наблюдении с концов базиса происходит вдоль *параллактического круга*, образованного пересечением сферы упомянутой

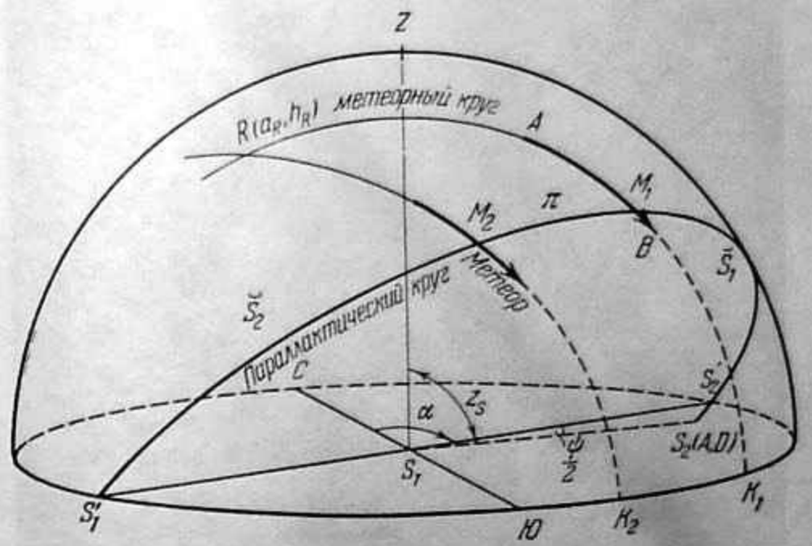


Рис. 114. К определению высоты метеора.

Положение видимых путей метеора, наблюдавшегося из пунктов S_1 и S_2, на небесной сфере пункта S_1. M_1 и M_2 — соответственные точки, S_2' — точка горизонта в азимуте пункта S_2.

плоскостью, проходящей через S_1S_2 и M (рис. 114). Если метеор «гладкий» и летит под малым углом q к этому кругу, то значения π ненадежны и вес его пропорционален $\sin q \cos z$. До начала вычислений надо применить *критерий Бесселя*, чтобы убедиться, что точки идентичны:

$$\operatorname{tg} D \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + \operatorname{tg}\delta_1 \sin(\alpha_2 - A) + \operatorname{tg}\delta_2 \sin(A - \alpha_1) = 0. \quad (28)$$

Левая часть при хороших визуальных наблюдениях может составлять меньше 0,03, а для фотографии не свыше 0,002. Если заметных точек на траектории нет, то, используя параллактический круг, всегда можно найти для любой точки M_1 соответственную ей точку M_2. Угловое расстояние между ними, очевидно, есть *параллактическое смещение* π (ср. рис. 114 и 115). При этом в S_1 может быть замечена одна часть траектории, в S_2 другая: *метеорные плоскости*, каждая из которых проходит через пункт наблюдения и *видимую траекторию* метеора (или ее часть), определят *метеорные круги*; *принцип Ольберса*, определяющий траектории, как линии пересечения метеорных плоскостей, — соблюдается.

Рассмотрим еще некоторые способы, как приближенные, так и точные.

I метод Брандеса. Примем плоскость горизонта P общей для S_1 и S_2. Проведем азимуты a_1 и a_2 точки M; их пересечение

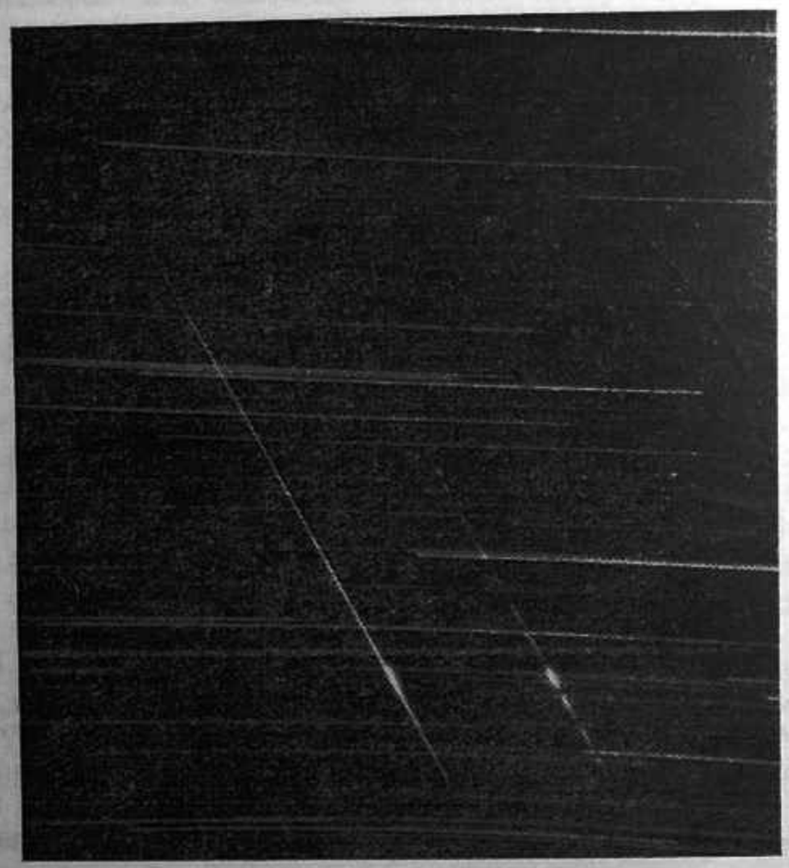


Рис. 115. Параллактическое смещение метеора при наблюдении из двух пунктов. Совмещены фотографии метеора 13 августа 1953 г., полученные в Ашхабаде (с обтюратором) и Ванновском (базис 25 *км*).

даст проекцию M' точки M на P. Измерим $S_1M' = d_1$ и $S_2M' = d_2$, это — проекции топоцентрических расстояний r_1 и r_2, т. е. «*горизонтальные дальности*». Отсюда $H = d_1 \operatorname{tg} h_1 = d_2 \operatorname{tg} h_2$, что можно найти графически на том же чертеже. Способ пригоден для предварительных расчетов и обработки малоточных наблюдений, включая многосторонние (рис. 116).

II метод Брандеса также приближенный, но учитывает кривизну Земли. Умножая на $\frac{360^\circ}{2\pi R} \cong 1/111$ $S_1S_2 = b$, d_1 и d_2, выразим их в градусной мере. Тогда $H = 2\rho \sin \frac{d_1}{2} \sin\left(h_1 + \frac{d_1}{2}\right) \times \sec\left(h_1 + \frac{d_2}{2}\right)$. В 1870 г. Рейман показал, что проще

выражение

$$H = \rho\left(\frac{\cos h_1}{\cos (h_1 + d_1)} - 1\right) = \rho\left(\frac{\cos h_2}{\cos (h_2 + d_2)} - 1\right). \qquad (29)$$

III метод Брандеса является точным. Так как топоцентрические направления S_1M и S_2M практически не пересекаются, берем середину отрезка на кратчайшем расстоянии между ними. Введем систему координат с началом в центре Земли, ось Ox направим в точку весеннего равноденствия γ, ось Oy в плоскости экватора

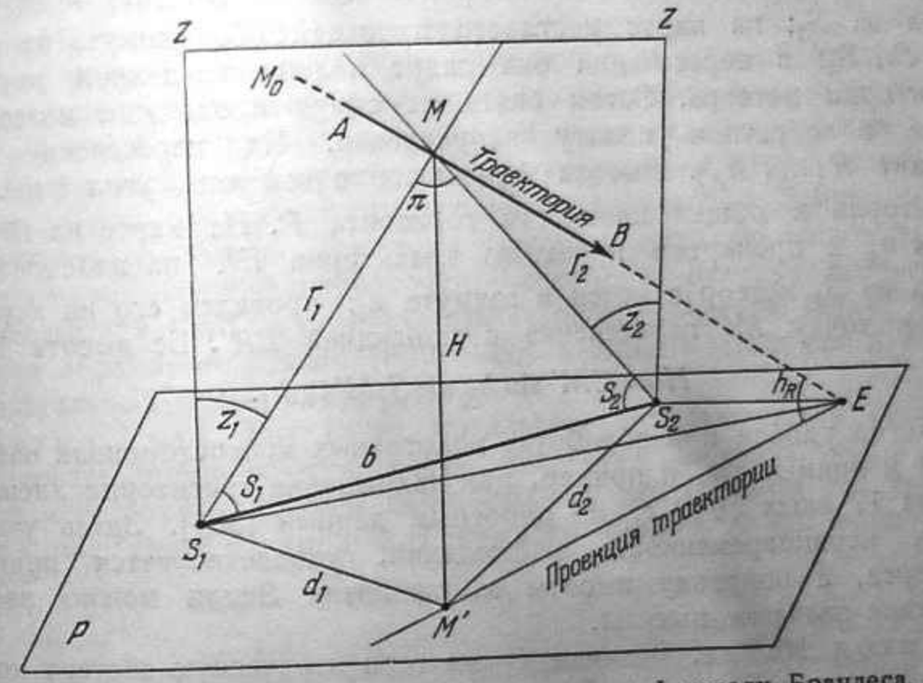


Рис. 116. Определение высоты метеора по I методу Брандеса. E — земная точка.

на 90° восточнее, а ось Oz к северному полюсу мира. Тогда $H = +\sqrt{x^2 + y^2 + r^2} - \rho$, где x, y, z находятся отдельно. В этих методах, где учет кривизны достигается введением ρ и требует лишних знаков при вычислении, можно брать средний радиус Земли $\rho = \frac{2a + b}{3} = 6371{,}2$ *км*. При более точных расчетах $\lg \frac{\rho}{a} = 9{,}999\,275 + 0{,}000727 \cos 2\varphi - 0{,}000\,002 \cos 4\varphi$, где радиус экватора $a = 6378{,}24$ *км*.

Метод Ольберса. Пусть географические координаты φ, λ точек S_1, S_2 и M' и звездное время в них $s_{1,2}$ и s_M известны. Тогда, по Ольберсу,

$$H = \frac{\rho \cos \varphi_1 \sin (a_1 - s_1)}{\cos \varphi_M \sin (a_1 - s_M)} - \rho = \frac{\rho \cos \varphi_2 \sin (a_2 - s_2)}{\cos \varphi_M \sin (a_2 - s_M)} - \rho. \qquad (30)$$

Метод Литтрова. Пусть μ есть разность азимутов из S_1 на M' и на S_2 и аналогично ν — то же для S_2. Тогда

$$\cos S_1 = \cos\mu \cos h_1, \quad \cos S_2 = \cos\nu \cos h_2$$

и высота

$$H = r_1 \sin h_1 + \frac{r_1^2 \cos^2 h_1}{2\rho} = r_2 \sin h_2 + \frac{r_2^2 \cos^2 h_2}{2\rho}. \qquad (31)$$

I метод Гейса. На небесной сфере продолжим метеорный круг, найденный в S_1, до пересечения с горизонтом, и определим азимут a_E точки пересечения E'. Сделаем то же для метеорного круга из S_2; на карте местности проведем оба азимута из пунктов S_1, S_2; в пересечении они дадут положение земной точки E траектории метеора. Затем опять на сфере продолжим метеорные круги в обратном полету направлении. Их пересечение даст радиант $R(a_R, h_R)$. Высота h_R вместе с тем есть угол i наклона траектории к общей плоскости горизонта P. На карте из E проведем a_R и прочертим проекцию траектории ER' на плоскость P. Пусть из S_i метеор замечен в азимуте a_i; проведем его на карте и найдем точку M' пересечения с проекцией ER'. Ее высота будет

$$H = EM' \sin h_R = S_i M' \operatorname{tg} h_i.$$

Метод удобен при обработке малоточных многосторонних наблюдений и применялся, например, при нахождении траектории дневного болида 12 июля 1949 г. по опросным данным [383]. Здесь учитывается неодновременность наблюдений, удовлетворяется принцип Ольберса, а поправку высоты за кривизну Земли можно ввести в каждое значение высоты.

Метод Кетле. Возьмем ту же геоцентрическую систему координат, как и в III методе Брандеса. Координаты пункта наблюдения в ней будут

$$x = \rho \cos\varphi \cos\vartheta; \quad y = \rho \cos\varphi \sin\vartheta; \quad z = \rho \sin\varphi. \qquad (32)$$

При необходимости учета сжатия Земли здесь надо брать геоцентрическую широту $\varphi' = \varphi - 690'',6 \sin 2\varphi + 1'',2 \sin 4\varphi = \varphi - \Delta\varphi$. Возьмем топоцентрическую систему координат $S(\xi, \eta, \zeta)$ с осями, параллельными предыдущей системе; в ней координаты метеора

$$\xi = r \cos\alpha \cos\delta, \quad \eta = r \sin\alpha \cos\delta, \quad \zeta = r \sin\delta,$$

тогда

$$H = R - \rho = +\sqrt{(x+\xi)^2 + (y+\eta)^2 + (z+\zeta)^2} - \rho. \qquad (33)$$

Если нужно найти аналитически географические координаты точки $M'(\varphi_M, \lambda_M)$, то воспользуемся соотношением

$$x + \xi = R \cos\varphi'_M \cos s_M, \quad y + \eta = R \cos\varphi'_M \sin s_M, \quad z + \zeta = R \sin\varphi'_M, \qquad (34)$$

и тогда $\varphi_M = \varphi'_M + \Delta\varphi$, $\lambda_M = \lambda + (s_M - s)$, где λ и s относятся к пункту S.

Метод Г. Ньютона. Установим звездный глобус соответственно широте места наблюдения φ и моменту s, прочертим видимые траектории из S_1 и S_2 и отметим на горизонте прямой и обратный азимуты базиса a_0 и $a_0 + 180°$ в точках S_2 и S_1; через эти точки проходят все параллактические круги. Выберем из них один, наилучшим образом проходящий через оба начала видимых траекторий. Тогда неодновременность наблюдений обнаружится сразу и ее можно устранить. На этом параллактическом круге $S_2 M_1 M_2 S_1$ дуга $M_1 M_2 = \pi$ (рис. 114) есть параллакс метеора, дуга $S_2 M_1$ соответствует углу $S_2 S_1 M$, дуга $S_1 M_2$ — углу $S_1 S_2 M$ в пространственном треугольнике $S_1 S_2 M$, сторонами которого являются b, r_1 и r_2. Измерив $S_2 M_1$ и $S_1 M_2$ на глобусе, получим все данные для вычисления r_1, r_2 и H. Метод нагляден и прост; для учета кривизны Земли установку глобуса следует делать для каждого пункта независимо, причем число пунктов не ограничено. Таким же способом находим высоту точки погасания или произвольной точки траектории. Кретьен предлагает при отсутствии глобуса использовать стереографическую сетку. Этим методом обработано свыше 1000 высот в Англии (Деннинг) и более 300 визуальных высот в Туркмении.

Метод Гута. Гут [399] предлагает в предыдущем способе использовать гномоническую карту (рис. 117); он вычисляет в градусной мере горизонтальную дальность d и длину базиса b с учетом высоты над уровнем моря $\Delta_2 H$ каждого пункта S по формулам:

$$\sin d = -\cos\varphi_2 \sin(\lambda_1 - \lambda_2) \operatorname{cosec} a_0;$$

$$b = 2\left(\rho + \frac{\Delta_2 H_{s_1} + \Delta_2 H_{s_2}}{2}\right) \sin\frac{d}{2} + \frac{(\Delta_2 H_{s_1} + \Delta_2 H_{s_2})^2}{4\rho \sin\frac{1}{2} d}. \qquad (35)$$

Вычисление проекции S_2 на сферу из S_1 делается так:

$$A = s_1 - t, \quad \sin t = \sin a_0 \cos\frac{d}{2} \sec D;$$

$$\sin D = \sin\varphi_1 \sin\frac{d}{2} - \cos\varphi_1 \cos\frac{d}{2} \cos a_0. \qquad (36)$$

Тогда топоцентрическое расстояние и высота будут равны:

$$r = b \operatorname{cosec}\pi \sin(S_1 + \pi), \quad H = r \cos z + \frac{r^2}{2\rho} - \frac{H^2}{2r}.$$

Элонгация ψ метеора от радианта R измеряется на карте; тогда длина пути $L = r \sin\lambda \operatorname{cosec}\psi$. Дуга $\chi_M = \widetilde{SM'}$ есть разница в положении зенитов точек S и M', $\sin\chi_M = \frac{r}{\rho + H} \sin z$, тогда разности $\Delta\varphi$

и $\Delta\lambda$ географических координат для небольших χ_M будут

$$\Delta\varphi = \chi_M \cos(180^\circ - a_0), \quad \Delta\lambda = \chi_M \sin\lambda \sec\varphi; \qquad (\varphi_M = \varphi + \Delta\varphi, \quad \lambda_M = \lambda + \Delta\lambda). \tag{37}$$

Найдя высоту одной точки M траектории, находим высоту любой другой точки N последовательным приближением:

$$H_N = H_M + L\sin h_R + \frac{L^2}{2(\rho + H_M)} - \frac{(H_N - H_M)^2}{2(\rho + H_M)}. \tag{38}$$

На том же чертеже наносятся положение радианта, исправленного за Δz, ΔA, и положение апекса, откуда затем графически определяется элонгация ε.

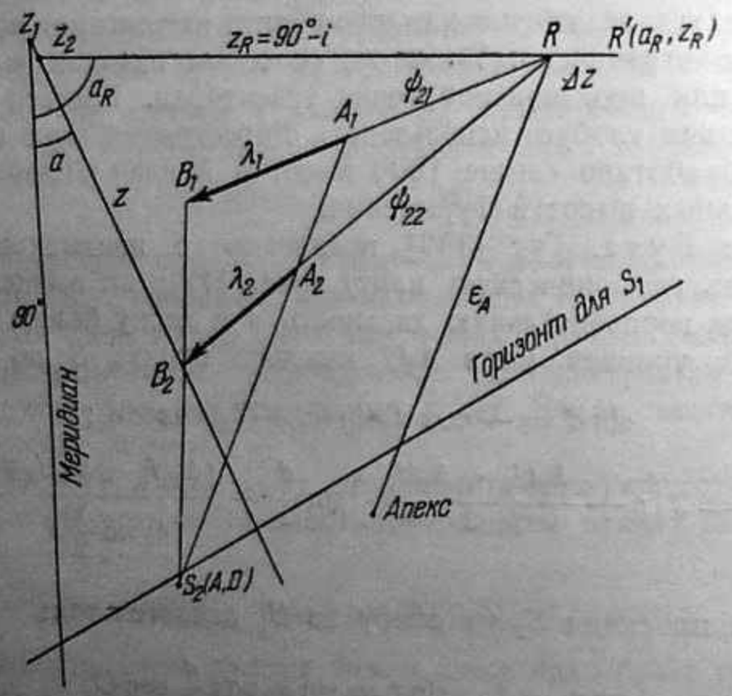


Рис. 117. Нахождение азимута и наклона траектории метеора в атмосфере по его базисным наблюдениям с помощью гномонической сетки (метод Гута).
Z_1 и Z_2 — зениты пунктов S_1 и S_2, $B_1B_2S_2$ — параллактический круг.

Метод Федынского — Станюковича. Проведем вертикальную плоскость через базис S_1S_2 и отметим высоту H_0 точки, где эту плоскость пересекает траектория или ее продолжение. Выберем две произвольные точки (a_1, z_1) и (a_2, z_2) на траектории, видимой из S_1. Тогда можно написать

$$\operatorname{ctg} z_0 \sin(a_1 - a_2) + \operatorname{ctg} z_1 (a_2 - a_0) + \operatorname{ctg} z_2 \sin(a_0 - a_1) = 0$$

и то же для S_2. Из этих уравнений находим $\operatorname{tg} z_{01}$ и $\operatorname{tg} z_{02}$. Тогда

$$H_0 = \frac{b}{\operatorname{tg} z_{02} - \operatorname{tg} z_{01}} \qquad (H_0 \neq 0).$$

Так как координаты радианта a_R, z_R известны, то для произвольной точки (a, z) траектории высота

$$H = H_0 \frac{\operatorname{tg} z_R \cos a_R - \operatorname{tg} z_0 \cos a_0}{\operatorname{tg} z_R \cos a_R - \operatorname{tg} z \cos a} + \Delta_1 H + \Delta_2 H. \tag{39}$$

В СССР этот метод применяется при обработке всех фотографических наблюдений. Поправка $\Delta_1 H$ за кривизну Земли по аргументу d такова:

d . . .	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000 км
$\Delta_1 H$ . .	0,0	0,8	3,1	7,0	12,3	19,5	27	37	49	62	77 км

Влияние дифференциальной рефракции даже при $H = 10$ км и $z = 89^\circ$ менее $1'$. При больших d поправка

$$\Delta_1 H = \frac{1}{2}\frac{d^2}{\rho + H} - \frac{1}{8}\frac{d^4}{(r + H)^3}.$$

Ошибка высоты Δh влечет в H ошибку $\Delta H = \frac{2H}{\sin 2h} \cdot \Delta h$; ΔH будет наименьшей при $h = 45^\circ$, например при $\Delta h = 1^\circ$ для $H = 100$ км $\Delta H = 3{,}5$ км, а для камеры $f = 50$ мм при точности измерения 30μ $\Delta h = 2'{,}3$ и $\Delta H \sim 0{,}1$ км.

Мы не рассматриваем здесь другие методы, либо слишком сложные (Бесселя, 1839 г., Ольберса, 1798 г., Тиссерана, 1896 г., автора, 1938 г.), либо повторяющие вышеизложенные (Шеберле, 1894 г.), либо неудобные на практике (М. Олмстед, 1931 г.), или не удовлетворяющие критерию Бесселя (Уитни, 1936 г.).

§ 138. Многосторонние методы. Галле (1869 г.), Вейсс (1904 г.), Ниссль (1907 г.), Гофмейстер (1921 г.) и другие предлагали ряд методов определения H по наблюдениям из нескольких точек с применением способа наименьших квадратов. Здесь мы рассмотрим два, которые находим наиболее удобными.

Метод С. Н. Блажко (1900 г.). На гномонической карте отметим координаты зенита пунктов наблюдений $S_1(\varphi_1', s_1)$, $S_2(\varphi_2', s_2)$, ..., $S_n(\varphi_n', s_n)$ и положение точки M, идентичной у всех наблюдателей: $M_1(\alpha_1, \delta_1)$, $M_2(\alpha_2, \delta_2)$ ... $M_n(\alpha_n, \delta_n)$. Если провести круги высот из каждой S_i через соответствующую M_i, то они должны пересечься в одной точке M', так как истинное положение точки M в пространстве единственное. Тогда координаты $M'(\varphi_M', s_M)$ определят ее положение в проекции на поверхность Земли, откуда находятся ее географические координаты φ_M, λ_M, как показано выше.

Проделаем то же для другой точки N, найдем N'; тогда $M'N'$ определит проекцию траектории MN на земную поверхность. Обратным продолжением видимых путей обычным способом определим радиант $R(\alpha_R, \delta_R)$. Для нахождения H С. Н. Блажко предлагает выражение для каждого пункта

$$H = R - \rho; \quad R = \rho \frac{\sin(\varphi' - \delta) + 2 \sin\delta \cos\varphi' \sin^2 \frac{1}{2}(s - \alpha)}{\sin(\varphi'_M - \delta) + 2 \sin\delta \cos\varphi'_M \sin^2 \frac{1}{2}(s_M - \alpha)}. \quad (40)$$

Если добавить проекцию второго конца базиса последовательно для каждой пары пунктов, то, проводя параллактические круги, всегда найдем одноименную точку M. Тогда метод Гута явится частным случаем данного для двух пунктов.

Геодезический метод. В 1937 г. в Москве автором был разработан следующий метод [374]. Нанесем на звездный глобус или гномоническую карту (рис. 114, 117) видимые траектории; так как наблюдения не идеальны, то вместо точечного радианта получим площадку и, применяя принцип Лежандра, найдем наивероятнейшие координаты радианта. Продолжив на глобусе видимые траектории вперед, отыщем азимуты земной точки и по ним на карте местности найдем ее положение E. На той же карте проведем азимуты $a_{10}, a_{20}, \ldots, a_{n0}$ точки погасания, как наиболее уверенно отмеченной и обычно даваемой всеми наблюдателями. Погребуем, чтобы сумма квадратов ошибок Δa горизонтальных направлений на точку погасания была наименьшей; в зависимости от расстояния наблюдателя и его аккуратности припишем им веса $p_1, p_2, \ldots, p_n$. Тогда $\sum p_i (\Delta a_i)^2 = \min$; направления с азимутами a_{i0} на географической карте (рис. 118) также не пересекутся в одной точке, а дадут площадку. Выберем ее центр тяжести B_0. Возьмем прямоугольную систему прямолинейных координат Oxy в плоскости карты, направим ось Ox к востоку, Oy на север; координаты точек обозначим $B_0(x_0, y_0)$, $S_i(x_i, y_i)$. Будем искать наивероятнейшие поправки ξ и η, после придания которых к x и y получим наивероятнейшие координаты точки B'_0, в зените которой метеор угас. Истинные азимуты этой точки обозначим a_i, тогда ошибки $\Delta a_i = a_{i0} - a_i$, $x = x_0 + \xi$, $y = y_0 + \eta$. Далее, $\operatorname{tg} a_i = \frac{x - x_i}{y - y_i}$, $\operatorname{tg} a_{i0} = \frac{x_0 - x_i}{y_0 - y_i}$. Выразим a_i через арктангенс и разложим последний в ряд по степеням ξ и η; введя горизонтальные дальности d_i, получим

$$a_i = a_{i0} + \xi \frac{\cos a_i}{d_i} + \eta \frac{\sin a_i}{d_i}. \quad (41)$$

Обозначив $m_i = \frac{\cos a_i}{d_i}$, $n_i = \frac{\sin a_i}{d_i}$, $l_i = \Delta a_i = a_{i0} - a_i$ и используя веса p_i, получим условные уравнения

$$m_i \sqrt{p_i}\,\xi + n_i \sqrt{p_i}\,\eta = \sqrt{p_i}\, l_i,$$

решая которые обычным способом наименьших квадратов, найдем ξ, η и $B'_0(x, y)$, после чего измеряем вновь d_i и вычисляем $H_i = d_i \operatorname{tg} h_i$. Полученные значения H_i в случае необходимости исправляем поправками $\Delta_1 H$ и $\Delta_2 H$ и находим среднее взвешенное значение H и его квадратичную ошибку. Применение этого метода к случаю полета метеорита Хмелевка 1 марта 1929 г. позволило в 1936 г.

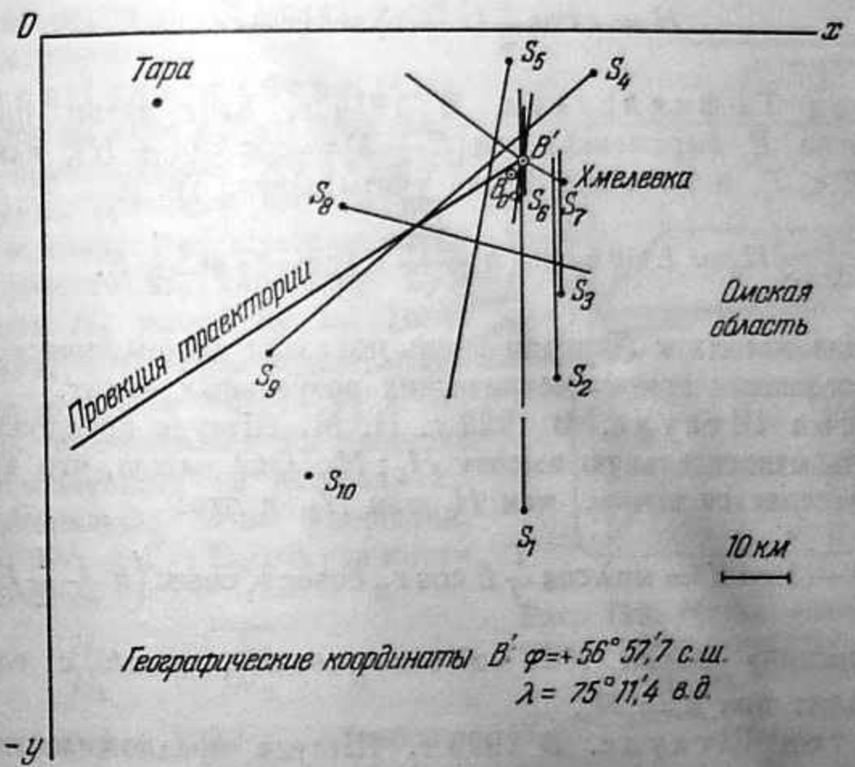


Рис. 118. Определение наивероятнейшего положения проекции B' точки погасания болида из многосторонних наблюдений. Падение метеорита Хмелевка (1 марта 1929 г.), найденного в 1936 г. в нескольких километрах от точки B'.

найти метеорит всего в 7 *км* от вычисленной точки B'_0. Его высота погасания оказалась $H_2 = 10{,}0 \pm 0{,}7$ *км* ($n = 10$).

§ 139. Односторонние методы. Поскольку $H_{1,2} = r_{1,2} \cos z_{1,2}$ (здесь индексы 1 и 2 соответствуют высоте появления и исчезновения метеора) и $r_{1,2} = L \operatorname{cosec} \lambda \sin \psi_{2,1}$, то, зная из наблюдений λ, $\psi_{1,2}$, $z_{1,2}$, имеем основное уравнение односторонних методов:

$$H_{1,2} = L \operatorname{cosec} \lambda \sin \psi_{2,1} \cos z_{1,2}. \quad (42)$$

Здесь неизвестны $H_{1,2}$ и L, следовательно, нужно еще одно уравнение для L.

Метод Г. Ньютона. Для известного потока имеем $L = v_g \tau$, что дает высоты согласно основным уравнениям (42) односторонних методов. Они получаются ниже базисных высот, найденных из наблю-

дений малоопытных лиц, из-за переоценки h_1 и h_2. В СССР впервые метод испытан на Орионидах 21—23 октября 1933 г. [376].

Метод Иессе. В 1887 г. Иессе использовал тот же принцип, предлагая определять высоту выбранной точки с заданным z. Он вводит вспомогательный угол σ соотношением $\operatorname{tg}\sigma = \rho \sin z/(r + \rho\cos z)$, причем $r = L\sin\psi_2 \operatorname{cosec}\lambda$. Тогда

$$H = r\cos\frac{1}{2}(z+\sigma)\sec(z-\sigma). \qquad (43)$$

Метод Гофмейстера. В 1914 г. этот автор предложил ввести угол E выражением $\cos(E+h) = \cos h/(\rho + H)$; как оказывается, $E < 2°$, и кривизна Земли учитывается. Тогда

$$H_2 = L\sin\psi_2 \sin\left(h + \frac{1}{2}E\right)\operatorname{cosec}\lambda \sec\frac{1}{2}E. \qquad (44)$$

Применение метода к Лиридам вновь показало систематическую переоценку тогдашних тригонометрических визуальных высот.

I метод Штауде. В 1922 г. Н. М. Штауде предложила рассматривать относительную высоту $H_1 : H_2$. Она нашла, что эта величина определяется точнее, чем H_1 или H_2, и что:

$$\frac{H_1}{H_2} - 1 = K = \sin\lambda\cos\frac{1}{2}E\cos r_R \operatorname{cosec}\psi_1 \operatorname{cosec}\left(h + \frac{1}{2}E\right). \qquad (45)$$

Для «плоской» Земли $K = \sin\lambda\cos r_R \operatorname{cosec}\psi_1 \operatorname{cosec} h$ с точностью до 5% даже при $h = 20°$.

II метод Штауде. В 1923 г. Штауде предложила использовать выражение $M = \dfrac{L}{H_2} = \sin\lambda\sec z_2 \operatorname{cosec}\psi_1$; поправка на шарообразность Земли вводится умножением M на $1 : \left(1 + \dfrac{H_2}{2\rho}\operatorname{tg}^2 z_2\right)$. Штауде считает, что каждый поток имеет свое M. Вообще K и M зависят от яркости метеоров [388] и подвержены сильному влиянию условий видимости.

Метод угловой скорости. Пусть известна линейная и угловая скорости метеора. Тогда $r_1 = v_g\tau \operatorname{cosec}\lambda \sin\psi_2$; заменяя

$$\operatorname{cosec}\lambda = \frac{1}{\lambda \operatorname{arc} 1°} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{\lambda}{\omega},$$

получим

$$r_1 = \frac{v_g \sin\psi_2}{\omega \operatorname{arc} 1°} \quad \text{и} \quad H_1 = r_1\cos z_1 = 57{,}3\frac{v_g}{\omega}\sin\psi_2\cos z_1. \qquad (46)$$

Например, на фотографии метеора с обтюратором, полученной в Ашхабаде в августе 1953 г., $\omega = 24°{,}0$ *сек*$^{-1}$, $r_1 = 90°$, $z_2 = 24°$; так как это персеид, то, зная положение радианта, имеем $\psi_1 = 45°$, $\psi_2 = 69°$, $v_g = 60$ *км/сек*. Отсюда по (46) найдем $H_1 = 102$ *км* и $H_2 = 97$ *км*.

§ 140. Статистические методы являются независимыми, но зато требуют большого однородного материала и особенного развития не получили.

Метод Герасимовича [389]. В 1915 г. Б. П. Герасимович в Харьковской обсерватории заметил, что из соотношения числа метеоров одного потока, летящих к зениту и от зенита, можно статистически найти высоту H. На практике метод не был испытан из-за потери метеоров на больших зенитных расстояниях.

Метод Тейхгребера [411]. Ограничим на небе небольшую площадку произвольным контуром (рис. 119). Телесный угол с вершиной в глазу наблюдателя вырежет на высоте H_1 площадку Σ_1 и на высоте H_2 площадку Σ_2. Тогда $\Sigma_1 : \Sigma_2 = H_1^2 : H_2^2$. При большом количестве метеоров числа N_1 и N_2 метеоров, появившихся на площади Σ_1 и исчезнувших на площади Σ_2, пропорциональны этим площадям, т. е. $N_1 : N_2 = \Sigma_1 : \Sigma_2$, откуда имеем статистически

$$\frac{H_1}{H_2} = \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}. \qquad (47)$$

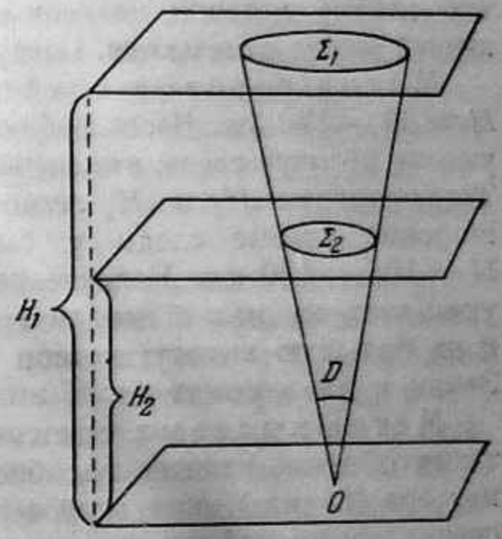


Рис. 119. Метод одностороннего определения относительных высот $H_1 : H_2$ метеоров.

O — наблюдатель, D — угловой диаметр поля зрения.

Тейхгребер в 1937 г., обработав пражские наблюдения Гута 1934 г., называемые нами контурными, получил $H_1 : H_2 = 1{,}13$. В 1940 г. контурные наблюдения провел автор в Ереване и нашел для Персеид $H_1 : H_2 = 1{,}17$ [375]. В 1950 г. в Ашхабаде контурные наблюдения дали для того же потока следующее:

Наблюдатель	Метеоры: Яркие	Средние	Слабые	Общее H_1/H_2
Я. Ф. Садыков .	—	1,42	1,17	1,32
Д. И. Синютин .	1,75	1,54	1,14	1,37

Отсюда видно, что в связи с укорочением L отношение $H_1 : H_2$ для слабых метеоров убывает. При телескопических наблюдениях контуром служит край поля зрения; отношение это действительно убывает с падением яркости.

§ 141. Физические методы. Радиолокация. Как известно, радиолокатор дает наклонную дальность r метеора, так что для определения высоты $H = r\sin h$ надо знать угловую высоту h (называемую

в радиолокации «углом места»), что некоторые системы радиолокаторов и находят. В других случаях требуется визуальное определение h (смешанный метод) или применение трех станций для однозначности определения. Но так как в общем высоты известны лучше, чем скорости, которые непосредственно можно найти радиолокационными средствами, то специально высоты этим путем определяются мало. Уже первые наблюдения давали в среднем $H = 87 - 92$ *км*, хотя в отдельных случаях H доходило до 140 *км*. На очень низких высотах слабые метеоры медленны, ионизация не интенсивна и радиолокацией они не отмечаются. Следующие методы являются качественными.

Метод газовых следов. Эти следы образуются в пределах $H \approx 80 - 120$ *км*. Часто наблюдается, что метеор продолжает лететь, уже не образуя следа; это значит, что он опустился ниже $H_{2s} \cong 80$ *км*. Тогда высоты H_1 и H_2 легко найти, зная его радиант. Некоторые широкие слабые следы у быстрых длинных метеоров видны на $H = 105 - 120$ *км*. Наличие подобного следа по всему пути ($\lambda = \lambda_s$) указывает на малый наклон траектории к горизонтальной плоскости и на большую высоту: метеор летит как бы по секущей в атмосфере Земли и даже может вновь вылететь из атмосферы.

Метод пылевых следов. Эти следы образуются не выше 75 *км*; таким образом, наличие подобного следа указывает на проникновение метеора (болида) ниже этой высоты. Обычные метеоры, как доказано специальными наблюдениями в конусе зари (А. К. Терентьева, Ашхабад, 1954 г.) этих следов не имеют, так как исчезают выше, испаряясь, а не распыляясь.

Акустический метод. Звуковые волны слышны, начиная с высот $H \leqslant 55$ *км*. Таким образом, любой звуковой болид имеет H_2 ниже этого предела.

Метод спектров. При переходе через уровень $H = 82$ *км* спектры метеоров изменяются и линии свечения элементов метеорного тела заменяются свечением только одного железа. Отсюда приближенно можно судить о высоте H.

Метод Станюковича. К. П. Станюкович [388] подтвердил найденное эмпирически еще Эпиком в Ташкенте в 1920 г. однозначное соотношение между увеличением яркости метеора и его длины пути L. Определяя из наблюдений m_z и используя эту зависимость (§ 151), Станюкович с помощью уравнения (11) находит H.

Переходим к рассмотрению результатов высотных определений.

§ 142. Влияние ошибок наблюдений на определение высот метеоров. Простой на первый взгляд вопрос, «какова высота метеоров», в действительности не имеет точного ответа, так как H зависит от массы, скорости, наклона траектории и даже от физических свойств метеорной частицы; кроме того, условия наблюдений, систематические ошибки и методика обработки оказывают влияние на результат. Из-за того, что появление метеора происходит постепенно,

более близкий наблюдатель заметит его на бо́льшей высоте; для сравнимости результатов следовало бы, например, за высоты H_1 и H_2 принимать те, где сила света или абсолютная яркость метеора достигают определенных значений (например, $I_0 = 100$ *м. св* или $m_0 = +6{,}0$ зв. вел., где m_0 — звездная величина с расстояния $r = 100$ *км*). В одном случае [390] поправка высоты за разность расстояний составила $\Delta H = +14$ *км*. Обычно ее не вводят. Далее, велико влияние селекции, вызванное, например, длиной базиса: при слишком большом базисе низкие метеоры отсеиваются и высоты H получаются завышенными, так как относятся только к высоким метеорам; так, Гофмейстер на базисах 292, 155, 125 и 63 *км* соответственно получил среднее $H_2 = 149$, 106, 85 и 77 *км*; в пределе при $b = 0$ получается $H_2 = 55$ *км*. То же явление дает наблюдение телескопических метеоров. Таким образом, приходится вводить понятие о той или иной «системе высот».

При обработке высот болидов, отмеченных неспециалистами, угловые высоты h из-за сплюснутости небосвода всегда бывают завышены, например, по Н. Н. Калитину [382] истинная высота $h = 20°$ днем оценивается в 42°, на звездном небе в 33°, ночью при Луне в 37°, т. е. искажена почти вдвое. Неудивительно поэтому, что в каталоге 611 болидов, изданном Венской Академией наук в 1925 г., среднее $H_1 = 132$ *км* и три четверти болидов оказались с гиперболическими скоростями, так как длина траектории L получается преувеличенной; из-за этого же для большей скорости получалась бо́льшая высота.

Перейдем к влиянию методики обработки. Обычно при нахождении H мы имеем дело с множителем $b \operatorname{cosec} \pi$. Пусть ε есть ошибка определения параллакса π; ее влияние неодинаково в зависимости от ее знака, так как $\frac{1}{2}[\operatorname{cosec}(\pi + \varepsilon) + \operatorname{cosec}(\pi - \varepsilon)] > \operatorname{cosec} \pi$. Это значит, что средняя арифметическая высота всегда больше настоящей. Если брать среднее из параллаксов, а не из высот, то это эквивалентно среднему гармоническому, т. е. обратной величине среднего арифметического из обратных величин высот. По некоторым исследованиям [385] истинное значение лежит между средним арифметическим и модальным (т. е. наиболее часто встречающимся).

§ 143. Начало свечения метеора. Осенью 1949 г. во время базисных наблюдений метеоров в Копет-Даге на высоте 2250 *м* автор [377] обнаружил, что в некоторые ночи в предутренние часы появлению метеора предшествует образование слабой голубоватой полоски шириной 1—2° и длиной примерно равной обычной длине пути метеора. Таким образом, видимый путь метеора состоит из этого «голубого следа», продолжением которого является обычный путь метеора. Высота начала голубого свечения $H \sim 160$ *км*. В долинных условиях он невидим, так как, вероятно, содержит фиолетовую радиацию.

На этих же примерно высотах метеоры (по-видимому, при горизонтальном полете) обнаруживаются иногда радиолокацией и телескопическими базисными наблюдениями. В последнем случае метеор появляется тончайшей иглой, постепенно расширяющейся.

§ 144. Зависимость высоты от скорости. При бо́льшей скорости метеора v энергии развивается больше и его свечение должно начаться выше, чем при меньшей v (рис. 120). Приведем данные

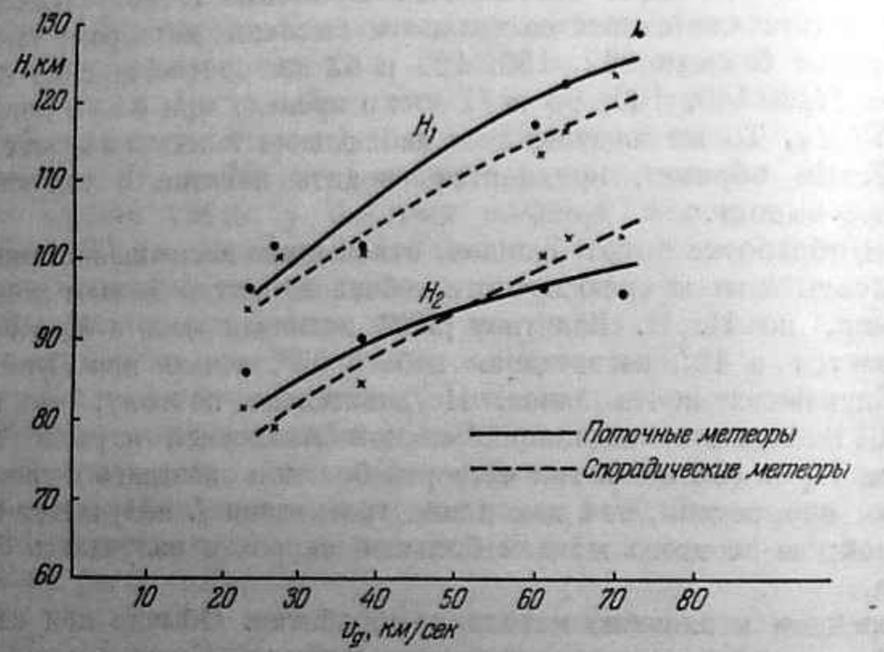


Рис. 120. Зависимость «высота — скорость» для поточных и спорадических метеоров.

Портера [408], особенно тщательно обработавшего 778 лучших английских наблюдений высот; данные о скоростях добавлены нами:

Метеорный поток	Скорость v км/сек	H_1 км	H_2 км	H_1' км	H_2' км
Леониды	72	125,6	(94,1)	121,2	101,3
Ориониды	66	119,7	100,9	114,4	101,1
Персеиды	62	114,9	94,7	112,0	94,4
δ-Аквариды	38	101,1	89,0	100,3	83,8
Тауриды	27	101,6	77,7	98,8	77,9
α-Каприкорниды . .	24?	95,5	85,3	93,3	80,5

Два последние столбца содержат высоты спорадических метеоров с той же скоростью v. Заметно, что высоты спорадических метеоров систематически ниже поточных. Вероятно, последние состоят из более плотных частиц. Из приведенной выше таблицы виден рост высот со скоростью. Более быстрые метеоры испаряются раньше и потому

их высоты H_2 также выше, хотя общая длина пути L у них больше (рис. 39). У болидов и телеметеоров также имеется подобная зависимость H от v_g. На рис. 121 дана зависимость $H = f(v)$ по Б. Ю. Левину [24], откуда видно, что рыхлые метеорные тела появляются выше, чем более плотные каменные, а железные — ниже. Светлые треугольники обозначают метеоры потоков, сплошные — спорадические (по фотографическим данным Яккиа, 1952 г.). Светлые кружки означают высоты метеоров быстрых потоков (Персеиды, Леониды, γ-Аквариды и Ориониды) по английским данным, темные кружочки — высоты спорадических метеоров по тем же данным. Наконец, квадратики — гарвардские фотографические данные Уиппла 1955 г. Сплошные линии — расчет Б. Ю. Левина [24] для крупных частиц, начинающих интенсивно испаряться при $T \sim 2400°$ K на высоте

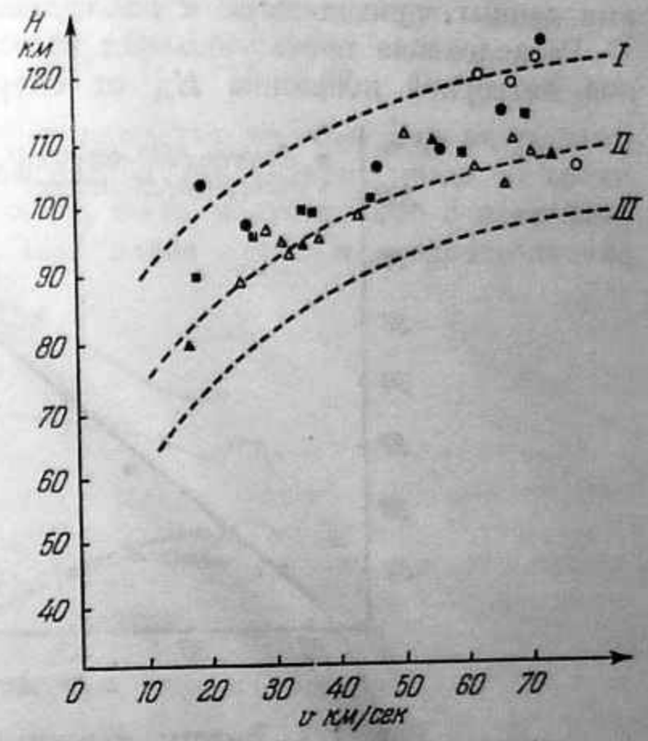


Рис. 121. Высоты появления метеоров (H_1) в зависимости от их скорости v и плотности метеорных частиц: I — рыхлые, II — плотные, III — железные. По Б. Ю. Левину [24].

$$H_1 = H_0 + 2{,}3H^* \left(\frac{5}{2} \lg v_0 - \frac{1}{2} \lg \cos z_R \right), \qquad (48)$$

причем H_0 есть высота некоторого стандартного метеора, летящего вертикально при $v = 10$ *км/сек*, а H^* есть высота однородной атмосферы или так называемая *шкала высот* на данной высоте.

При других скоростях имеем следующие высоты появления по формуле (48):

Скорость v_0, км/сек	15	30	60
Рыхлые каменные метеорные тела .	96	108	120
Плотные » » » .	82	94	106
Железные метеорные тела	74	86	98

Кроме того, по Эпику [407] существует «космическая дисперсия» высот из-за различий в форме, плотности, составе и даже вращении метеорных тел. Из-за нее H_1 может колебаться в пределах 10—15 *км*.

Опираясь на теорию метеоров Эпика (гл. 24), еще в 1948 г. Линк и Бумба [396] нашли разницу в плотности метеорных частиц из визуальных данных, приводившую к наблюдаемой дисперсии высот.

Радиолокация также указывает на зависимость высоты максимальной метеорной ионизации H_m от скорости v_0 вступления метеора

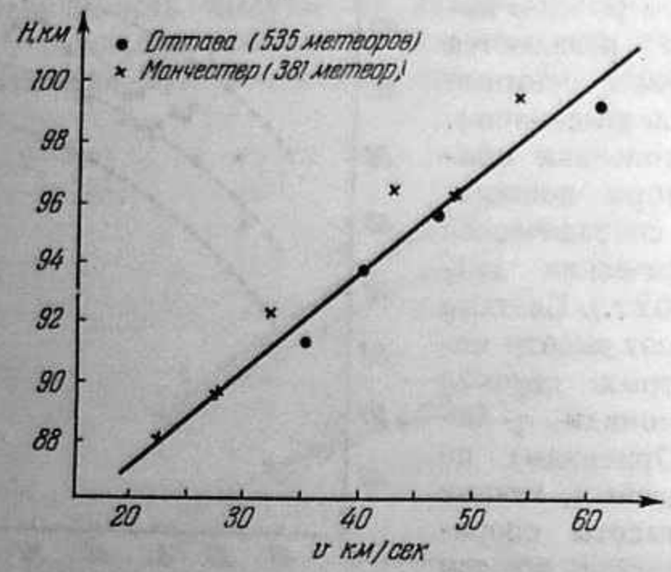


Рис. 122. Высоты максимальной метеорной ионизации в зависимости от скорости (по радионаблюдениям). По Миллману.

в атмосферу (рис. 122). Так, например, по 535 канадским и 381 английским определениям Миллман [315] указывает (данные осреднены):

Начальная v_0 . .	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65 *км/сек*
Высота H_m . . .	87,2	88,8	90,5	92,1	93,8	95,4	97,1	98,7	100,3	101,0 *км*

§ 145. Зависимость H от яркости сложна, так как последняя зависит и от массы, и от v^3, поэтому H_1 имеет максимум около —1 зв. величины, H_2 около +3 зв. величины. Кажется естественным, что более крупное тело будет замечено раньше, а разрушится при прочих равных условиях позже. По аризонским данным имеем:

m_z . . .	—3,9	—2,2	—1,1	0,0	+0,8	1,7	2,2	2,6	3,0	3,2 зв. вел.
H_1 . . .	96,0	96,7	101,0	99,5	97,9	95,5	93,2	96,4	96,2	91,9 *км*
H_2 . . .	61,9	64,9	72,9	76,7	80,9	80,9	80,5	84,5	84,9	83,3 *км*
$H_1 - H_2$	34,1	25,8	28,1	22,8	17,0	14,6	12,7	11,9	11,3	8,6 *км*

Разность $H_1 - H_2 = L \cos z_R$ пропорциональна длине пути L и увеличивается с возрастанием яркости. Высоты здесь средние гармонические; среднее арифметическое больше на 3,2%. Значение $\Delta H_1/\Delta m_z = -0{,}3$ *км* на 1 зв. величину, для H_2 равно +3,3 *км*. Средние высоты 433 поточных метеоров $H_1 = 103{,}2$, $H_2 = 85{,}4$ *км*, для 3540 спо-

радических метеоров 95,4 и 81,8, как и по английским данным. В 1930 г. Гофмейстер на европейском материале получил такие данные:

m	—5	—4	—3	—2	—1	0	+1	2,5	зв. вел.
H_1	100	100	108	113	116	113	105	103	*км*
H_2	59	62	65	72	71	77	80	79	*км*

Высоты H_1 здесь завышены, но дают тот же ход. Эти визуальные данные подтверждены фотографически Миллманом, когда во время дождя Драконид 1946 г. в Канаде было получено 206 фотографий; яркость интегрировалась по всей длине пути (m), односторонние

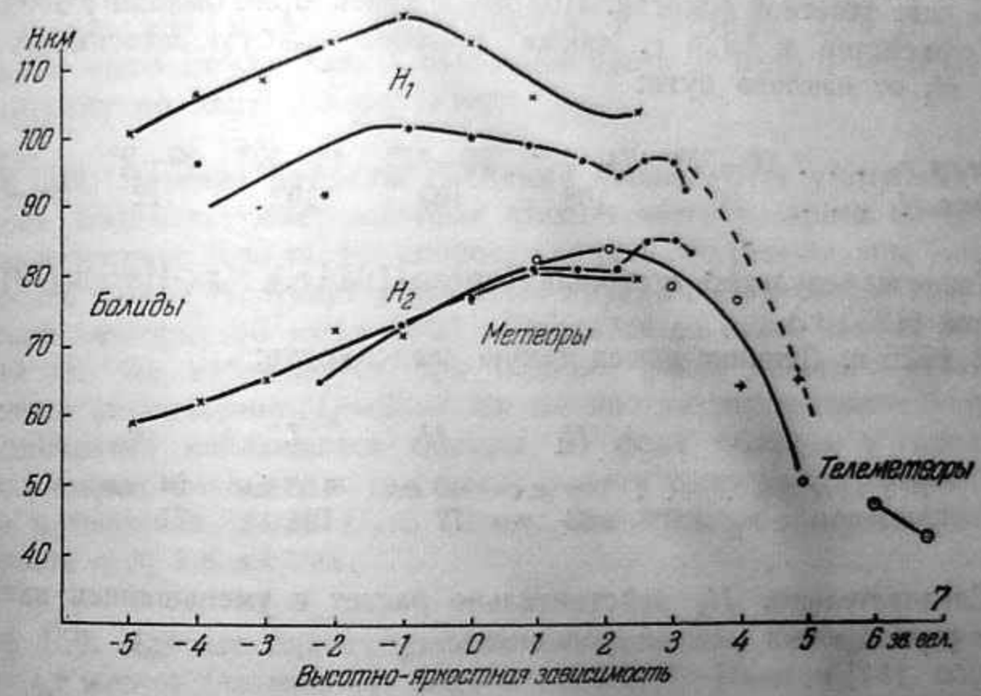


Рис. 123. Зависимость «высота — яркость» по различным данным:
×—× английские наблюдения, +—+ ташкентские наблюдения,
·—· аризонская экспедиция, ⊙—⊙ ашхабадские наблюдения,
○—○ сводка 1864 г. Г. Ньютона.

высоты определялись методом угловой скорости (с применением обтюратора). Из-за постоянства v_g данные вполне однородны:

m	—5,6	—4,5	—3,5	—2,4	—1,4	—0,5	+0,3	зв. вел.
H_1	98,4	98,6	98,8	97,7	98,4	96,9	95,1	*км*
H_2	86,5	85,3	87,6	89,5	91,0	91,0	90,2	*км*

Высоты болидов, обычных и телескопических метеоров сопоставлены на рис. 123. Много телеметеоров встречается на $H \sim 70$ *км* («средний ярус» высот).

§ 146. Влияние угла наклона траектории. Пусть для испарения метеора требуется соударение его с N частицами воздуха. Тогда при вертикальном падении длина его пути будет короче, чем при наклонном, следовательно, высота H_2 в первом случае будет больше. Высота

появления, очевидно, должна быть одинаковой в обоих случаях. Действительно, для персеид средней яркости по ашхабадским данным $H_1 = 112$ *км*, независимо от z_R, но при $z_R = 0$, 45, 60, 75 и 90° соответственно $H_2 = 83$, 86, 90, 98 и 114 *км*. Таким образом, при горизонтальном полете может получиться даже $H_1 < H_2$, поскольку из-за запаздывания теплопередачи метеорное тело, не успев испариться, может вылететь из атмосферы; высоты при таком полете предельно велики. В пределах $H = 80 - 160$ *км* при $z_R = 89°$ около 1,6% метеоров, пройдя перигей на H_{min}, могут вновь уйти из атмосферы, достигнув лишь едва заметной яркости. Подобные траектории бывали у болидов.

Гофмейстер в 1924 г. также получил слабую зависимость высоты H_1 от наклона пути:

Пределы z_R . . .	90—75°	74—60°	59—45°	44—30°	30—0°	Среднее
Среднее H_1 . . .	96	108	103	102	112	102±2 *км*

Такие же результаты получили Портер (1944 г.), Мак-Интош (1944 г.) и Эпик (1955 г.).

В 1926 г. Деннинг вывел такую зависимость:

	H_1	H_2	L	v
Все метеоры	106 *км*	40 *км*	186 *км*	24 *км/сек*
Метеоры с $z_R \cong 90°$	95	77	194	21

Следовательно, H_2 действительно растет с уменьшением наклона пути (при прочих равных условиях).

§ 147. Зависимость высоты от элонгации радианта. Если v_h и v_t означают гелиоцентрические скорости метеорного тела и Земли, то геоцентрическая скорость $v_g^2 = v_t^2 + v_h^2 + 2v_t v_h \cos\varepsilon'$, т. е. увеличивается с уменьшением ε'. Поэтому, даже не определяя v_g, можно ожидать, что существует связь между H и ε. Действительно, по аризонским данным [см. 373] для среднего метеора $\bar{m}_z = 2{,}3$ зв. вел.:

Элонгация ε . . .	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Высота H_c . . .	99,0	97,3	91,7	84,6	80,4	77,4	78,5 *км*

Здесь H_c есть высота середины пути. На европейском материале Гофмейстер нашел убывание v_g от 74 до 23 *км/сек* и высоты H_1 от 123 до 87 *км* при изменении ε от 21 до 147° (v_g и H здесь завышены). То же явление хорошо видно на материале каталога 611 болидов Ниссля [365].

§ 148. Высота метеоров в функции цвета обнаруживается статистически, так как цвет зависит от скорости и массы метеорного

тела. По каталогу 386 высот Ташкентской обсерватории П. А. Савицкий [409] получил следующее:

Цвет	Голубой	Белый	Желтый	Красный
H_1	165	139	126	115 *км*
H_2	89	82	70	63
L	88	71	61	37

H_1 и L здесь сильно преувеличены, но общий ход ясен. Более медленные метеоры имеют больше шансов проникнуть глубже в атмосферу, так как меньше разрушаются, и обратно. Для отдельных болидов часто можно видеть изменение цвета от белого через желтый к красному по мере его опускания.

§ 149. Нижние пределы свечения наблюдаются у крупных медленных болидов, полет которых заканчивается падением метеорита, когда метеорное тело теряет скорость до полного разрушения. Поэтому наиболее низкие H_2 будут у наиболее крупных метеоритов. Так, Тунгусский метеорит 30 июня 1908 г. светился до самой земной поверхности (то же наблюдается при падении ракет дальнего действия). Имеются определения $H_2 = 2$—7 *км* по многим наблюдениям болидов. Неоднократно наблюдались болиды на фоне облаков у горизонта; у нескольких болидов, в том числе у пяти сопровождавшихся падением метеоритов, было $H_2 < 10$ *км*. Свечение наблюдается еще при скорости $v \cong 1{,}8$ *км/сек*.

§ 150. Данные односторонних методов, как мы видели, указывают на низкие значения H. Еще в 1864 г. Г. Ньютон [14], обработав 342 высоты, найденные к тому времени, нашел среднее арифметическое $H_1 = 116{,}2$, $H_2 = 90{,}9$ *км*; он же отметил несоответствие длины пути $L = v_g\tau$ с получаемой из соотношения $L = (H_1 - H_2)\sec z_R$. В Иркутске в 1932 г. автор проводил наблюдения Леонид, причем τ определялось прецизионным секундомером; по формуле (46) найдено $H_1 = 103$, $H_2 = 93$ *км*. Тогда же для Орионид найдено $H_1 = 87$ и $H_2 = 76$ *км*, т. е. на 10—15 *км* ниже принимавшихся в то время высот. Поэтому в 1935 г. В. В. Федынский и автор указали [378], что значения тригонометрических высот должны быть снижены из-за неправильной методики их обработки. Еще в 1933 г. В. В. Федынский по 82 односторонним леонидам нашел модальные значения $H_1 = 88$ *км*, $H_2 = 55$ *км* против 128 *км* и 92 *км* средних арифметических. Кроме того, оба метода Н. М. Штауде приводили также к более низким высотам, на что указал К. П. Станюкович [388]. Как мы уже видели, радиометоды и фотография впоследствии подтвердили эти соображения.

Приведем пример нахождения высоты H_2 односторонними методами, детально разработанными в Ашхабаде в 1942—1947 гг.; пример взят типичный, а не самый лучший.

Метеор $m_z = +1{,}2$ зв. вел. 1943 IV 4, 19 ч. 55 м. мир. вр., $\lambda = 8°$, $\tau = 1{,}0$ *сек*, $\omega = 1$, $c = 4$, без следа, $p = 1{,}0$, радиант Виргинид $\alpha = 192°$, $\delta = -2°$, $\psi_1 = 30°$, $z_2 = 50°$. Получаем:

Односторонний метод:	Высота H_2
Высотно-скоростная зависимость (Портер) по $\omega_1 = 8°{,}0\ сек^{-1}$ . . .	82 *км*
То же по $\omega_2 = 8°{,}3\ сек^{-1}$	79
Высотно-цветовая зависимость, без учета яркости	70
Высотно-яркостная зависимость (Гофмейстер), без учета цвета . .	79
То же аризонская кривая, без учета цвета	81
Высотно-элонгационная зависимость, аризонская кривая	84
Зависимость длина — яркость, по Станюковичу, с учетом скорости	81
Среднее . .	79 ± 2 *км*

Средняя квадратичная ошибка определения высоты одним методом получается $\varepsilon = \pm 4{,}5$ *км*. Попутно найдена скорость $v_g = 36$ *км/сек*.

§ 151. Зависимость длины пути от яркости. Еще полвека назад было известно, что угловые длины болидов больше, чем обычных метеоров. В 1922 г. Эпик [332] из ташкентских наблюдений Персеид 1920 г. нашел, что $\lg L = 1{,}94 - 0{,}112 m_z$. Так, при $m_z = 0{,}0$ и $+3{,}2$ зв. вел. имеем $L = 90$ и 39 *км*. В 1928 г. автор получил следующее:

Яркость, m	1	2	3	4	5	зв. вел.
Продолжительность, τ .	1,18	0,92	0,87	0,54	0,37	*сек*
Длина пути, L	72	56	53	33	23	*км*

Данные относятся к Персеидам ($v = 61$ *км/сек*), наблюдавшимся в трех разных местах. Отсюда $\lg L = 1{,}95 - 0{,}110\, m$ и например для телеметеора 9,0 вел. оказывается $L = 9$ *км*. Для последних контурные наблюдения дают $H_1 : H_2 = 1{,}18$, а так как $H_1 - H_2 = L \cos z_R$, то, решая совместно оба эти уравнения, находим, что траектории телеметеоров расположены невысоко: $H_1 = 51$, $H_2 = 43$ *км*. Уже из наблюдений в Николаеве в 1925 г. метеоров со следами (I) и без следов (II) было видно, что при одинаковой яркости первые, более быстрые, оказываются длиннее (рис. 39):

Яркость, m		−3	−2	+1	+2	+3	4 зв. вел.	Метеоров
Средняя, $\bar{l}$	I	30°	23°	15°	11°	10°	4°	115
»	II	15	14	10	9	8	6	1180

В 1932 г. для метеоров с $v > 50$ *км/сек* К. П. Станюкович [148] в пределах от 0 до $+4$ зв. вел. нашел $\lg L = 1{,}90 - 0{,}100\, m_z$; для группы с $v < 50$ $\lg L = 1{,}70 - 0{,}076\, m_z$. Приводим его данные.

Яркость, m_z		−4	−2	0	+2	+4	+6	зв. вел.
Длина пути, L	$v \geq 50$	170	110	70	42	30	24	*км*
	$v < 50$	130	75	50	36	24	18	*км*

Поскольку m_z пропорционально $\lg I$, где I — сила света, то $\lg L$ линейно связано с $\lg I$; используя односторонние наблюдения, в 1935 г. автор [374a] нашел эмпирическую зависимость $L = K \sqrt[4]{I}/\sqrt{H}$. Если выражать L и H в *км*, I в *м. св.*, то $K = 43$. Тогда для метеоров с $I = 10$, 5000 и 10^8 *м. св.* получим $L = 4{,}7$ *км* (телеметеор), 33 *км* (обычный метеор) и 470 *км* (болид). В 1932 г. А. Б. Северный [222, 223] нашел такую же связь L с I на Персеидах 1858—1922 гг.

§ 152. Зависимость длины пути от наклона. Средний наклон траекторий метеоров i по Мак-Интошу (12 800 наблюдений в Новой Зеландии) равен 35°, по Деннингу для более ярких метеоров — также 35°. Длина пути L в зависимости от i, по 925 лучшим английским траекториям (Мак-Интош, 1944 г.), а также значения $H_1 : L$ и $H_2 : L$, нужные для односторонних методов определения ψ и R, таковы:

Наклон пути i . .	0—9°	10—19°	20—29°	30—39°	40—49°
Высота H_1 . . .	99	105	113	108	113
» H_2 . . .	84	76	74	68	68
Длина пути L . .	198	114	98	76	64
$H_1 : L$	0,50	0,91	1,15	1,42	1,77
$H_2 : L$	0,42	0,67	0,76	0,89	1,06

Наклон пути i . .	50—59°	60—69°	70—79°	80—90°
Высота H_1 . . .	111	115	113	110 *км*
» H_2 . . .	66	69	65	66 *км*
Длина пути L . .	55	53	51	45 *км*
$H_1 : L$	2,02	2,17	2,22	2,44
$H_2 : L$	1,20	1,30	1,28	1,46

§ 153. Данные радиометодов. Английские радиолокаторы на волнах 4—5 *м* с конца 1944 г. давали метеорные отражения с $H = 92$ *км*. С 1945—1946 гг. Хей и Стьюарт смешанным визуально-радиолокационным методом нашли почти то же значение. Применение этого метода в Канаде показало, что глаз видит гораздо больший путь метеора, чем дает радиолокатор, получающий отражение только от участка длиной 1—2 *км*. На волне 2,8 *м* в Стерлинге (США) во время максимума Драконид 1946 г. нижний предел отражений был $H = 95$ *км*; здесь H найдено по минимальному r, соответствующему метеорам в зените, без параллельных «наружных» наблюдений. В 1947—1948 гг. в Ашхабаде на волне 4 *м* смешанным методом исследовались высоты больших потоков и был получен следующий результат, сопоставленный со скоростью, известной для этих потоков вообще; данные относятся к ярким метеорам.

Метеоры:	Очень быстрые	Леониды	γ-Аквариды	Быстрые метеоры	Персеиды	Довольно быстрые метеоры	ζ-Аквариды	Медленные метеоры
Высоты, H *км*	99	96	95	87	87	86	61	65 *км*
Скорости, v .	72—65	72	65	65—60	61	60—50	?	35 *км/сек*

Достаточно полной критической сводки по радиовысотам пока нет.

§ 154. Данные фотографических методов. Пример применения одностороннего фотографического метода приведен выше (стр. 235) для Драконид 1946 г. За первые полвека применения фотографии к изучению метеоров (1885—1935 гг.) было определено 38 фотовысот из базисных наблюдений. Из них в 12 случаях H_1 и в семи H_2 превосходили 100 *км*. Среднее арифметическое высот для 27 метеоров потоков оказалось $H_1 = 90{,}3$ *км* и $H_2 = 77{,}7$ *км*, для семи спорадических — 68 и 59 *км*. К 1952 г. число фотовысот доходило до 200 и продолжает быстро возрастать. Из девяти научных учреждений, проводящих эту работу, четыре находятся в СССР (Ашхабад, Сталинабад, Киев, Одесса).

На основании фотографических данных Яккиа [694] Б. Ю. Левин [24] приводит следующую табличку, которую мы дополнили 10 метеорами из сводки А. П. Саврухина (Ашхабад, 1950):

Поток	n	v_0	H_1
Цигниды	9	25,3	101,6
Тауриды	15	30,3	95,2
Виргиниды	3	32	94,6
Геминиды	24	36,4	96,1
Лириды	5	49,4	107,2
Персеиды	18	60,5	106,5
Ориониды	4	67,0	114,4
Леониды	7	70,6	109,7
Спорадические метеоры	10	15,9	79,9
	20	24,2	89,9
	11	33,8	95,0
	9	42,3	99,3
	4	55,2	111,0
	14	65,0	105,2
	2	72,8	109,4

Вновь более низкими оказываются высоты спорадических метеоров. Для персеид среднее из ашхабадских определений есть $H_1 = 106{,}3$ *км* ($n = 3$), $v_0 = 60{,}9$ *км/сек*, а по гарвардским данным соответственно 106,5 *км* и 60,5 *км/сек*.

§ 155. Высоты метеоров особых классов. Небольшая часть метеоров имеет особенности, не встречающиеся у прочих метеоров, например: необычайно большую угловую скорость (до 100° *сек*$^{-1}$), очень большую длину, не соответствующую яркости, очень «стойкие», долго видимые следы, ряд последовательных вспышек; встречаются красные метеоры с аномальными вспышками в конце пути или со слишком большой скоростью, не соответствующей цвету, и т. д. Еще в 1933 г. в Аризонской экспедиции было найдено, что высоты поточных метеоров выше, чем спорадических; драконид 1946 г., по Миллману, дали высоту появления гораздо выше, чем это соответствовало бы их скорости; это может происходить из-за большей рыхлости метеорного материала потоков. В Ашхабаде все из шести сфотографированных цигнид (август 1950 и 1953 гг.) оказались облающими меньшей плотностью, чем даже персеиды. При прочих равных условиях даже в одном потоке встречается дисперсия высот на 15 *км*, по-видимому, из-за индивидуальных свойств отдельных метеорных частиц (форма, состав). «Железные» метеоры ниже «каменных» в точке погасания на 12—20 *км*, почему и кажутся непомерно быстрыми; это

одна из разгадок «скоролетов» — сверхбыстрых метеоров. Действительно, в 1949—1950 гг. в Ашхабаде при специальных определениях высот метеоров особых классов было найдено, что «скоролеты» имеют низкие высоты (50—70 *км*). Очень длинные, но слабые метеоры оказались предельно высокими (до $H = 130$ *км*) с радиантами на горизонте; напротив, низкие высоты красных метеоров приводили к несообразно большой видимой скорости. Высоты вспышек оказались самыми разнообразными, причем причина вспышек лежит не в атмосфере, а в метеорном теле (по мнению автора, — мгновенное испарение легкоплавких включений). Один метеор, летевший 12 (!) *сек*, оказалось, имел горизонтальную траекторию на высоте 70 *км*. В 1948 г. Бумба и Линк (Прага) на основании физической теории метеоров, дающей высоты в зависимости от теплоемкости, используя H_1 и H_2, нашли что $^2/_3$ метеоров летят в жидком состоянии и только те, что ярче +1 зв. вел., сохраняют твердое состояние до конца полета. Эти авторы находят, что соотношение железных и каменных частиц в потоках равно 15 : 85, в спорадических метеорах 30 : 70. В августе 1949 г. в Ашхабаде обнаружен поток в Водолее, все метеоры которого имели высоты $H_1 \approx 150$ *км*. Здесь нужны дальнейшие исследования.

§ 156. Дальнейшие задачи. Необходимо исследовать H_1 и H_2 метеоров особых классов (туманных, слабых, особенно телеметеоров), те значения H, где начинаются особые явления (вспышки, искры, следообразование), сезонные и суточные вариации высот. Нужен сводный каталог всех определений высот и разработка единой системы высот.

ГЛАВА 14

СКОРОСТИ МЕТЕОРОВ

§ 157. Введение. Уже при первых попытках определения траекторий болидов в XVIII в. скорость их движения получалась космической, но тогда болиды рассматривались отдельно от метеоров. Когда осенью 1798 г. Брандес и Бенценберг получили подобные же скорости у обычных метеоров, то одно это еще не могло послужить доказательством их внеатмосферной природы, так как уже в то время были известны в атмосфере скорости бóльшие, чем у метеоров (например, у молнии).

Открытие радианта в 1833 г. открыло путь астрономической теории метеоров, так как из задачи двух тел было известно, что знание направления и скорости достаточно для вычисления орбиты. В то время точность определения радианта была выше точности определения скорости и поэтому первые пять орбит, вычисленные для персеид по их наблюденным скоростям, оказались ненадежными (Уокер, 1840 г.). Пришлось обратиться к старому способу: «среднее из нескольких наблюдений точнее одного наблюдения». Проще всего в этом случае было использовать многосторонние наблюдения болидов (каталог 611 траекторий болидов 1925 г. Ниссля — Гофмейстера [365] содержит $^3/_4$ скоростей, определенных этим путем).

Труднее было находить скорости обычных метеоров: требовалась организация базисных пунктов, разработка надежной методики; кроме того, обычно число наблюдений равнялось двум, что не могло считаться достаточным для такого мимолетного явления, как метеор. Однако совместными усилиями русских, английских и немецких наблюдателей к 1935 г. этим путем было определено свыше тысячи траекторий и скоростей, в целом оказавшихся гораздо более точными, чем у болидов с их «гиперболизацией» высот и скоростей. К сожалению, последняя ошибка была открыта очень поздно, уже к началу развития инструментальной методики.

Учитывая малую точность определения скорости v, с 40-х гг. XIX в. был избран другой путь: сопоставляя летописные записи, находить периоды T повторения метеорных дождей и, отождествляя их с периодом

обращения потока, находить большую полуось орбиты $a = T^{\frac{2}{3}}$. Но таких потоков оказались единицы.

Пришлось обратиться к третьему способу — находить среднюю гелиоцентрическую массовую скорость v_h из теории суточной вариации по соотношению чисел метеоров, встречающих и догоняющих Землю. Тогда предполагалось, что это соотношение близко к единице, потому что связь метеоров с кометами позволяла считать, что метеорные орбиты имеют такое же беспорядочное распределение наклонений, как и кометные. В результате v_h получалось завышенным, а так как наблюдения болидов давали также $v_h > \sqrt{2} \cdot v_t$ (v_t — орбитальная скорость Земли), то результат, казалось, заслуживал некоторого доверия.

Однако имелись предостережения, на которые в то время не было обращено достаточного внимания: невязка в высотах и скоростях по односторонним и двусторонним определениям (Г. Ньютон, 1865 г.), гиперболическое значение скорости Лирид вместо заведомо эллиптической (190 *км/сек* против 41 *км/сек*, Гофмейстер, 1915 г.), необходимость снизить общепринятые значения высот метеоров (Н. М. Штауде, Ленинград, 1924 г., В. В. Федынский и И. С. Астапович, Москва, 1931 г.), прямые указания на то, что в потоке Таурид, считавшемся типичным «гиперболическим», имеются эллиптические орбиты (И. С. Астапович, 1939 г. [163] на основании визуальных наблюдений по программе-максимум). Этот поток, как и Скорпиониды, Нислем и Кнопфом считался гиперболическим также и потому, что их радианты оказывались расположенными так, как если бы метеорные тела вступали в солнечную систему по параллельным путям; но в богатых потоках, где много радиантов, всегда можно было найти такие, которые случайно совпадали с теоретическим «космическим» радиантом.

Поэтому особенно важно было применить для определения скоростей инструментальную методику. Вспомним, что еще в конце XIX в. В. К. Цераский [187] применил метод качающейся лампочки, Элькин (Нью-Хэвен) [432] и П. К. Штернберг (Москва) — периодический затвор, Линдеман и Добсон в 1911 г. получили первую в Англию велограмму [437]. Однако массовое фотографическое определение скоростей было начато с 1932 г., когда метеорным отделом Московского отделения ВАГО под руководством В. В. Федынского под Москвой были получены первые результаты [95, 419]. В 1936 г. работы патрульных камер Гарвардской обсерватории были так согласованы, чтобы давать базисные снимки метеоров в Кэмбридже и Ок-Ридже [193]; к 1944 г. там их было получено 38 пар. В 1937 г. вступил в строй метеорный патруль в Сталинабаде, к 1954 г. давший более полусотни скоростей [259, 343, 428], за 1948—1953 гг. около 45 фотографических скоростей определено в Ашхабаде [426], ряд определений сделан в Симферополе местным отделением ВАГО.

Активную деятельность в области фотографического определения скоростей и торможений проявили астрономы Чехословакии, получив с 1951 г. несколько десятков снимков метеоров [434, 438, 439, 449]. С 1951 г. усиливается интерес к фотографированию метеоров в Японии, где затем были получены ценные базисные фотографии, в частности, по Квадрантидам 1954 г. С 1952 г. вступают в работу первые «супершмидты» Гарвардской обсерватории и Массачузетского технологического института, за два года давшие более 2000 пар фотографий метеоров до $+3$ величины. В 1937 г. Оливье [277] опубликовал результаты Элькина 1894—1909 гг., но из-за неучета ошибки неодновременности и малонадежной маркировки скорости оказались ненадежными. Так как в определениях Уиппла 1937—1940 гг. уверенных гиперболических скоростей спорадических метеоров не оказалось [450], то Портер (Англия) [408] и Мак-Интош (Новая Зеландия) [442] пересмотрели каталоги прежних определений скоростей из базисных визуальных наблюдений. Оказалось, что у опытных наблюдателей они хорошо совпадали с теоретическими; этот вывод был получен В. А. Мальцевым в Ташкенте еще в 1933 г. [423]. Е. М. Проскурина опубликовала в 1949 г. первый каталог нескольких сотен радиантов и скоростей по наблюдениям автора в 1944 г. [424]. Сравнение распределения этих скоростей с данными радиометодов (Миллман, 1954 г.) показало полную идентичность даже в деталях (рис. 124). Как известно, визуальные скорости ряда потоков, найденные в 1942—1945 гг. в Ашхабаде, впоследствии оказались полностью подтвержденными радио- и фотографическими определениями. В 1940 г. Уайли [451] критически пересмотрел определения скоростей болидов и нашел, что они завышены. Современные определения также не дают для болидов гиперболических скоростей. Что же касается телескопических метеоров, то скорости их (по данным Аризонской экспедиции [373, 448]) получались в основном гиперболическими (применялось вибрирующее зеркало). Высот опубликовано не было; если они принимались такими же, как у обычных метеоров, то наблюдаемой угловой скорости будет соответствовать скорость до 140 *км/сек*. В 1947—1948 гг. тригонометрические измерения высот телеметеоров [870] дали $H = 40$—50 *км*; в таком случае полученные Аризонской экспедицией скорости окажутся раза в два ниже и будут внутри параболического предела. Однако гиперболические скорости все же имеются как по визуальным наблюдениям («скоролеты»), так и по телескопическим, фотографическим и радиоопределениям; их около 0,5 %.

В настоящее время наиболее практично определение скоростей радиометодами: за час можно получить 6—8 радиорадиантов и скоростей вплоть до слабых метеоров в любое время суток независимо от облачности, тогда как только одна обработка базисной пары фотографий требует двухнедельной работы, не говоря о трудности самой съемки, к тому же только ярких метеоров. К 1954 г. число

радиоскоростей, определенных только в Канаде, достигло 11 000, в Англии 1800 и продолжает быстро расти. В Харькове только

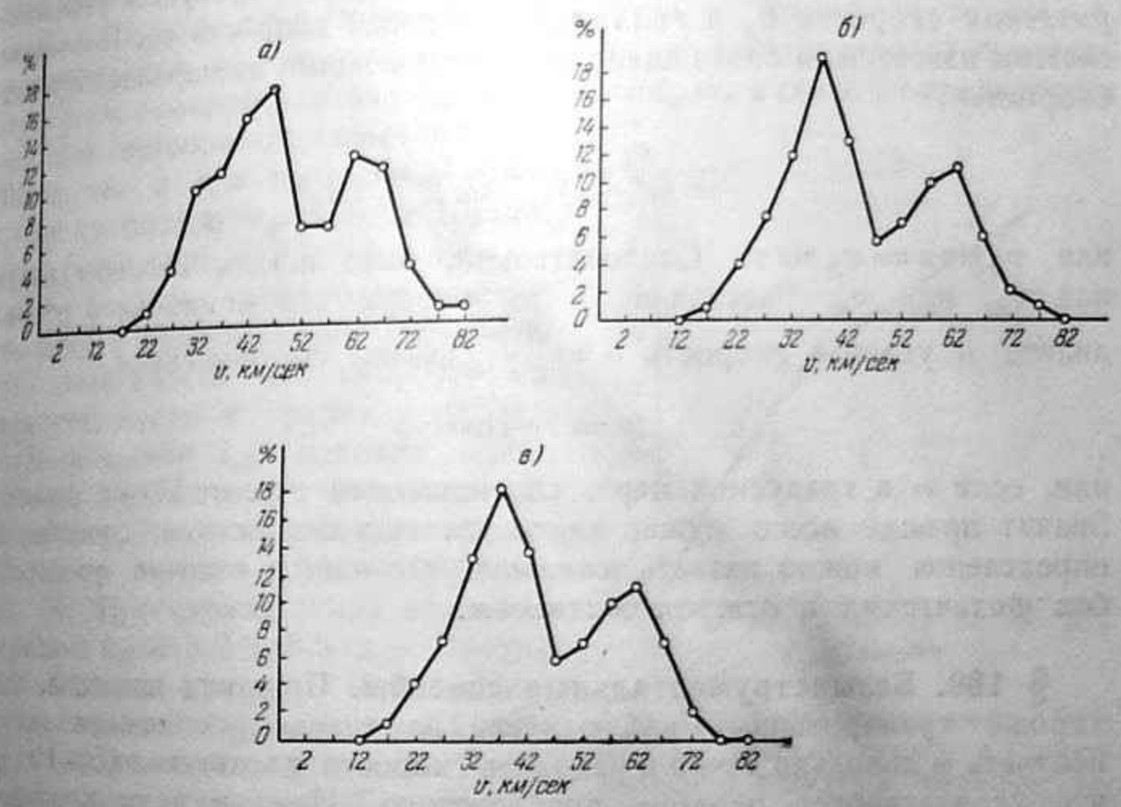


Рис. 124. Распределение геоцентрических скоростей по визуальным (*а*) и радиолокационным (*б*, *в*) данным:

а — Ашхабад, 1943 г. ($n = 1500$); *б* — Джодрелл Бэнк, 1949—1952 гг. ($n = 1832$); *в* — Оттава, 1949—1952 гг. ($n = 11\,073$).

с октября 1957 г. по февраль 1958 г. определено 2000 радиоскоростей метеоров.

§ 158. Определения. В главах 12 и 13 рассматривалось определение пространственных положений метеора. Их изменение со временем вызвано его движением. Мерой быстроты этого движения является *скорость*, знание направления скорости дает вектор $\boldsymbol{v}$. Если расстояние L от точки A до точки B метеор прошел за время τ, то *средней* скоростью метеора назовем $v = \frac{L}{\tau}$. Значение скорости в каждой отдельной точке дает *мгновенную* скорость $v = \frac{dL}{d\tau}$, изменение скорости во времени (*ускорение*) $j = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2L}{d\tau}$ в нашем случае всегда отрицательно и потому называется *торможением* ($j < 0$). Обычно принимается, что вектор $\boldsymbol{j}$ совпадает с обратным направлением касательной к траектории в данной точке. Методически целесообразно рассматривать раздельно определение скорости и торможения.

§ 159. Методы определения скоростей. При изучении физических и геофизических метеорных явлений нужно знать *атмосферную* скорость метеора v, для вычисления орбиты требуется *геоцентрическая* скорость v_g и *гелиоцентрическая* скорость v_h. Последние связаны известными соотношениями, вытекающими из параллелограмма скоростей

$$\frac{v_t}{\sin(\varepsilon' - \varepsilon)} = \frac{v_g}{\sin \varepsilon'} = \frac{v_h}{\sin \varepsilon} \qquad (49)$$

или $v_g \sin \varepsilon = v_h \sin \varepsilon'$. Следовательно, надо искать способы найти или v_h, или v_g. Расстояние r до метеора, его элонгация ψ от радианта и угловая скорость $\omega = \frac{d\lambda}{d\tau}$ связаны соотношением

$$v = r\omega \operatorname{cosec} \psi \qquad (50)$$

или, если ω в градусной мере, соотношением $v \approx \text{arc } 1^\circ \cdot \omega r \operatorname{cosec} \psi$. Значит прежде всего нужно знать угловую скорость ω; способы ее определения можно назвать *кинематическими* в отличие от способов *физических* и *астрономических*.

§ 160. Безынструментальные способы. Практика показала, что хорошо тренированные наблюдатели из визуальных данных могут получать ω довольно точно и находить скорости v потоков до 5—10%, что удовлетворяет первому приближению. Имея в виду простоту метода, отсутствие громоздкой и дорогостоящей материальной части, рассмотрим визуальные методы нахождения ω.

1. Определение средней угловой скорости $\bar{\omega}$ возможно из соотношения $\omega_1 = \frac{\lambda}{\tau}$ с учетом сказанного в гл. 8 о критической области $\tau_{кр}$ и $\lambda_{кр}$.

2. Способ условной шкалы был предложен в 1928 г. И. С. Астаповичем, заметившим, что восприятие угловой скорости i_ω растет пропорционально $\lg \omega$ и что таким образом в астрономии существует кинематическая аналогия шкале звездных величин Погсона, как следствие закона Вебера — Фехнера:

формула шкалы скоростей:

$$i_\omega = K_1 \lg \omega + p; \qquad (51)$$

формула шкалы звездных величин:

$$m = K_2 \lg E + q. \qquad (52)$$

Здесь p и q — постоянные нуль-пункта; в шкале звездных величин $K_2 = 2{,}50$, $q = +0{,}82$, в шкале скоростей $K_1 = 5{,}8$, $p = -3{,}4$ (для автора при ω, выраженной в *град/сек*). E есть освещенность от источника с силой света I *м. св*, находящегося на расстоянии r *км*. Как известно, в логарифмических шкалах ошибка постоянна на всем

протяжении шкалы и в среднем в 1,5 раза меньше, чем в предыдущем способе. В Ашхабаде имеется более 17 000 определений ω_z этим путем (см. рис. 55).

3. Способ сравнения разработан в Ашхабаде в 1942 г. и заключается в том, что приведенная к зениту угловая скорость $\omega_z = \omega \sec z \operatorname{cosec} \psi$ или балл шкалы $i_{\omega z} = i_\omega \sec z \operatorname{cosec} \psi$ определяются как для метеоров неизвестных потоков, так и для потоков с известной скоростью v_g. Строя график $\omega_z = f(v_g)$ (рис. 125), мы не делаем никаких предположений о высотах и автоматически учитываем их зависимость от скорости и яркости; входя в график с наблюдаемым ω_z или $i_{\omega z}$, находим однозначно неизвестную скорость v_g. Например, из обработки ашхабадского ряда 1943—1944 гг. Е. М. Проскурина [232] получила среднее $i_{\omega z} = 3{,}2 \pm 0{,}3$ для Боотид 15—24 июня при $v_g = 18{,}8$ *км/сек*; Персеиды дали $i_{\omega z} = 6{,}5 \pm 0{,}2$ при $v_g = 60{,}9$ *км/сек* и т. д. Тогда неизвестная скорость Скорпионид 29—31 июля 1943 г. оказалась по $i_{\omega z} = 4{,}5$ равной $v_g = 30{,}5$ *км/сек*, Геминид 35 *км/сек*, δ-Акварид 36 *км/сек*. Квадрантиды 1946 г. дали 33 и 46 *км/сек*. Впоследствии эти значения были подтверждены инструментально, что заставляет считать этот способ наиболее удобным и точным из безынструментальных методов. Полезно составить табличку поправок $\Delta\omega$ за $\sec z$ и $\operatorname{cosec} \psi$, тогда $i_{\omega z} = i_\omega + \Delta_z + \Delta_\psi$.

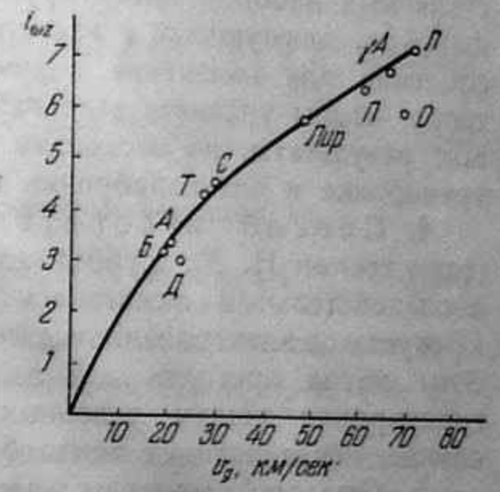


Рис. 125. Зависимость между баллом $i_{\omega z}$ угловой скорости (приведенной к зениту) и линейной геоцентрической скоростью.

Буквы означают названия метеорных потоков (*Д* — Дракониды, *С* — Скорпиониды, остальные см. подпись к рис. 89). Ашхабад, 1943—1944 гг.

§ 161. Полуинструментальные способы используют некоторые приспособления для повышения точности визуального определения ω. К ним относятся:

1. Способ Цераского качающейся лампочки (гл. 8). По Цераскому, на некотором расстоянии ψ от радианта метеоры Персеид проходили 1° за 0,062 *сек*, что дало впервые $\omega = 16^\circ{,}13$ *сек*$^{-1}$ (Московская обсерватория).

2. Способ вибрирующего зеркала (Пиккеринг, см. гл. 8). Из-за того, что при полете метеора глаз не остается в покое, форма петель искажается и ω, полученная по ним, плохо согласуется с ω, полученной по их числу и длине пути λ. Эпик [448] опубликовал каталог 1436 скоростей, полученных им этим методом в Аризоне

в 1931—1932 гг. и в Тарту. Наблюдая в телескоп отражения в таком зеркале, в Аризоне находили ω телеметеоров; некоторые из них были так быстры, что даже при частоте вибраций 30 *гц* волнистость траектории не была заметна; это дает $v > 100$ *км/сек*. Наконец, можно фотографировать камерой отражения метеоров и более точно измерять ω.

3. Способ стандартов угловых скоростей, осуществляемых набором проектируемых на небо лампочек или блестящих шариков, движущихся с известной ω. При этом необходимо приспособление для изменения видимой длины пути λ искусственного метеора, чтобы уравнять ее с наблюдаемой (гл. 8). Способ дает хорошие результаты, но несколько громоздок и его лучше применять при тренировке и для калибровки шкалы наблюдателя (см. рис. 68).

4. Способ лабораторной шкалы угловых скоростей (тахистоскоп Н. М. Субботиной 1914 г., имитация движения метеора последовательным зажиганием электролампочек, по Гуту, 1935 г., движущаяся электролампочка английских наблюдателей, 1938 г. и др.). Этот метод пригоден для лабораторных испытаний наблюдателя и градуировки шкалы условных скоростей i_ω, однако лишь в том случае, когда условия опыта близки к условиям наблюдения.

5. Способ многогранного зеркала, вращаемого электромотором с различной (но известной) скоростью, регулируемой реостатом, заключается в уравнивании угловой скорости ω отражения звезды и метеора и в вычислении затем ω по измеренному числу оборотов. В 1944 г. в Ашхабаде способ применялся для исследования ошибок наблюдателя (см. выше).

6. Метод визуального обтюратора (см. гл. 8) впервые применялся 9 августа 1934 г. в Ленинграде автором и А. Ю. Маноцковым. «Визуальный омегоскоп» имел четыре лопасти и $n = 170$ об/мин; угловая скорость $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\tau}$ определялась омегоскопом (I) и обычным путем через $\frac{\lambda}{\tau}$ (II). Вот некоторые данные этих определений:

Мировое время	Звездная величина m	λ	τ	Длина отрезка $\Delta\lambda$	Интервал $\Delta\tau$	Угловая скорость ω (*град/сек*)	
						I	II
23 ч. 15 м.	2,8	5°,5	0,25	2°,3	0^s,090	25	22
20	3,0	6	0,2	3,0	0,082	36	30
24	1,2	2,5	0,1	2,5	0,094	27	25

Если глаз начинал двигаться за метеором, то пунктирные перерывы появлялись у соседних ярких звезд. По-видимому, этот метод более пригоден для наблюдения телеметеоров.

7. Способ хронографа позволяет уточнить τ; он применялся Н. П. Барабашовым в Харькове, И. А. Дюковым в Казани и А. М. Бахаревым в Сталинабаде. Однако для опытного наблюдателя особых преимуществ не получается. Той же цели служит прецизионный секундомер или электронное реле (гл. 8), задающие интервалы заданной продолжительности. Массовых определений τ и ω с помощью этих устройств пока не производилось.

Найдя ω, получаем v односторонним или двухсторонним путем. В первом случае при известном r пользуемся выражением (50) или эквивалентным ему при известной высоте H_2:

$$v = H_2\omega \sec z_2 \operatorname{cosec}\psi \cdot \operatorname{arc} 1^\circ. \qquad (53)$$

Во втором случае базисные наблюдения дают r, H_1, H_2 и L, поэтому

$$\overline{v} = \frac{L}{\tau} \quad \text{или} \quad v = \frac{H_1 - H_2}{\tau} \sec z_R, \qquad (54)$$

либо из выражений вида (53) для не слишком больших λ:

$$v = H_2\omega \sec z_2 \operatorname{cosec}\psi_1 \operatorname{arc} 1^\circ = H_1\omega \sec z_1 \operatorname{cosec}\psi_2 \operatorname{arc} 1^\circ. \qquad (55)$$

Обычные метеоры резко тормозятся лишь в конце пути, поэтому средняя скорость для них близка к геоцентрической, т. е. $\overline{v} \approx v_g$.

§ 162. Физические способы являются односторонними. В первую очередь следует указать инструментальные радиометоды: 1) метод бегущего «гиперболического» эхо; 2) канадский метод «доплерова свиста»; 3) стэнфордский радиоакустический метод записи свиста; 4) манчестерский метод зон Френеля; 5) канадский метод трех станций. При измерении гиперболы в первом способе возможны три разных приема нахождения скорости v. Подробнее об определении радиоскоростей см. гл. 10.

Далее следует отметить такие способы: 6) смешанный визуально-радиолокационный, когда радиолокатором определяется r, а визуально ψ и ω; метод может быть достаточно эффективным; с 1947 г. он применялся в Ашхабаде, где было определено более сотни r; 7) способ, использующий зависимость $L = f(m_z)$, тогда $v = L/\tau$; 8) оценка порядка v по зависимости цвета от v и m_z (см. § 144); 9) оценка порядка v по наличию ионного следа S, его интенсивности δ_s и длительности свечения $\tau_s \approx 0{,}1\sqrt{I}$ (поскольку сила света I пропорциональна $\sim v^3$). Наиболее важен способ периодического затвора (обтюратора).

Метод обтюратора состоит, как известно, в том, что перед объективом камеры помещается вращающийся диск с q вырезами. Вращение производится синхронным мотором с известным числом n оборотов в секунду; тогда ежесекундно объектив закрывается qn раз и на фотографическом изображении метеора (рис. 126) получаются перерывы (*марки времени*). Зная из базисных или иных данных линейные длины отрезков ΔL_1, $\Delta L_2 \ldots$ и соответствующий отрезок времени $\Delta\tau = \frac{1}{qn}$ *сек*, находим скорость $v = \frac{\Delta L}{\Delta\tau}$ на каждом

отрезке. Если отношение K ширины лопасти к ширине выреза мало́, то в ярких местах, особенно со следом, перерывы не выйдут; при $K=3:1$ время выдержки уменьшается втрое против нормы и путь метеора получается четкообразным, что удобно для измерений, хотя в перерывах детали метеора будут отсутствовать. При большом qn ($\geqslant 100$ *гц*) хорошо прослеживается скорость в конце пути. Иногда

Рис. 126. Велограмма спорадического метеора 13 августа 1953 г. с 60 перерывами (фото И. С. Астаповича, ААЛ). Увеличение с негатива 24×36 *мм*.

предлагалось применять вибрирующую камеру (рис. 57) или фотографировать через зеркало Пиккеринга (рис. 56), но измерения получаются менее точными, хотя можно снимать вдвое более слабые метеоры. Теперь метод обтюратора является основным.

§ 163. Астрономические методы составляют третью группу. Здесь возможны следующие методы.

1) Нахождение гелиоцентрической скорости по периоду обращения потока:

$$v_h = v_t \sqrt{\frac{2}{r} - \frac{1}{P^{\frac{2}{3}}}}.$$

Впервые метод применен к Леонидам (см. выше).

2) Метод суточной вариации часовых чисел использует формулу Гершеля — Ньютона:

$$n_h = n_{h0}\left(1 + \frac{v_t}{v_h}\cos z_R\right),$$

но так как близ горизонта метеоры не видны, а их высоты расположены в пределах H_1 и H_2, то Гофмейстер нашел, что при пределах $H=$

$=60-140$ *км* максимум n_h будет не при $z_R=0°$, а при $z_R=6°{,}5$. Для учета зенитного притяжения он вводит в формулу Н. М. Штауде эмпирическую поправку с численными параметрами $a=0{,}138$ и $n=4$; тогда

$$n_h = K\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{v_h}{v_t}+\cos z_R\right)^2 + a\cos\frac{z}{n}\right]. \qquad (56)$$

При $v_h=v_t$ и изменении z_R от 0 до 90 и 180° относительное число метеоров составит 3,7, 1,7 и 0,1; при $v_h=1{,}5v_t$ оно будет соответственно 9,6, 3,7 и 0,5, а при $v_h=2{,}0$ соответственно 14,2, 6,4 и 1,7. Из наблюдений 1909—1921 гг. Гофмейстер нашел $v_h=2{,}4v_t$, ряды Кувье-Гравье и Шмидта дали $v_h=2{,}2v_t$. Наблюдения Гофмейстера под тропиками в 1929 г. при $z=38-144°$ дали для отношения v_h/v_t в первом полугодии 3,2, во втором — 2,0, т. е. гипотеза постоянства v_h не подтвердилась. Мало помогла и «физическая теория суточной вариации» Хоппе (1938 г.). Годовой ход часовых чисел в южном полушарии (Мак-Интош, 1937 г.) дал также осенний максимум вместо весеннего, т. е. не оправдалось предположение о равновероятности направлений, что делает метод неприменимым.

3. Метод зенитного притяжения. Напишем формулу Скиапарелли

$$\operatorname{tg}\frac{\Delta z}{2} = \frac{v_g' - v_g}{v_g' + v_g}\operatorname{tg}\frac{z_R}{2}; \qquad v_g' = +\sqrt{v_g^2 + 2gp}. \qquad (57)$$

Здесь два неизвестных v_g' и v_g, которые можно найти, определив из наблюдений z_R и Δz. Но так как истинного радианта мы не видим, а наблюдаем изменение $\Delta z_2 - \Delta z_1$ за время $t_2 - t_1$, то решение задачи достигается последовательным приближением. Хотя идея была высказана Хардкестлом еще в 1911 г., но использована не была и В. А. Мальцев и Мак-Интош через 20 лет открыли метод вновь [423, 443]. Они предлагали одновременно наблюдать положение радианта в разных полушариях Земли, тогда Δz суммируется. Автор [318] определил геоцентрическую скорость Драконид 9 октября 1933 г., используя изменение z_R от 29 до 48°, при этом относительное смещение радианта составило около 1°,5 к зениту. Для произвольных v_g составим такой расчет:

v_g	37,0	25,5	17,3	13,4 *км/сек*
Δz_1	+1°,1	+2°,2	+4°,5	+6°,7
Δz_2	+0°,7	+1°,2	+2°,5	+3°,8
$\Delta z_2 - \Delta z_1$	−0°,4	−1°,0	−2°,0	−2°,9

Наблюденному $\Delta z_2 - \Delta z_1 = -1°{,}5$ соответствует $v_g=21$ *км/сек*. Этим же приемом в Ашхабаде в 1950 г. была найдена скорость v_g δ-Аквариды [416]. Наилучший результат дают медленные молодые потоки с четким радиантом, в частности кульминирующие в зените, где $\Delta z_1=0°$.

4. Метод суточного смещения. Суточное смещение радиантов обнаружил Вейсс в 1868 г., теоретическое объяснение ему дал в 1888 г. И. А. Клейбер, обнаруживший на примере Персеид, что в течение шести недель видимости этого потока разность долгот радианта l' и апекса A остается постоянной. В зависимости от v_h и от элонгации радианта от Солнца суточное смещение Δ будет меняться. Например, при $l'-\odot=210°$ для параболы $\Delta=+0°{,}65$, для окружности $+0°{,}98$ (при $v_h=42$ и 30 *км/сек*). Происходит это из-за того, что Земля проходит семейство орбит с общим фокусом и большой осью. В 1880 г. Ниссль вычислил таблицу для нахождения v_h по Δ. В зависимости от широты b имеем для Δ:

Скорость v_h	$\sqrt{2}\,v_t$, парабола				$2v_t$, гипербола			
Аргумент $l-\odot$	90°	150°	210°	270°	90°	150°	210°	270°
Широта $b=0°$	∞	0,09	0,65	∞	0,50	0,13	0,33	0,43
30	∞	0,96	0,76	∞	0,51	0,34	0,39	0,45
60	∞	1,76	1,23	∞	0,52	0,51	0,49	0,50
90	∞	∞	∞	∞	0,53	0,53	0,53	0,53

Например, δ-Аквариды 10—17 июля дают при долготе Солнца $\odot=140°$, $l-\odot=166°$ для $v_h=\sqrt{2}v_t$ и $v_h=v_t$ — теоретическое смещение $\Delta=+0°{,}2$ и $+1°{,}0$, тогда как наблюдаемое $\Delta=+0°{,}8$ (по «Основному каталогу метеорных радиантов XIX столетия» [338]). Отсюда получается, что орбита этого потока — слабо вытянутая эллиптическая. Для сотни малых потоков в Ашхабаде было найдено Δ и определен характер орбиты. В среднем $\Delta\approx+1°$, что в массе соответствует короткопериодическим орбитам с $v_h\sim30$—35 *км/сек*.

5. Метод суточной аберрации. В зависимости от элонгации радианта ε_E от точки востока E, линейной скорости суточного вращения наблюдателя $v_e\cos\varphi$ и скорости v_g метеора имеем смещение ΔA радианта к точке E, даваемое теорией

$$\operatorname{ctg}\Delta A=\operatorname{ctg}\varepsilon_E\left[\frac{v_g\sec\varepsilon_E}{v_e\cos\varphi}-1\right]. \qquad (58)$$

Наблюдая положение радианта в течение ночи, находим $\Delta A_2-\Delta A_1$, как в методе зенитного притяжения. Однако даже при малом $v_g=16$ *км/сек* и при кульминации на экваторе ($E=90°$, $\varphi=0°$) ΔA очень мало (1°,7), т. е. порядка площади радианта. Кроме того, необходимо учитывать еще Δz. Поэтому проще обратить задачу, вычислить эфемериду радианта для разных v_g (рис. 106) и сравнить ее с наблюдениями.

§ 164. Поправки скорости. Мгновенная скорость метеора непостоянна, как из-за гравитационного воздействия Земли, так и из-за того факта, что метеор теряет энергию на излучение, а значит, теряет свою скорость. Таким образом, происходит изменение скорости из-за земного притяжения и сопротивления воздуха. Суточная и годичная

аберрации также оказывают свое действие, таким образом, наблюдаемая «атмосферная» скорость v является сильно искаженной и требует введения соответствующих поправок.

1. Поправка за сопротивление воздуха. Учитывая сказанное в гл. 12 о поправках радианта, отметим, что наиболее просто получить значение неискаженной доатмосферной скорости v_0 по ее значению в первой стадии полета, пока торможение практически незаметно. Приведем пример. Из радианта малого потока Цигнид (кажущийся фоторадиант $\alpha=286°34'$, $\delta=+41°49'$, 1950,0) в 20 ч. 04 м. миров. вр. 10 августа 1950 г. пролетел метеор. Базисные наблюдения в Ашхабаде и Фирюзе (25 *км*) на пути $L=17{,}5$ *км*, пройденном за время $\tau=0{,}70$ *сек*, дали на разных высотах такие значения v (вообще типичные):

H, *км* . . .	100,0	99,0	98,0	97,0	96,0	95,0	94,0
v, *км/сек* .	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,6	26,4
H, *км* . . .	93,0	92,0	91,0	90,0	89,0	88,0	
v, *км/сек* .	25,9	25,3	24,5	23,5	22,5	21,5	

Отсюда видно, что потеря скорости стала заметной ниже $H=95$ *км* и что доатмосферная скорость $v_0=26{,}7$ *км/сек*. Если же отмечена скорость лишь в конце пути, где она быстро падает, то тогда v_0 установить нельзя. Скорость v_0 будем называть *исправленной* за сопротивление (рис. 127), как и соответствующий ей исправленный радиант. Около 140 таких скоростей получено за 1952—1954 гг. только камерами Супершмидт; ныне их около 6000. Практически $v\cong v_0e^{-KL}$.

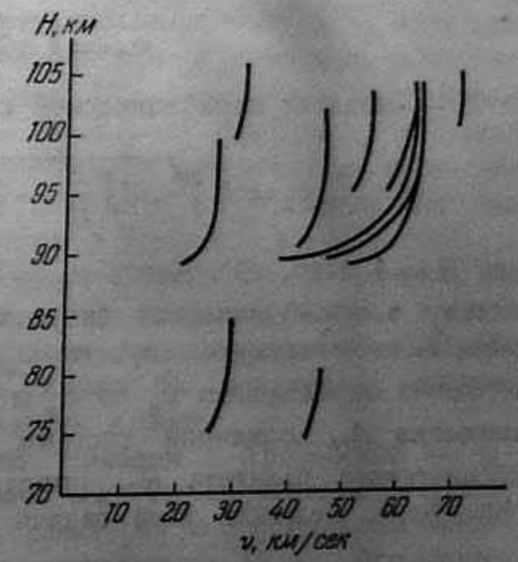


Рис. 127. Потеря скорости некоторых метеоров по фотографическим наблюдениям в Ашхабаде в 1951—1953 гг. Для быстрых метеоров начало торможения заметно с высоты 100 *км*, для медленных ниже, для телеметеоров должно быть еще ниже.

2. Поправка за притяжение Земли $\Delta v=v_g'-v_g$, где v_g' дается известной формулой механики (57). Здесь надо брать $v_g'=v_0$, тогда v_g будет *топоцентрической скоростью*, соответствующей *топоцентрическому радианту*. Обычно в каталогах радиантов из-за неизвестности v_0 эта скорость не дается; она определяется при обработках наблюдений болидов и фотографических наблюдений.

3. Поправка за суточную аберрацию. Значение v_0 искажено влиянием скорости наблюдателя $v_e\cos\varphi$. Из треугольника

скоростей находим

$$v_0' = \frac{v_0 \sin \varepsilon_E}{\sin \varepsilon_E'} = \frac{v_e \cos \varphi \sin \varepsilon_E}{\sin (\varepsilon' - \varepsilon)}; \qquad \Delta v = v_0' - v_0. \tag{59}$$

Здесь штрихом обозначены исправленные значения v_0 и элонгации ε_E. Из-за аберрации неисправленный радиант лежит ближе к точке востока, поэтому $\varepsilon_E < \varepsilon'_E$. Найденная скорость $v_g = v_g' + \Delta v$ является *геоцентрической*; она соответствует геоцентрическому радианту.

4. Поправка за годичную аберрацию дается формулами (8) гл. 12, откуда по v_g и элонгации ε_A геоцентрического радианта от апекса находится *гелиоцентрическая скорость* v_h, соответствующая гелиоцентрическому (истинному) радианту.

В результате мы освобождаемся от того, что исследователь оказывается на движущейся, вращающейся и притягивающей планете, окруженной плотной атмосферой, в которой быстро гасятся скорости метеорных тел.

§ 165. Космическая скорость. Предположим, что метеорное тело движется по гиперболе. Тогда, выходя за пределы сферы притяжения Солнца, оно будет иметь скорость относительно Солнца:

$$v_* = \sqrt{v_h^2 - 2v_t^2}, \tag{60}$$

где $2v_t^2$ — квадрат параболической скорости ($\sim 1771{,}32$ *км*^{2} *сек*$^{-2}$), а

$$v_t = k\sqrt{M\left(\frac{2}{R} - 1\right)} = 29{,}76 \text{ км/сек}$$

(при $R = 1$ астр. ед). Когда $v_* = 0$, то тело попадает в солнечную систему с параболической скоростью $v_h = \sqrt{2}v_t$. Для того чтобы найти *галактическую скорость* v_G по v_h, надо решить задачу, аналогичную определению v_h по v_g и ε_A, причем требуется знать апекс движения A_G солнечной системы и элонгацию ε_G от этого апекса космического радианта R_*, определяемого направлением асимптоты гиперболы. Решение этой задачи дано Нисслем еще полвека назад.

§ 166. Результаты изучения скоростей. 1) Визуальные данные. В результате критического рассмотрения визуальных данных более чем за 100 лет Портером и Мак-Интошем установлено, что многолетние ряды наблюдений Деннинга, Кинга и некоторых других наблюдателей имеют удовлетворительную точность. Сравнение 384 определений высот по Деннингу с 218 независимыми определениями Британской астрономической ассоциации показало разницу в средней высоте, дающей L и v, всего в 0,16 *км* [442]. Еще

в 1913 г. сравнение 75 траекторий, независимо вычисленных Деннингом [430] и Гершелем, показало разницу в H_1 на 6,4 *км*, в H_2 на 4,6 *км*, в L на 7,6 *км* и в v на 4,6 *км/сек* для одного определения. По Мак-Интошу 165 скоростей каталогов Деннинга для известных потоков дали:

Поток	Визуальная скорость	Истинная скорость	Разница	n	Примечания
Квадрантиды .	39,9 *км/сек*	37,7 *км/сек*	+2,2	18	Радиоопределения
Лириды . . .	54,7	48,4	+6,3	10	Орбита—парабола
Персеиды . .	61,3	62,2	−0,9	92	Эллипс, 121 год
Ориониды . .	66,2	66,1	+0,1	7	—
Леониды . . .	75,7	72,2	+3,5	29	—
Геминиды . .	37,8	35,5	+2,3	9	Радиоопределения
			+2,2	165	

До какой сравнительно высокой точности можно довести визуальные наблюдения, мы уже видели из сопоставления скоростей 299 потоков, опубликованных еще в 1949 г. [424] по ашхабадским данным с радиоскоростями, найденными в Канаде и в Англии и опубликованными в 1954 г. (рис. 136). Как известно, визуальные скорости ряда потоков (Квадрантиды, δ-Акватиды, Виргиниды, Скорпиониды, Геминиды и др.), найденные в Ашхабаде в 1942—1945 гг., впоследствии были подтверждены инструментально. Около 57% всех скоростей, по определению автора, относятся к поточным метеорам, остальные — к спорадическим. Менее 1% оказались «скоролетами» с видимой угловой скоростью ω в 1,5—2 раза выше обычной. Если бы они пролетали на высоте обычных метеоров, то такое значение ω соответствовало бы скорости $v \approx 90$—120 *км/сек*. Как оказалось из базисных работ, выполненных в Ашхабаде в 1947—1948 гг., в ряде случаев высоты таких метеоров были очень низкими, что давало у «скоролетов» обычные линейные скорости. Однако в некоторых случаях «скоролеты» проходили на высотах 100—130 *км*. Таким образом, немногие из них имели реально очень большие линейные скорости, порядка 100 *км/сек* и более.

Из наблюдений с вибрирующим зеркалом в Аризонской экспедиции Эпик [448] нашел, что подчас даже телескопические метеоры бывают настолько быстрые, что их траектория не искривляется вибрацией и кажется прямолинейной даже при частоте 30 *гц*. Визуальные скорости телеметеоров, как оказывается, распадаются на две группы [173]; одна составляет продолжение ряда обычных метеоров, а другая дает линейные скорости на порядок ниже. Можно думать, что она соответствует группе низких телескопических метеоров, обнаруженных автором на высотах 40—50 *км*. Далее, имеются указания, что в некоторых случаях возможно обнаружить быстрые метеоры, даже слабые и телескопические, на высотах 140—160 *км* (базисные определения в Ашхабаде в 1947—1948 гг.). В. А. Мальцев

в 1933 г. [441], Эпик в 1935 г. [448] и Мак-Интош в 1943 [442] на диапазоне $v = 16 - 64$ *км/сек* обнаружили систематическую разницу высот и скоростей поточных и спорадических метеоров; по Мак-Интошу, у метеоров +1,5 вел. она для H_1 составляет +6,6 *км* и для H_2 +3,2 *км*, а у метеоров —5-й вел. даже +4,8 *км* и +12,7 *км*; для скоростей среднее гармоническое значение v 102 поточных метеоров равно 57,7 *км/сек*, а для 437 спорадических метеоров только 35,7 *км/сек*, болиды же дают 59,8 и 30,4 *км/сек* (английские каталоги). Скорости болидов в обоих случаях меньше из-за торможения. Но при одинаковых скоростях высоты H_1 болидов на 5 *км* выше, а H_2 на 10 *км* ниже, чем высоты метеоров. У отдельных потоков (Драконииды 1946 г. в Канаде, Цигниды в августе 1950—1953 гг. в Ашхабаде) высоты не соответствуют скоростям, как если бы метеорные тела этих потоков состояли из более рыхлого материала.

Чтобы нагнать Землю, метеоры должны иметь $v_h > 30$ *км/сек*, тогда как встретить Землю тело может при любой v_h, даже равной нулю или отрицательной (направленной от Земли, при условии $|v_h| < v_t$), поэтому среди встречных метеорных тел преобладают тела с малыми гелиоцентрическими скоростями, а среди догоняющих — с большими. Это хорошо видно на каталоге 611 болидов Нисля — Гофмейстера [365] и в последнее время подтверждено «апекс-экспериментом» (Англия). По этой же причине число метеоров со следами (т. е. с $v_g > 47$ *км/сек*) под утро гораздо меньше, чем их было бы при равновероятном распределении векторов v_h (Ашхабад, 1943).

2. Фотографические данные. Уже к 1954 г. во всем мире имелось около трехсот фотографически определенных скоростей. Часть из них, полученных в начале XX в. и обработанных без учета ошибок неодновременности, по качеству не превышает плохих визуальных определений. Но с тех пор, как впервые в 1932 г. в СССР на это было обращено внимание [95], точность возросла до 1—2% и были получены важные результаты. Прежде всего выяснилось, что гиперболические скорости встречаются редко; были найдены сравнительно точные орбиты некоторых потоков (Тауриды в 1939 г., Уиппл; Геминиды в 1947 г., Уиппл; Квадрантиды 1952 г., Яккиа). Были подтверждены визуальные данные о торможении j метеоров в атмосфере, в частности, в Чехословакии в 1951 г. найдены значения $j \geqslant 100$ *км/сек*^{2}, выведенные впервые визуально в 1946 г. в Ашхабаде (см. ниже, гл. 22).

Очень ценные результаты начали давать фотографии с камерами Супершмидт. Как оказалось, слабые метеоры испытывают непомерно большое торможение по сравнению с яркими метеорами такой же начальной скорости. Благодаря большой светосиле камер, с 1954 г. удалось не только фотографировать яркие метеорные следы, но и находить скорость их дрейфа. Для многих метеоров получены

фотографические радианты и скорости, позволившие вычислить их орбиты. При 25 и более марках времени точность доходит до 0,1—0,3%.

Новый материал по скоростям начали давать автоматическая станция в Ашхабаде (с 1955 г.) и метеорный патруль в Сталинабаде из многих камер с объективами «Уран 9» (с 1956 г.). В Ашхабаде в 1956 г. пущен «быстроходный» метеорный патруль, дающий снимки

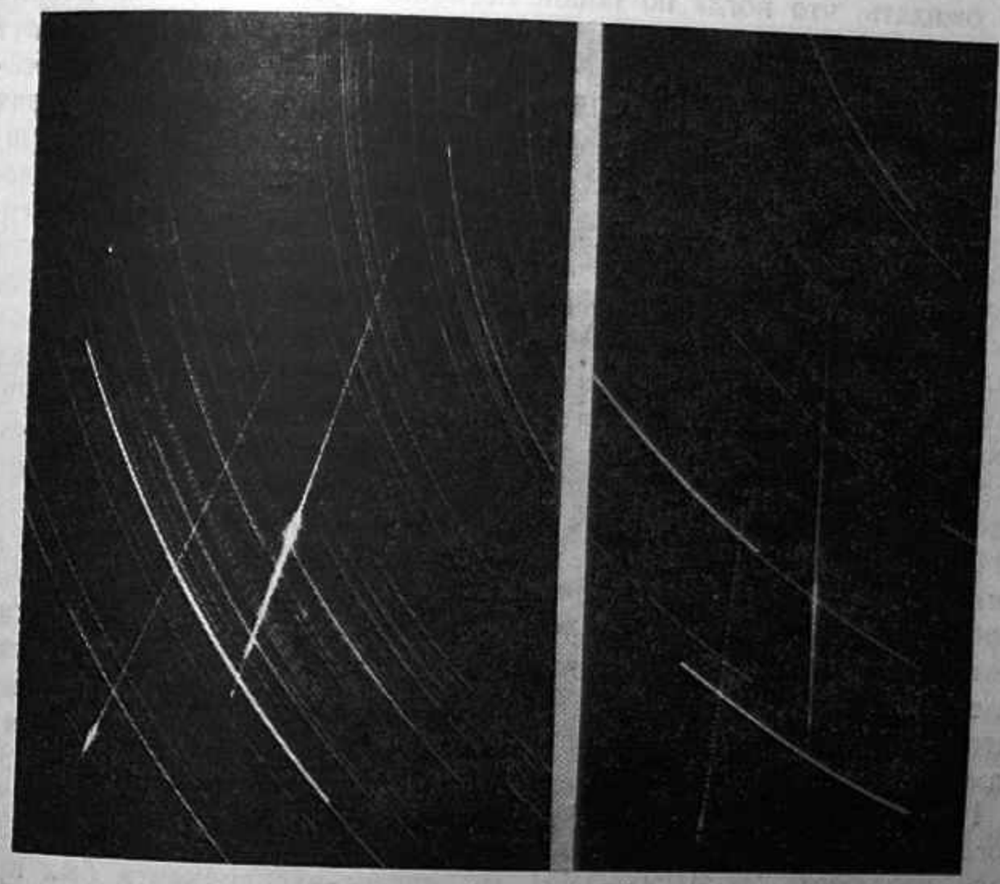


Рис. 128. Базисные фотографии двух ярких метеоров 12 августа 1956 г. Правые фотографии получены с «быстроходным» обтюратором, давшим 230 перерывов (ААЛ).

метеора с выдержкой 0,0025 *сек* через каждые 0,0074 *сек* (см. рис. 128). На некоторых метеорах получается до 300 перерывов, что позволяет очень точно измерять скорость и торможение.

Хирозе и Томита близ Токио метеорным патрулем определили в 1955 г. скорость Квадрантид по шести метеорам ($v_h = 38{,}7$ *км/сек*, $n = 6$). В Чехословакии за 1951—1953 гг. метеорными патрулями в Ондржейове, Меживрatах и Высоком Хлумце получены скорости 40 поточных и 20 спорадических метеоров. Л. А. Катасев и А. К. Соснова в Сталинабаде, А. П. Саврухин и Я. Ф. Садыков в Ашхабаде опубликовали десятки данных о фотоскоростях [259, 351, 426].

3. Радиоскорости метеоров определяются с 10 октября 1946 г. Сводка 1873 английских и 11 083 канадских определений на 1954 г. дана Миллманом (рис. 124); она содержит распределение скоростей (без направлений). Точность радиоопределения v для одного метеора $\sim 5\%$. Оба ряда отлично согласуются друг с другом, показывая наличие двух максимумов частот на 37 и 61 *км/сек*. Следовало ожидать, что когда по новой методике будут получены данные о направлениях, элонгации радиантов от апекса тоже должны будут дать на кривой распределения соответствующие максимумы. Это действительно подтвердилось в 1957 г. Комбинация локаторов, дающих положение радиантов, с приборами, определяющими скорость, пригодна для крупных потоков. В общем радиометодами были определены скорости Драконид, Квадрантид, γ-Акварид, δ-Акварид, Персеид, Ариетид, Таурид и Геминид, не говоря о шести крупных дневных потоках; некоторые из них оказались теми же «ночными» потоками (как, например, Ариетиды, δ-Аквариды и Тауриды), но встречающими Землю с дневной стороны, в другом узле орбиты (см. § 131). γ-Аквариды, обычно видимые перед рассветом, оказались очень активными в мае — июне в утренние часы и были первым дневным потоком, открытым в 1947 г. Ежегодно с 1947 г. проводилось уточнение радиантов и скоростей. К 1954 г. обнаружилось из сравнения с фотографическими определениями, что радиоскорости систематически немного завышены (на 4 *км/сек*). Поток Геминид оказался самым короткопериодическим из исследованных (1,65 года). Поток Урсид, внезапно появившийся 22 декабря 1945 г. по наблюдениям в Ашхабаде и в Скальнате Плесо, в 1947—1949 гг. наблюдался радиометодами в Англии; была установлена его связь с кометой Туттля I. Измерения скоростей в направлении на апекс велись в Англии в 1948 и 1949 гг., на антиапекс — в 1950 г. Гиперболических скоростей могло оказаться не более 1%; среди догоняющих метеоров преобладали медленные. В 1950—1951 гг. «апекс-эксперимент» был продолжен с охватом телеметеоров до 8 величины включительно. Всего было получено 1095 радиоскоростей, из них лишь семь ($0{,}7\%$) бесспорно гиперболических. Почти параболических скоростей оказалось 10%; остальные орбиты были все эллиптические с периодом около двух лет. Замечательных успехов по определению радиоскоростей дифракционным методом добился Б. Л. Кащеев (Харьковский политехнический институт); с октября 1957 г. он получает по 150—250 скоростей в час на волне 8 *м* в утренние часы; до февраля 1958 г. 15 скоростей ($0{,}75\%$) оказались явно гиперболическими.

ГЛАВА 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

§ 167. Введение. Методика определения орбит в настоящее время достаточно разработана трудами Клейбера, Ниссля и других ученых. Введем основные определения.

Видимой траекторией метеора на сфере мы называем отрезок его пути λ между точками появления A и исчезновения B, выраженный обычно в градусной мере. *Истинная траектория* есть отрезок L его пути в пространстве между соответственными точками A и B в земной атмосфере. Под *элементами траектории* будем подразумевать такие основные величины, по которым можно найти остальные, а именно, H_1, H_2, географические координаты точек $A'(\varphi_A, \lambda_A)$ и $B'(\varphi_B, \lambda_B)$, или H_2, L, z_R и $B'(\varphi_B, \lambda_B)$ или H_2, z_R, a_R и $B'(\varphi_B, \lambda_B)$. Отрезок $A'B' = L'$ есть *проекция* истинной траектории на земную поверхность, с которой траектория образует угол $i = 90° - z_R = h_R$. Если нельзя пренебрегать кривизной Земли, то значение i или z_R удобнее относить к точке B'. В случае плоской Земли очевидно соотношение $L \cos z_R = H_1 - H_2$. Таким образом, чем круче падение, тем короче путь L. Практически L можно считать отрезком прямой, кроме особых случаев (см. гл. 30). Траектория метеора относительно наблюдателя называется *атмосферной* или *топоцентрической*, относительно центра Земли — *геоцентрической*, по отношению к Солнцу — *гелиоцентрической* траекторией (орбитой).

§ 168. Геоцентрические траектории. Метеорное тело с нулевой начальной скоростью относительно Земли под влиянием ее притяжения на расстоянии ρ от центра Земли будет иметь скорость $\sqrt{2g\rho}$. На высоте $H = 100$ *км* эта скорость будет на $\frac{H}{2\rho} = 0{,}8\%$ меньше, чем на поверхности Земли. Примем по А. А. Изотову (1950 г.) на широте $\varphi = 45°$ $g = 9{,}793$ *м/сек²* и $\rho = a(1 - \alpha \sin^2 \varphi) = 6378{,}2\left(1 - \frac{1}{298{,}3}\sin^2 \varphi\right) = 6367{,}6$ *км*; тогда $v_\varphi = \sqrt{2g\rho} = 11\,161$ *м/сек*, а на $H = 100$ *км* $v_p = 11\,073$ *м/сек*. При меньшей скорости движения орбиты относительно Земли будут эллипсами, а при $v_k = \sqrt{g\rho} =$

$= 7831$ *м/сек* орбита будет окружностью (на $H = 100$ *км* с периодом обращения около 1,5 часа). В системе Земля — Луна — Солнце эллиптических орбит относительно Земли за счет захвата может быть по И. А. Клейберу 1 : 2000, а по В. Г. Фесенкову, учитывающему тормозящую роль атмосферы, даже 1 : 700 от всех орбит. Так как основная масса метеорных тел имеет начальную скорость относительно Земли $v_0 > 0$, то $v_g' > v_p$, т. е. геоцентрические скорости превосходят параболический предел. Поэтому геоцентрические орбиты будут гиперболами, а наблюдаемые длины L — отрезками дуг гипербол. От сопротивления воздуха в конце полета метеора v падает и траектория может стать дугой эллипса; таким образом, эксцентриситет траектории непрерывно убывает от $e > 1$ до $e < 1$. Торможение из-за сопротивления воздуха на нижнем участке траектории гораздо сильнее, чем увеличение Δv скорости от притяжения Земли (даже при $\tau = 9$ *сек* и вертикальном падении $\Delta v = +88$ *м/сек*). При горизонтальном полете земное притяжение за 1 *сек* отклонит самый медленный ($v = 11{,}1$ *км/сек*) метеор на 4,9 *м* или на $\Delta = 1'{,}5$ от начального направления. Исследования фотографий очень длинных метеоров (Фишер и Г. Димитров, 1930; П. Ф. Ситников, 1939) не дали никаких заметных уклонений Δ от прямолинейности. Отклонение Δ растет, как квадрат τ, поэтому только для очень долго летящих горизонтально метеоров оно может наблюдаться, например, при $L = 150$ *км*, $\tau = 10$ *сек*, $\Delta = 0°{,}2$.

§ 169. Незамкнутые траектории. При полете метеора параллельно земной поверхности может случиться, что зенитное притяжение Δz окажется меньше кривизны Земли $\psi = \frac{L'}{\rho} 57°{,}3$. Тогда, пройдя перигей, метеорное тело начнет удаляться от Земли, что наблюдалось не раз у болидов. Если при этом геоцентрическая скорость v_g была параболическая, то направление на геоцентрический радиант есть направление главной оси параболы, т. е. на 180° отличается от направления из центра Земли на перигей, и радиант лежит примерно на 90° (!) под горизонтом наблюдателя. В случае эллиптической скорости понятие геоцентрического радианта вообще отпадает, как, например, для искусственного спутника Земли. Только для обычных гиперболических геоцентрических траекторий радиант определяется направлением асимптоты.

Интеграл живых сил дает возможность найти величину большой оси обычных геоцентрических траекторий:

$$v_g^2 = v_k^2 \left(\frac{2}{\rho} - \frac{1}{a} \right).$$

При $v_g = 11{,}1$ и 72 *км/сек* $a = \pm\infty$ и $-0{,}0129$ соответственно. Параметр орбиты $p = \rho^2 \left(\frac{v_g}{v_k} \right)^2$ при этом составит от 2 до 81 земных радиусов, а эксцентриситет $e = +\sqrt{1 - \frac{p}{a}}$ от 1 (парабола) до 80. Таким образом, геоцентрические траектории метеоров — сильно распрямленные гиперболы. Например, если метеорное тело имеет $v = 60$ *км/сек* и перигей на $H = 100$ *км*, то появившись на высоте $H = 125$ *км*, оно пройдет путь 570 *км* до перигея и еще столько же после него; тогда $L = 1140$ *км*, $\tau = 19{,}0$ *сек*, а траектория изменит свое первоначальное направление всего на 0°,1; угол между асимптотами будет равен тогда 179°,9 (В. Г. Фесенков).

Исправив положение наблюдаемого радианта и значение атмосферной скорости за сопротивление воздуха, вращение и притяжение Земли, мы получаем геоцентрическую скорость v_g и ее направление. Этот вектор есть результат геометрического сложения вектора v_t скорости Земли и гелиоцентрической скорости v_h метеорного тела. Знание этого последнего вектора дает возможность, как известно, найти гелиоцентрическую орбиту.

§ 170. Общие соображения. Движение всякого тела под действием центральной силы согласно законам динамики точки определяется системой трех дифференциальных уравнений второго порядка. Их интегрирование вносит шесть произвольных постоянных. Если движение точки происходит в солнечной системе под действием центральной силы — притяжения Солнца, то знание вектора скорости v_h точки и ее расстояния r от Солнца в какой-либо момент T необходимо и достаточно для определения положения в любой иной момент. Исключая время t из уравнений движения, мы получаем, как известно, уравнение траектории. Так как сила тяготения пропорциональна $\frac{1}{r^2}$, то в данном случае траектория является одним из конических сечений — гиперболой, параболой, эллипсом или окружностью. Влиянием других тел солнечной системы мы пренебрегаем, поэтому наша орбита является *оскулирующей* на момент T (т. е. соприкасающейся в момент T с реальной орбитой). Произвольные постоянные интегрирования определяются из наблюдений и в астрономии называются *элементами орбиты* (рис. 129). Так как движение точки происходит в одной плоскости P, проходящей через Солнце, то для определения положения этой плоскости относительно плоскости эклиптики Q нужно знать две величины: угол *наклонения* i к этой плоскости Q и ее ориентировку — угол *линии узлов* $\Omega\curlyvee$ с начальным направлением в точку весеннего равноденствия Υ, задаваемый *долготой восходящего узла* Ω. В плоскости P форма конического сечения определяется *эксцентриситетом* e, его размер — *большой полуосью* a и ориентировка оси орбиты относительно направления на точку Υ — *аргументом перигелия* ω. Эти пять элементов геометрические: они полностью определяют орбиту (что иногда достаточно), но еще не говорят о положении тела на орбите. Это положение определяет

шестой кинематический элемент — момент T_0 *прохождения перигелия* П или его положение на орбите в эпоху T, задаваемое *средней аномалией* M. Зная M в эпоху T, мы по *среднему суточному движению* n находим ее значение для заданного момента, а затем,

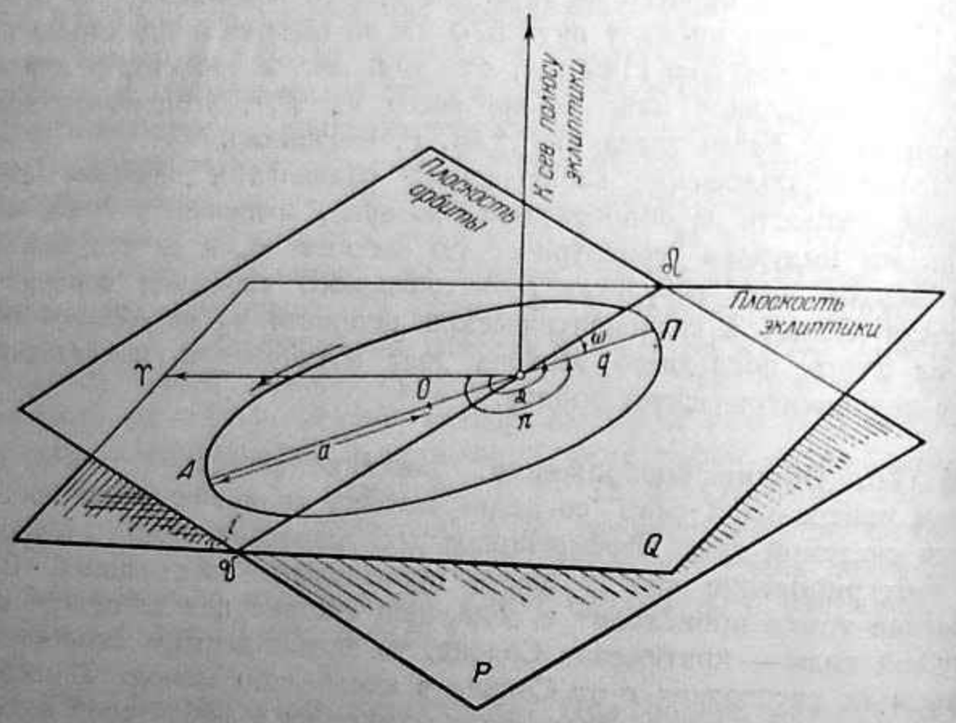


Рис. 129. Элементы орбиты метеорного тела.

решая уравнение Кеплера, находим *эксцентрическую аномалию* E и затем *истинную аномалию* ϑ. Соответствующие выражения имеют вид:

Среднее суточное движение

$$n = \frac{2\pi}{P} = \frac{k\sqrt{M_\odot}}{a^{\frac{3}{2}}} = \frac{0{,}017202}{a^{\frac{3}{2}}}; \qquad \frac{1}{k\sqrt{M_\odot}} = 58{,}12, \tag{61}$$

если a выражено в астрономических единицах, P в средних сутках, массы в массах Солнца. Удобно также выразить k, исходя из формулы круговой скорости $v_{\text{кр}}^2 = \frac{k^2(M_\odot + m)}{a}$ и положив $a = 1$, $M_\odot = 1$, $m = 0$, тогда $k = 29{,}77 \cdot 10^5$ *см/сек* (в системе CGS).

Средняя аномалия

$$M = M_0 + n(t - T_0). \tag{62}$$

Уравнение Кеплера

$$E - e\sin E = M, \tag{63}$$

Истинная аномалия

$$\operatorname{tg}\frac{\vartheta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\operatorname{tg}\frac{E}{2}. \tag{64}$$

Уравнение орбиты

$$r = \frac{p}{1 + e\cos\vartheta}. \tag{65}$$

Параметр орбиты

$$p = a(1 - e^2) \tag{66}$$

(для параболы $p = 2q$, для гиперболы $a < 0$ и $e > 1$, так что всегда $p > 0$).

Перигелийное расстояние

$$q = a(1 - e) = \frac{p}{1+e}. \tag{67}$$

Афелийное расстояние

$$q' = a(1 + e) = \frac{p}{1-e}. \tag{68}$$

Малая полуось орбиты

$$b = a\sqrt{1 - e^2}. \tag{69}$$

Из наблюдений мы получаем положение радианта $R'(\lambda', \beta')$, исправленное за влияние сопротивления воздуха, притяжение, вращение и орбитальное движение Земли (гл. 12). В точке встречи метеорного тела с Землей, находящейся от Солнца на расстоянии, равном радиусу-вектору Земли r, направление на радиант R' есть обратное направление касательной к орбите метеорного тела в момент встречи T (рис. 130). Скорость v_h в этот момент нами определена выше (гл. 14); она также исправлена за указанные искажения. Таким образом, вектор v_h нам известен. Элементы орбиты (рис. 129) тогда находятся при помощи следующих выражений:

Большая полуось орбиты

$$a = \frac{r}{2 - r\left(\frac{v_h}{v_t}\right)^2}. \tag{70}$$

Наклонение орбиты

$$\operatorname{tg} i = -\operatorname{tg}\beta'\operatorname{cosec}(\odot - \lambda') \quad (0° < i < 180°), \tag{71}$$

где $\odot$ — долгота Солнца; $\odot$ и r берутся из ежегодника. Элонгация $\varepsilon'_\odot$ от Солнца

$$\operatorname{tg}\varepsilon'_\odot = \pm\operatorname{tg}(\odot - \lambda')\sec i; \tag{72}$$

знак выбирается так, чтобы соблюдалось условие: $0° < \varepsilon'_\odot < 180°$. Параметр орбиты дается важнейшим соотношением:

$$p = r\left(\frac{v_h}{v_t}\right)^2 \sin^2\varepsilon'_\odot. \tag{73}$$

Тогда эксцентриситет находится из выражения

$$e = +\sqrt{1 - \frac{p}{a}}. \tag{66'}$$

Перигелийное расстояние (для параболы)

$$q = r \sin^2 \varepsilon'_\odot. \tag{74}$$

Истинная аномалия в момент встречи ϑ:

$$\cos \vartheta = \frac{P - r}{re}. \tag{75}$$

Аргумент перигелия:

$$\omega = -\vartheta \quad \text{при} \quad \beta' < 0. \tag{76}$$

Долгота восходящего узла:

$$\left.\begin{aligned} \Omega &= \odot \quad \text{при} \quad \beta' > 0, \\ \Omega &= 180^\circ + \odot \quad \text{при} \quad \beta' < 0. \end{aligned}\right\} \tag{77}$$

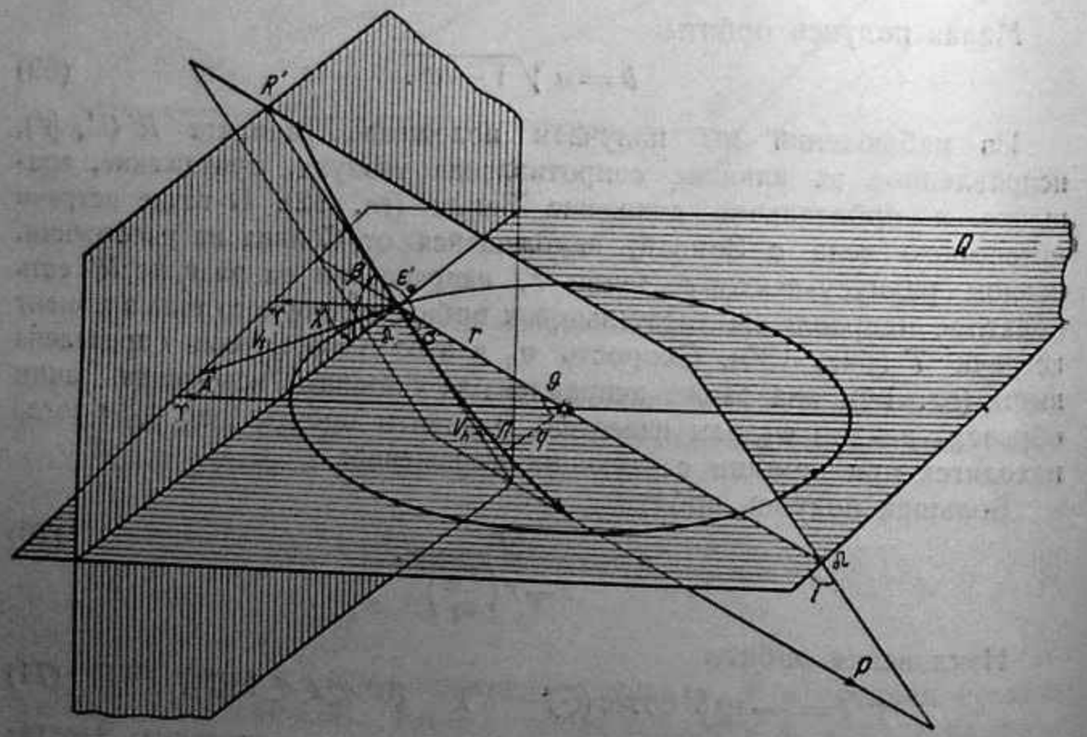


Рис. 130. Определение элементов орбиты метеорного тела.

В случае необходимости момент T_0 прохождения через перигелий находится из следующих выражений:

Для эллипса

$$T_0 = T - 58{,}12\, a^{\frac{3}{2}} (E \text{ arc } 1^\circ - e \sin E), \quad \operatorname{tg} \frac{E}{2} = \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}. \tag{78}$$

Для параболы

$$T_0 = T - 58{,}12 \sqrt{2}\, q^{\frac{3}{2}} \left[\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} + \frac{1}{3} \operatorname{tg}^3 \frac{\vartheta}{2}\right]. \tag{79}$$

Для гиперболы

$$T_0 = T - 58{,}12\, |a|^{\frac{3}{2}} (e \operatorname{sh} F - F \text{ arc } 1^\circ), \quad \operatorname{th} \frac{F}{2} = \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} \sqrt{\frac{e-1}{e+1}}. \tag{80}$$

Для гиперболы при $r = \infty$ имеем:

$$\cos \vartheta_\infty = -\frac{1}{e}, \tag{81}$$

что дает возможность найти направление асимптоты, определяющее космический радиант R_∞.

§ 171. Обратная задача. При открытии новой кометы полезно определить, сможет ли ее орбита пересечь земную орбиту. При наличии связи комет и метеорной материи в этом случае мы можем ожидать встретить метеоры, принадлежащие этой комете. Таким образом, требуется знание эпохи видимости радианта T и положения его геоцентрического радианта $R(\alpha, \delta)$. Эту задачу можно решать следующим путем.

Прежде всего, проверим возможность пересечения орбит. Оно может иметь место, очевидно, только в узлах Ω или $\mho$, если радиус-вектор кометы r' в узле близок к 1. Чтобы убедиться в этом, надо в уравнение орбиты подставить $\cos \vartheta = \cos \omega$ и параметр p. При $\vartheta > 0$ перигелий уже пройден. Практика показывает, что кометные метеоры возможно наблюдать даже при $\Delta = |r - r'| \leqslant 0{,}3$ астр. ед., так как метеорные тела могут не строго следовать по орбите кометы. Практически Δ близко к расстоянию в аппульсе (на кратчайшем расстоянии между орбитами). Пусть $\Delta = 0$. Если это точно не выполняется, то результат скажется на координатах искомого радианта $R(\alpha, \delta)$. Вычисляем скорости Земли и метеорного тела (в *км/сек*) и их отношение (полагая $M_\odot = 1$):

$$v_t^2 = k^2 \left(\frac{2}{r} - 1\right); \quad v_h^2 = k^2 \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right); \quad \left(\frac{v_h}{v_t}\right)^2 = \frac{\frac{2}{r} - \frac{1}{a}}{\frac{2}{r} - 1}. \tag{82}$$

Затем находим $\varepsilon'_\odot$ из отношения

$$\sin^2 \varepsilon'_\odot = \frac{p}{r \left(\frac{v_h}{v_t}\right)^2}. \tag{83}$$

Учитываем, что при $\vartheta > 0$ перигелий пройден и тогда $\varepsilon'_\odot > 90^\circ$. Для парабол $\sin^2 \varepsilon'_\odot = \frac{q}{r}$. Координаты истинного радианта найдутся

из соотношений:

$$\operatorname{tg}(\odot - \lambda') = \pm \operatorname{tg}\varepsilon_{\odot} \cos i, \tag{84}$$

$$\operatorname{tg}\beta' = -\operatorname{tg} i \sin(\odot - \lambda'). \tag{85}$$

Практически удобно для наглядности сделать геометрическое построение расположения орбиты. Далее находим долготу Солнца $\odot$ из формулы (77). По ежегоднику находим соответствующую ей дату (эпоху видимости потока T). Вычисляем далее $\Delta\odot$ и находим долготу земного апекса $A = \odot - 90° + \Delta\odot$. Затем вычисляем элонгации ε' и ε радиантов R' и R от апекса, введя вспомогательный угол γ:

$$\operatorname{tg}\gamma = \operatorname{tg}\beta' \operatorname{cosec}(\lambda' - A); \quad \operatorname{tg}\varepsilon' = \operatorname{tg}(\lambda' - A)\sec\gamma, \tag{86}$$

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{\operatorname{tg}\varepsilon'}{1 + \dfrac{v_t}{v_h \cos\varepsilon'}} \tag{87}$$

(знак $\cos\varepsilon$ одинаков со знаком $\cos(\lambda - A)$). Тогда координаты геоцентрического радианта $R(\lambda, \beta)$ будут определяться из формул:

$$\operatorname{tg}(\lambda - A) = \operatorname{tg}\varepsilon \cos\gamma, \tag{88}$$

$$\operatorname{tg}\beta = \sin(\lambda - A)\operatorname{tg}\gamma. \tag{89}$$

Контроль

$$\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\varepsilon \cos(\lambda - A)\sin\gamma. \tag{90}$$

Геоцентрическая скорость v_g попутно получается из

$$v_g = \frac{v_h \sin\varepsilon'}{\sin\varepsilon} = \frac{v_t \sin\varepsilon'}{\sin(\varepsilon' - \varepsilon)} \text{ (контроль)}. \tag{91}$$

Наконец, преобразуем эклиптические координаты в экваториальные $R(\alpha, \delta)$ по обычным формулам сферической астрономии. Таким образом, поставленная задача разрешена.

Идя этим путем, Е. Н. Крамер в Ашхабаде проверил все известные орбиты комет до 1950 г. Он нашел 320 случаев, когда $\Delta < 0{,}3$ астр. ед. [460], из них в 80 случаях радианты действительно наблюдались. Случайных совпадений по времени и положению здесь могло бы быть только 15%. Списки наиболее достоверных кометных радиантов были опубликованы в последнее время Е. Н. Крамером [345, 346], И. С. Астаповичем [335, 337] и др. В прошлом это делали А. Гершель, Дэвидсон, С. Г. Натансон, К. Д. Покровский и Г. А. Шайн [367] и др.

§ 172. Пример определения орбиты. Из наблюдений 1955 г. авг. 21 в момент $T = 21^h\ 27^m\ 23^s$ миров. вр. получен кажущийся радиант $\alpha = 260°00'$; $\delta = +62°46',5$ (эпоха 1950,0) и доатмосферная скорость, исправленная за сопротивление воздуха, $v_0 = 20{,}89$ *км/сек*. Для широты Ашхабада $\varphi = +37°57'$ и его долготы $\lambda = 58°21'E$ находим $z_R = 57°06'$ и часовой угол $t = +90°35'$. По формулам (7) и (6′) поправки за суточную аберрацию составляют $\Delta\alpha = +0',2$ и $\Delta\delta = -53',5$, а за зенитное притяжение $\Delta\alpha = -10°26',2$ и $\Delta\delta = -1°44',8$. Соответствующие поправки скорости $\Delta_1 v = +0{,}165$ и $\Delta_2 v = -3{,}170$ *км/сек*. Тогда для геоцентрического радианта получаем $\alpha = 249°34'$, $\delta = +60°08'$, $v_g = 17{,}885$ *км/сек*. Исправим координаты радианта за прецессию на эпоху года наблюдения 1955,0 и по обычным формулам сферической астрономии преобразуем их в эклиптические, тогда $\lambda = 205°36'$, $\beta = 78°53'$ (1955,0). Подготовим астрономические данные: из календаря $r = 1{,}0115$, $\odot = 148°00'$, эксцентриситет земной орбиты $e = 0{,}01673$, долгота перигелия Земли $\pi = 102°04',8$. Тогда поправка долготы апекса за эксцентриситет земной орбиты $\Delta\odot = \dfrac{e}{\text{arc } 1°} \cdot \sin(\odot - \pi) = +46',2$, а долгота апекса $A = \odot - 90° + \Delta\odot = 58°47'$. Находим орбитальную скорость Земли $v_t = k\sqrt{M_\odot}\sqrt{\dfrac{2}{r} - 1} = 29{,}77\sqrt{\dfrac{2}{r_0} - 1} = 29{,}42$ *км/сек*. Вычисляем элонгации по (86) и (87): $\varepsilon = 99°17'$, $\varepsilon' = 151°21'$ и по (83) $\varepsilon'_\odot = 87°40'$. Находим по (8) скорость $v_h = 36{,}82$ *км/сек* $= 1{,}251\, v_t$. По (84) и (85) координаты истинного радианта R': $\lambda' = 235°21'$, $\beta' = +28°28'$.

Приступаем к определению элементов орбиты. Наклонение по (71) $i = 28°29'$, большая полуось орбиты $a = 2{,}430$, долгота восходящего узла $\Omega = 148°00'$. Определив из (73) параметр орбиты $p = 1{,}581$, находим остальные элементы: эксцентриситет $e = 0{,}591$ и аргумент перигелия $\omega = 17°38'$, поскольку по (64) истинная аномалия $\vartheta = -17°38'$. Далее, $q = 0{,}994$. Из (78) определяем момент прохождения метеорным телом перигелия $T_0 = T + 14^d,3$ или $T_0 = 1956$ сент. $5^d\,4^h,7$. Данный метеор, принадлежащий потоку ζ-Драконид, таким образом, встретил Землю в нисходящем узле своей эллиптической орбиты ($\beta' > 0°$), имея период обращения вокруг Солнца $P = 3{,}79$ года. Встреча произошла за 14 дней до прохождения перигелия ($\vartheta < 0°$). Афелий орбиты лежит на расстоянии $q' = 3{,}86$ астр. ед., севернее зоны астероидов.

§ 173. Данные визуальных методов. Рассмотрим результаты определения орбит метеорных тел. Еще в 1839 г. в связи с первым определением орбит метеорных тел Араго заявил, что целый новый мир огромного количества маленьких частиц открылся перед нами. К 1864 г. Г. Ньютон получил правильные представления об общем характере их движения с преобладанием малых наклонений, прямых движений и концентрацией к плоскости эклиптики. Кроме того, он считал, что все метеорные тела вообще кометного происхождения. Исследуя видимое движение метеоритов, он доказал в 1888 г., что основная масса их догоняет Землю [465]. В. Пиккеринг [466], используя архив Ньютона, в 1910 г. вычислил среднюю орбиту 107 метеоритов, упавших на Землю ($a = 1$, $\Omega = 115°$, $i = 6°$, $\pi = 250°$, $e = 0{,}14$). Он считал,

что отношение числа нагоняющих тел к числу встречных составляет 3 : 1. В 1925 г. Оливье подчеркивал, что видимое преобладание прямых движений не обязательно отвечает истинному, иначе бы к утру Земля встречала гораздо больше быстрых метеоров, чем наблюдается; на это обратил внимание автор в 1942 г.: суточный ход числа метеорных следов (зависящего от скорости) можно объяснить лишь при условии резкого преобладания прямых движений.

Еще в 1943 г. в Ашхабаде были определены скорости 299 потоков методом сравнения с контролем его через ω_1 и физические методы [350]. Была обнаружена эклиптикальная связка короткопериодических орбит, дающих непрерывно в течение года медленные метеоры с радиантами на эклиптике [340]. Определены [318, 350, 421, 453, 454] геоцентрические скорости Квадрантид, δ-Акварид, Виргинид, Скорпионид, Геминид, как уже упоминалось, через несколько лет подтвержденные инструментально, остальные скорости опубликованного каталога [350] еще ждут подтверждения.

В 1891 г. Клейбер [12] опубликовал 918 параболических орбит каталога Деннинга 1889 г. (отсутствие данных о скорости не позволило найти истинные орбиты). Исследование их, произведенное Ф. Ю. Зигелем в 1939 г. [458], показало, что наблюдаемые с Земли потоки стремятся концентрироваться к земной орбите как по наклонению орбит, так и по перигелийному расстоянию. Это могло, однако, возникнуть в результате условий видимости, но привлечение физической теории метеоров (Хоппе [674, 675], Б. Ю. Левин [24] и др.) независимо подтвердило факт резкого преобладания прямых движений над обратными, так как яркость метеора очень сильно зависит от скорости. Это вносит очень сильные искажения в наблюдаемые числа метеоров, так что фактическая численность потока мало соответствует наблюдаемой.

Прямые определения орбит метеорных тел [455] показали, что распределение элонгаций ε_A видимых радиантов от апекса имеет максимумы при $\varepsilon_A = 30$—$39°$ и 60—69°, которым, как мы уже знаем (гл. 14), соответствуют особенности на кривой распределения скоростей. Таким образом, орбиты метеорных тел распадаются на две основные группы: 1) «земную», со средним значением $a \approx 1$, $v_h = 30$ *км/сек*, $e > 0{,}2$, $q \approx 0{,}8$, $q' \approx 1{,}2$ и разнообразными наклонениями i, и 2) «астероидную», со средними значениями $a \approx 2{,}8$, $v_h = 37{,}5$ *км/сек*, $e > 0{,}66$, $q \approx 0{,}9$, $q' \approx 4{,}7$ и более пологими орбитами относительно плоскости эклиптики. Имеется еще заметная третья группа орбит, почти параболических: здесь $v_h = 42$ *км/сек*, $e = 1$, $q \approx 0{,}9$, $a \approx \infty$, также с прямыми и обратными движениями. Видимое соотношение прямых и обратных движений во всех трех группах соответственно 15 : 29,30 : 38 и 103 : 23.

Следует отметить, что в течение года Земля непрерывно пересекает близэклиптикальные метеорные потоки [340]. В силу этого круглый год на эклиптике действуют многочисленные радианты, непрерывно друг друга сменяющие и даже иногда «оптически» друг на друга накладывающиеся, что ведет к дисперсии скоростей [421, 454].

В 1944 г. Портер [468] по английским данным нашел, что 298 поточных метеоров имели $v_g = 0{,}67$ параболической скорости, как и 480 спорадических метеоров.

Иногда ценные результаты дают комбинированные наблюдения: например, радиант находится из визуальных наблюдений, а скорость инструментально. В 1953 г. для Квадрантид Миллман [463] из визуальных, телескопических и одного фотографического определений получил исправленный геоцентрический радиант $\alpha = 231°{,}5$, $\delta = +51°{,}0$ (1951,0) для $\odot = 282°45'$, и геоцентрическую радиоскорость $v_g = 40{,}90$ *км/сек*, откуда нашел элементы орбиты этого потока. Из фотографических и визуальных наблюдений в Ашхабаде [456] найдена орбита ζ-Драконид, из радио- и визуальных наблюдений — орбита δ-Акварид [454].

§ 174. Данные фотографических методов. Уже в первых работах Элькина 1894—1909 гг. были получены скорости не только поточных, но и спорадических метеоров. Орбиты их вычислены не были. Первые систематические определения фотографических скоростей, начатые с 1932 г. в СССР и с 1935 г. в США, позволили к 1954 г. найти орбиты свыше 300 метеорных тел. Среди них много принадлежащих известным потокам, например, Персеидам [426], эклиптическим (δ-Аквариды, Северные и Южные Тауриды) и малым потокам (χ-Цигниды). Ряд определений относится к отдельным метеорам, не входящим в известные потоки, но данных для полной статистики пока недостаточно.

В первом приближении можно различать орбиты планетного типа с малыми эксцентриситетами e и с большими наклонениями i и орбиты кометного типа с большими a и e и умеренными i. Были проведены попытки связать их с орбитами астероидов и комет [369, 459]. Уиппл [370] доказал связь Таурид с кометой Энке — Баклунда, Л. А. Катасев [459] полагает, что то же можно считать для астероидов Аполлона и Амура, с каждой из орбит которых совпадает по две метеорные орбиты. Распределение 257 метеорных орбит, определенных фотографическим методом к 1956 г. в СССР, США и Чехословакии, из которых 90 спорадических, показывает, что больше всего значений (мода) a приходится близ максимумов распределений a у астероидов и комет. По мере перехода от астероидов через кометы к спорадическим метеорным телам моды эксцентриситетов растут от $e = 0{,}15$ через 0,6 до 0,8, а моды наклонений с $i = 6°$ и 12 до 15°.

Для практического удобства разграничения орбит планетного и кометного типа Уиппл применяет «K-критерий»

$$K = \lg \frac{a(1+e)}{1-e} - 1. \qquad (92)$$

Если $K > 0$, то орбита относится условно к кометной, если $K < 0$, то к планетной. По 25 сталинабадским наблюдениям спорадических метеоров соотношение тех и других (в процентах) равно 76 : 24, по ашхабадским наблюдениям 80 : 20, по чехословацким данным 60 : 40. Из метеорных потоков только два попадают в область $K < 0$, т. е. к астероидам. Таким образом, метеорные частицы связаны с кометами, метеориты с астероидами, телеметеоры и «микрометеориты» с зодиакальным облаком.

§ 175. Данные радиометодов. Мы уже знаем, что для отдельных крупных метеоров радиометодами можно найти атмосферную траекторию, скорость и радиант, откуда определяется орбита (впервые Мак-Кинли и Миллман в 1949 г. [312]). Радиоскорости в комбинации с визуальными или радиорадиантами позволили найти несколько орбит больших потоков (Олмонд, 1952) [291], приведенных в табл. 5, из которой видно, что большинство потоков имеет малые периоды P (от 1,5 до 7,2 лет) и большие эксцентриситеты ($e = 0{,}74 - 0{,}96$). Кроме Персеид и Квадрантид, прочие потоки имеют наклонения орбит менее 35°.

Таблица 5

Орбиты некоторых потоков метеорных тел по радионаблюдениям

Поток	Дата максимума	Радиант		v, км/сек	a	P	e	i	Ω	ω	Примечание
		α	δ								
Квадрантиды	Янв. 3	231°	+51°	40,9	3,7	7,2	0,74	70°	283°	173°	—
o-Цетиды	Май 19	29	— 3	36,8	1,3	1,5	0,91	34	238	211	Дневной
ζ-Персеиды	Июнь 8	62	+23	28,9	1,7	2,2	0,80	1	77	61	»
Ариетиды	» 8	44	+23	38,0	1,5	1,8	0,94	17	77	29	»
β-Тауриды	» 30	86	+19	31,4	2,4	3,7	0,86	7	278	245	»
δ-Аквариды	Июль 29	340	—17	40,3	1,7	2,2	0,96	27	305	154	—
Персеиды	Авг. 12	45	+57	60,5	15	60	0,93	114	140	153	—
Дракониды	Окт. 10	267	+56	22,9	3,5	6,6	0,72	31	196	172	—
Геминиды	Дек. 12	113	+32	35,3	1,4	1,7	0,89	23	261	325	—

Первые скорости поточных радиометеоров (после Драконид 1946 г.) измерили Эспиналл, Клегг и Ловелл (Геминиды 1947 г., Квадрантиды 1948 г. и первые дневные потоки в Рыбах — Тельце). В 1949 г. Эллиэтт, затем Дэвис и Гринхоу (1949—1951 гг.) продолжили эти работы. Оказалось, что иногда обычные «ночные» потоки, как, например, Тауриды 3—10 ноября; δ-Аквариды 28—30 июля и

Ариетиды 12 октября вторично встречают Землю в другом узле орбиты, идя со стороны Солнца. Они являются «дневными» потоками; это соответственно: β-Тауриды (30 июня), Ариетиды (8 июня) и ζ-Персеиды (8 июня).

Для того чтобы выяснить значения геоцентрических скоростей, английские исследователи [467] провели осенью 1948 г. «апекс-эксперимент» под руководством Ловелла: на волне 4 *м* излучение направлялось утром на восток; распределение 67 скоростей дало моду на $v_g = 60—65$ *км/сек*. Охватывались метеоры до +5 величины. Поскольку длительность τ_s падала с возрастанием v_g, то Гофмейстер указал, что этим путем гиперболические скорости ($v_g > 72$ *км/сек*) не могут быть замечены. Поэтому через год работа была повторена на $\lambda = 8$ *м*, что позволило бы получить скорости до 140 *км/сек*. Было измерено 185 скоростей, показавших такое распределение, какое было бы для параболических орбит, беспорядочно ориентированных. Затем весной 1950 г. на той же волне в интервале 17—19 час. наблюдения были проведены в направлении, дающем метеоры из антиапекса. 86 скоростей показали иное распределение: их скорости оказались гораздо меньше параболической. Таким образом, либо орбиты должны были быть малыми эллипсами, либо они должны иметь малые наклонения, либо то и другое вместе. Это исследование было распространено на слабые метеоры до +8 величины. Осенью 1950 г. были измерены 335 скоростей и весной 1951 г. еще 57. Гиперболических скоростей не было найдено и распределение v_g у слабых метеоров оказалось таким же, как раньше у ярких. Основная масса наблюдений в целом относится к 4,5—7,5 вел. В 1950 г. Миллман и Мак-Кинли в Оттаве на волне 10 *м* непрерывным методом измерили свыше 11 тысяч уже упоминавшихся скоростей и нашли среди них несколько десятых процента гиперболических; аппаратура позволяла найти $v_g = 150$ *км/сек* (до +8 величины). В 1957—1958 гг. Б. Л. Кащеев в Харькове из 2000 радиоскоростей метеоров обнаружил 15 бесспорно гиперболических.

Последние английские работы по методике Дэвиса указывают на основе определения 2000 орбит, что 90% их является эллипсами с короткими периодами и разнообразными i, а остальные 10% почти параболические, близкие к эклиптике.

§ 176. Общее заключение. Сопоставляя советские и английские [468] визуальные данные, фотографические и радиофизические определения, мы видим, что все три метода независимо приводят к одному результату о движении основной массы метеорной материи по эллиптическим орбитам. Вследствие того, что определения мы можем вести только на орбите Земли, при условии $q \leqslant 1$, все орбиты с большими полуосями a автоматически будут иметь большие эксцентриситеты e, как это следует из соотношения $q = a(1 - e)$. Орбиты с большим a и умеренным e с Земли

выявлены быть не могут. Следствием условий видимости и является видимое распределение метеорных орбит в солнечной системе.

Следует отметить хотя и малый, но реальный процент гиперболических скоростей, даваемых всеми тремя методами. Такую скорость могут иметь метеорные тела не только галактического происхождения, но в отдельных случаях приобретать ее в пределах солнечной системы. Например, в земных условиях при соударении тел на астробаллистическом диапазоне получаются иногда осколки со скоростями большими, чем скорости соударившихся тел. Соударения же малых тел в солнечной системе не исключены.

ГЛАВА 16

ЯРКОСТЬ МЕТЕОРОВ

§ 177. Введение. Уже Бенценберг и Брандес в 1798 г. оценивали яркость метеоров в звездных величинах. С начала XX в., в связи с установлением шкалы звездных величин, возникло понятие нулевой и отрицательной звездной величины метеора. Стало известно, что получаемая на фотопластинке яркость метеора на много величин слабее наблюдаемой из-за разницы в длительности экспозиции метеора и звезды. В 1911 г. Герцшпрунг точно профотометрировал изменение яркости вдоль пути метеора. С 1920 г. наблюдатели начинают отмечать положение максимума яркости на траектории метеора, а в СССР в 1930 г. было указано, что кривая яркости может быть положена в основу классификации метеоров. В результате развития теории полета метеоров в атмосфере выясняется, что истинная яркость метеора зависит от его скорости и пропорциональна скорости потери энергии движения; по силе света метеора в 1938 г. были получены первые надежные определения массы. В 1947 г. такие же определения были сделаны по ионизации и было найдено, что звездная величина метеора пропорциональна интенсивности отражения радиоволны. Впервые в СССР Н. Н. Сытинской [182] в 1934 г. были заложены основы фотографической фотометрии метеоров. Впрочем, уже в 1932 г. в СССР было показано, как от видимой яркости метеора переходить к истинной, выраженной в физических единицах [472].

§ 178. Основные определения. Под *звездной величиной* m метеора мы подразумеваем логарифмическую характеристику той *мгновенной освещенности* E, которую метеор силой света I на расстоянии до него r создает в точке наблюдения на плоскости, перпендикулярной к лучу зрения. Известно, что если I выражать в *международных свечах* (*м. св*), r в метрах, а E в *люксах*, то при перпендикулярном падении лучей $E = \frac{I}{r^2}$. Источник силой света I *м. св.* испускает в пространство вокруг себя *световой поток* $\Phi = 4\pi I$ *люмен* (*лм*). Если свечение исходит от некоторой поверхности, то говорят, что она обладает *светимостью* R, выражаемой отношением светового потока Φ к площади светящейся поверхности s, т. е. $R = \frac{\Phi}{s}$.

Яркостью B светящейся поверхности называется отношение силы света в данном направлении к проекции светящейся поверхности на плоскость, нормальную к данному направлению. Обозначая площадь этой проекции через σ, получаем: $B=\frac{I}{\sigma}$. Сравнивая выражения для яркости, освещенности и светимости, находим следующие соотношения между ними:

$$B=\frac{E}{\omega}=\frac{R}{\pi}, \tag{93}$$

где ω — телесный угол, под которым видна данная светящаяся поверхность.

Единицей яркости является *стильб* (*сб*), равный яркости поверхности в 1 $см^2$, имеющей силу света в 1 *м. св.* Единицами освещенности являются: *фот*, соответствующий световому потоку в 1 люмен, приходящемуся на 1 $см^2$, и *люкс* (1 люмен на 1 $м^2$).

Для фотографии важно «количество освещения» Et, выражаемое в люкс-секундах. Шкала чувствительности фотоэмульсий ГОСТ использует пороговое количество освещения, так что, например, 180 ГОСТ означает пороговую засветку одним люксом за 1 : 180 *сек* или $^1/_{180}$ люкса в течение 1 *сек*.

Ни светимость R, ни поверхностная яркость B от расстояния не зависят *). В метеорной физике B удобно выражать в звездных величинах с квадратной минуты дуги [472]. Связь астрономической и физической фотометрических шкал устанавливается наблюдением, из которого получают значение нульпункта. Например, источник света силой в 1 *м. св* с расстояния 1 *км* имеет видимую яркость (блеск) звезды, у которой $m=+0{,}82$ зв. вел. Это дает [472] соотношение

$$\lg I=2\lg r-0{,}4\ m+0{,}327. \tag{94}$$

Например, метеор, видимая яркость которого равна блеску Сириуса ($m=-1{,}4$), на расстоянии $r=100$ *км* излучает с силой $I=77\,000$ *м. св.* Освещенность, создаваемая им на зрачке наблюдателя (если r выражать в километрах), есть

$$E=\frac{I\cdot 10^{-6}}{r^2}$$

или $2\cdot 10^{-6}$ люкса. Наоборот, измеряя E при полете болида, из сравнения с другими источниками света можно найти $I=10^6 Er^2$ *м. св.* Пусть, например, болид при $r=450$ *км* осветил землю, как полная Луна. Известно, что $E_{\leftmoon}=0{,}2$ *лк*, что при расстоянии $r=450$ *км* дает $I=40\cdot 10^9$ *м. св*; это в десятки раз превышает силу света наиболее мощных прожекторов.

*) Как ясно из § 78, употребляемый нами термин «видимая яркость метеора» не следует путать с принятым в фотометрии и приведенным выше определением яркости, которую мы здесь для определенности будем называть *поверхностной яркостью*.

В ряде случаев (падения Тунгусского, Сихотэ-Алинского и других метеоритов) *при солнечном свете* возникали «вторые тени» от предметов. Чтобы их заметить, освещенность E должна быть не менее 5% от $E_\odot$ (гл. 4) или $E\geqslant 5000$ *лк*, что при том же r дает $I=10^{15}$ *м. св.* Из формулы (94) можно видеть, что такой болид даже на расстоянии диаметра земной орбиты еще был бы виден простым глазом. С другой стороны, слабые телеметеоры в зените при $m=+16$ зв. вел. и $r=50$ *км* светят с силой $I=0{,}002$ *м. св* или впятеро слабее светлячка. Источник света в 1 *м. св* на расстоянии 1 *м* имеет $m=-14{,}2$ зв. вел. или впятеро ярче полной Луны ($m_{\leftmoon}=-12^m{,}6$ в полнолуние, в первой четверти -9^m, в возрасте 3—4 дней около -6^m). Напомним, что $m_\odot=-26^m{,}7$, для Венеры в максимуме $m=-4^m{,}4$, для Юпитера $m=-2^m{,}1$. Опыт показывает, что ночью заметные тени возникают уже от источника с $m=-6$ зв. вел., т. е. «танец черных теней» при полете болидов начинается, когда E превзойдет $0{,}5\cdot 10^{-3}$ *лк*. Освещенность от звездного неба в безлунную ночь в среднем $E=0{,}3\cdot 10^{-3}$ *лк*. Ее внезапное увеличение на 50% уже привлекает наше внимание. Однако одна «темная ночь» от другой может отличаться по освещенности в тысячу раз; в среднем дневная освещенность в 10^8 раз выше, чем ночью. Во столько же раз должна быть больше видимая яркость дневного болида, чтобы заметить создаваемую им освещенность. Формула Погсона дает разницу на $\Delta m=2{,}5\cdot\lg(10^8)=20$ зв. вел. или $m=-26$, что и соответствует около $0{,}5\ E_\odot$. Таким образом, метеоры наблюдаются на диапазоне от $+16^m$ до -26^m, т. е. 42 звездных величин, или различаются по видимой яркости на 16 порядков. Создаваемые ими освещенности E_m на объективе телескопа (или на зрачке) соответственно равны $7\cdot 10^{-13}$ и $4\cdot 10^4$ *лк*. В первом случае через объектив за секунду пройдет всего лишь несколько десятков фотонов. Из приведенных формул легко получить связь E_m и m (без учета атмосферного поглощения)

$$\lg E_m=-0{,}4m-5{,}673. \tag{95}$$

Идеально рассеивающая (абсолютно белая) матовая поверхность при освещенности на ней $E=1$ *лк* имеет яркость $B\cdot\frac{1}{\pi}\cdot 10^{-4}=0{,}0318\cdot 10^{-3}$ *сб*; белая бумага, освещенная полной Луной, имеет $B=6\cdot 10^{-6}$ *сб*. Солнце в $5\cdot 10^5$ раз ярче и та же поверхность, расположенная нормально к его лучам, будет иметь $B=3$ *сб*. Голубое небо днем имеет $B=0{,}16$ *сб*, таким образом, на его фоне нельзя заметить метеорного следа, если он будет на 90% слабее, т. е. иметь $B<0{,}015$ *сб*. Ночное небо имеет яркость $B\cong 10^{-3}$ *сб* или в 100 раз более предельно различимой глазом пороговой поверхностной яркости и тот же метеорный след будет казаться о с л е п и-

тельно ярким. Для адаптированного на темноту глаза ослепительным будет болид — 6 величины, который днем может пролететь незамеченным. На пределе видимости при полном солнечном свете часто находится Венера (—4 зв. вел.), тогда как в темную ночь на пределе видны звезды +6 зв. вел., т. е. разница Δm для дня и ночи составляет 10 зв. вел. вместо 20 зв. вел., как это следует из формулы Погсона. Остальные 10 зв. вел. объясняются свойствами приспособляемости глаза (световая и темновая адаптация). Яркость самосветящихся тел выше, чем у освещенных извне, например, пламени свечи 0,5 *сб*, ацетиленового пламени 8 *сб*, угольной нити электролампы 80 *сб*, вольфрамовой нити полуваттной лампы 450 *сб*, «точечной» лампы 2000 *сб*, кратера электродуги 15 000 *сб*, ртутной лампы до 80 000 *сб*, поверхности Солнца вне атмосферы 190 000 *сб*. Если на сфере тело имеет форму круга диаметром a' минут, то при видимой яркости m зв. вел. его поверхностная яркость B вычисляется по формуле [472]:

$$\lg B = -0{,}4m - 2\lg a' - 2{,}50. \qquad (95')$$

Телеметеор с $a' = 0',2$ и $m = +6{,}5$ имеет $B = 0{,}0003$ *сб*, что все же в 10^4 раза выше яркости фона ночного неба. Метеорный след, будучи на 30% ярче фона неба, при $a' = 20'$ должен иметь $m = +7$ зв. вел. $B = 1{,}3 \cdot 10^{-8}$ *сб*, а противосияние при $a' = 480'$ яркость, соответствующую $m = +0{,}35$, «разлитой» по площади 50 кв. град.; эта яркость на 15% выше яркости неба. Часто болиды при $m = -5$ имеют $a' = 10'$, тогда у них $B = 0{,}3$ *сб*, т. е. порядка яркости пламени свечи. У более ярких болидов B выше и, например, у болида 1 марта 1929 г. (Западная Сибирь, метеорит Хмелевка) было $B \cong 6000$ *сб*. Если бы все излучение происходило на $\lambda = 0{,}5\,\mu$, где чувствительность глаза максимальна, то (так как световой эквивалент мощности есть отдача 620 люменов на 1 ватт) этот болид, излучая $6 \cdot 10^{12}$ *люмен*, развивал бы мощность $96 \cdot 10^6$ *квт*. Но так как излучение идет и на других длинах волн (коэффициент полезного действия электролампы около 3,6%), то световой коэффициент полезного действия (кпд) болидов следует считать ничтожным (порядка 1%), в то время как холодное свечение светляка дает коэффициент полезного действия до 95%. Только у некоторых медленных метеоров световой кпд может доходить, по-видимому, до 7—9%.

§ 179. Абсолютная яркость метеоров. В некоторых случаях нет необходимости вычислять силу света метеора, но необходимо привести его яркость к одному определенному расстоянию r. Для удобства звездную величину, отнесенную к стандартному $r = 100$ *км*, назвали абсолютной звездной величиной метеора m_0:

$$m_0 = m + 5\lg r - 10 = m + \Delta m; \qquad (96)$$

Здесь Δm мы назовем *модулем расстояния*. Например, метеор 2 зв. величины при $r = 500$ *км* имеет $m_0 = -1^m,5$ и «модуль расстояния» его $m_0 - m = \Delta m = 5\lg 500 - 10 = -3^m,5$. Болид, имеющий $m_0 = -7^m$, на расстоянии $r = 10$ *м* имеет модуль $\Delta m = -20^m$ и будет сиять как Солнце. Если у него в спектре энергия распределена так же, как у Солнца, то на этом расстоянии r он будет производить те же эффекты (например, ионизацию). Следовательно, на расстояниях в десятки метров болиды представляют собою тела, по мощности излучения крайне опасные для нашего организма. Известно, что вспышка атомной (урановой) бомбы при $r = 10$ *км* создает освещенность $E = 100E_\odot$. Болид $m = -24$ зв. вел. при $r = 300$ *км* имеет ту же силу света I. Между I и m_0 имеется простое соотношение

$$\lg I = 4{,}327 - 0{,}4m_0; \quad m_0 = 10{,}82 - 2{,}5\lg I. \qquad (97)$$

Таким образом, метеор с $m_0 = 0$ имеет силу света $I = 21\,200$ *м. св*, а телеметеор с $I = 1$ *м. св* имеет абсолютную звездную величину $m_0 = +10{,}8$. Наши электролампы в 100 и 500 свечей имели бы абсолютные звездные величины +5,8 и +4,0, а зажженная спичка с расстояния 20 *км* видимую звездную величину $m = +6$ зв. вел. Метеоры должны иметь $I \geqslant 21$ *м. св*, чтобы при кратчайшем расстоянии $r = 50$ *км* их можно было бы заметить простым глазом. Предельная сила света метеора, доступного для бинокля, бинокуляра и метрового телескопа при этом должна быть не менее 3,5, 0,08 и 0,002 *м. св*. Точность определения видимой яркости метеора глазом или по фотографии довольно низкая (10—20%), но это не играет большой роли, так как диапазон изменения видимой яркости метеора огромен (десяток и более звездных величин).

Если видимая яркость метеора определялась не сравнением со звездами на той же высоте и требуется учесть атмосферное поглощение, коэффициент которого p, то свободный член в первом выражении (97) будет больше на $-\lg p$, а во втором на $+2{,}5\lg p$.

Световой поток, излучаемый метеором силой света I, равен $\Phi = 4\pi I$ *люмен*. Согласно физической теории метеоров (см. гл. 24) Φ пропорционально скорости потери массы M метеором; если обозначить коэффициент пропорциональности через τ, то тогда

$$\Phi = \tau \frac{v^2}{2}\left(-\frac{dM}{dt}\right).$$

Можно думать что τ само зависит от скорости, например, $\tau = \tau_0 v$, тогда

$$I = \frac{\tau_0}{4\pi}\frac{v^3}{2}\left(-\frac{dM}{dt}\right)$$

или сила света пропорциональна кубу скорости метеора. Как оказывается по фотографиям (Яккиа, 1949 г.) при $v < 20$ *км/сек* τ сильно убывает на $H \leqslant 60$ *км*.

Если бы вся энергия потерянных телом частиц ушла на излучение в области наиболее выгодной длины волны $\lambda = 0{,}55\ \mu$, то тогда τ было бы равно световому эквиваленту мощности K или $\tau = K = 620$ *люмен/ватт*. Но излучение метеора имеет иной спектральный состав, происходит отдача лишь $\gamma\%$ этой мощности, кроме того, энергия идет на другие формы работы (ионизация, звук и т. д.), так что на излучение тратится только $q\%$. Таким образом, $q\gamma$ есть световой коэффициент полезного действия, а $\tau = Kq\gamma$. Так как от скорости v метеора зависит распределение излучения и коэффициент полезного действия, то γ и q зависят от v. Дуга с железными электродами дает $\gamma = 0{,}016$; если $q = 0{,}025$, то световой коэффициент полезного действия $q\gamma = 0{,}0004$. Из теории атомных столкновений Эпик находит $q\gamma = 0{,}0005 - 0{,}0060$. Тогда численно $\tau \cong 1{,}0$ *люмен/ватт*. Беря энергию излучения в видимых лучах, он находит «визуальную интенсивность» метеора в ваттах. Ее значение находится при базисных визуальных или фотографических наблюдениях, когда точно известно расстояние r до метеора.

§ 180. Определение видимой яркости болидов затруднительно ввиду отсутствия на небе стандартов подходящей яркости. Поэтому лучше оценивать создаваемую ими освещенность, используя земные источники света. Автор предлагает также оценивать блеск звезд, которые переставали быть видимы в 30° от болида, и переходить к видимой яркости болида на основе следующей таблички:

Болид	—6	—8	—10	—12	—14	—16	—18	—20	—22	—24	—26	—28	зв. вел.
Звезды	+5,5	4,6	3,7	2,3	1,9	1,0	+0,1	—0,8	—1,7	—2,6	—3,5	—4,5	» »

Видимая яркость болидов может быть исключительной: еще Галлей описал болид 1718 г., когда перестала быть видимой полная Луна и исчезли все звезды неба, как днем. Если глаз адаптирован на фон неба $B_\Phi = 10^{-8}$ *сб*, то слепящей будет яркость $B = 8\sqrt[3]{B_\Phi} = 0{,}017$ *сб*. Но такое значение B имеют не только болиды, но и их следы. Поэтому при разных a' и m слепящими будут разные метеоры:

a', не более	0′,04	0′,4	4′,3	43′
при m ярче	+5	0	—5	—10 зв. вел.

Например, в телескоп слабый метеор может показаться ослепительным. Болиды —5 величины и ярче всегда будут «ослепительными», так как их размеры a' невелики. Отвлекаясь от иррадиации, из наблюдений 32 болидов разных очевидцев мы находим зависимость B от их цвета:

Цвет болида	Голубой	Белый	Желтый	Оранжевый и красный	Зеленый
Яркость B, *сб*	0,023	0,012	0,005	0,0007	0,0009

Следовательно, желтые, оранжевые и красные болиды не могут казаться слепящими и обычно этот эпитет прилагается к белым и

голубым болидам. Считая, что эти оценки цвета (белый, желтый, красный) соответствуют баллам шкалы Остгоффа 2, 4 и 7 и температурам 10 800°, 5620° и 3140° К и что метеор излучает как абсолютно черное тело, получим теоретически светоотдачу $K_0 = 54, 78$ и 22 *люмен/ватт*, так что коэффициент светимости τ в среднем равен $0{,}0004 \cdot K_0$. Это значит, что излучение метеора как бы «разбавлено» действием иррадиации, потерь, отсутствием непрерывного спектра и других причин. Отсюда $q\gamma = 4 \cdot 10^{-4}$ в согласии с предыдущим.

§ 181. Яркость протяженных объектов. Приводим значения яркости некоторых небесных объектов для сравнения:

Объект	B, *сб*	Объект	B, *сб*
Предел различимости глазом на черном фоне	10^{-10}	Поверхность Нептуна	$4 \cdot 10^{-4}$
След метеора (на пределе)	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$	Поверхность кольца B Сатурна	10^{-2}
Фон ночного неба	$1 \cdot 10^{-8}$	Поверхность Юпитера	$5 \cdot 10^{-2}$
Зодиакальная полоса	$1{,}1 \cdot 10^{-8}$	Метеор (—3 вел.) при $a' = 60''$	$5 \cdot 10^{-2}$
Противосияние	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	Болид (—9 вел.) при $a' = 6'$	$3 \cdot 10^{-1}$
Туманности; головы телескопических комет	10^{-6}—10^{-8}	Поверхность Луны	$2{,}5 \cdot 10^{-1}$
Хвосты комет	10^{-5}—10^{-8}	Голубое небо днем в зените	$1{,}5 \cdot 10^{-1}$
След персеида 1 вел. в момент появления	10^{-7}	Поверхность Венеры	$5 \cdot 10^{-1}$
Голова телеметеора 9 вел. диаметром $a' = 6''$	10^{-6}	Пламя стеариновой свечи	$5 \cdot 10^{-1}$
Яркие части Млечного Пути	10^{-5}	Пламя керосиновой лампы	1,3
Зодиакальный свет в 30° от Солнца	10^{-5}	Освещенные Солнцем пылевые следы болидов	0,1—1
Небо в зените при полной Луне на высоте 20°	10^{-4}	Кучевые облака, до	1—2
След персеида (—5 вел.) при появлении	10^{-3}	Сверхъяркие болиды	10^2 — 10^3
Метеор +3 вел. при $a' = 20''$	$2 \cdot 10^{-3}$	Нить электролампы	$4 \cdot 10^2$
Небо в зените при полном солнечном затмении	$2 \cdot 10^{-4}$—10^{-5}	Поверхность Солнца	$1{,}5 \cdot 10^5$
		Поверхность горячих звезд	10^7

Отсюда видно, что в полнолуние нельзя видеть следов обычных метеоров, противосияния, Млечного Пути, туманностей и телеметеоров, что во время полной фазы солнечного затмения не будут видны части зодиакального света с $\varepsilon_\odot > 30°$, метеоры слабее 3 величины; далее, что при дневном свете можно видеть на небе Луну (что общеизвестно) и что яркость пылевых следов того же порядка, что и обычных облаков. Становится понятным, почему метеоры не видны на фоне освещенного диска Луны (они кажутся пролетающими позади Луны). Пылевые следы ночных метеоров должны иметь $B = 10^{-5} - 10^{-6}$ *сб*, так что при освещении их светом Луны можно заметить только самые плотные следы (например, при взрыве метеора по Мохаммед-Хану, Индия).

§ 182. Разделение метеоров по яркости. Звездную величину метеора всегда оценивают в максимуме. Стойкович различал метеоры трех классов: 1) яркие со следом, 2) обыкновенные и 3) слабые и телескопические; Ю. Шмидт для ярких метеоров вводил «ранги»: I — дневные, звуковые и прочие болиды с заметным диском, II — превосходящие Венеру и озаряющие пейзаж, III — подобные Юпитеру, IV — подобные Сириусу. Деннинг делил их на: 1) огненные шары, 2) болиды, подобные Венере и Юпитеру, 3) метеоры ярче 1 величины и 4) прочие метеоры. Небольшие болиды Фламмарион предлагал называть «брадитами»; в Чехословакии к болидам относят метеоры яркостью как Юпитер ($m = -2$ зв. вел.) и ярче. Эти подразделения имели основание, так как яркость — важнейшая и лучше всего оцениваемая характеристика метеора. В случае необходимости в целях практического удобства ввиду огромного разнообразия яркостей метеоров можно было бы условиться разделять метеоры по их абсолютной звездной величине (как это сделано в § 4). Тогда *ультрателеметеорами* можно назвать метеоры слабее 10^{-2} *м. св.*, *слабыми телеметеорами* — в пределах 1,0 — 0,01 *м. св.*, *телеметеорами* — от 1 до 100 *м. св. Обычные метеоры* попали бы в диапазон $10^2 - 10^4$ *м. св*, яркие $-10^4 - 10^6$ *м. св.*; *болидами* будут объекты силой света в миллион свечей и ярче, а *яркими болидами* — при $I \geqslant 10^8$ *м. св*. Наконец, *сверхболидами* мы назовем объекты в 10^{10} *м. св* и ярче. Все телеметеоры можно назвать *микрометеорами*, обычные метеоры — *макрометеорами*, а болиды — *мегаметеорами*.

§ 183. Изменение яркости. Между появлением и исчезновением метеора, согласно известной теореме анализа, должен быть по крайней мере один максимум яркости (рис. 131). Иногда это резкая вспышка, иногда затяжной максимум на второй половине пути. *Положение максимума* в долях длины пути λ, считая от точки появления, мы будем обозначать через p. Очевидно, что $0 < p \leqslant 1$. Почти

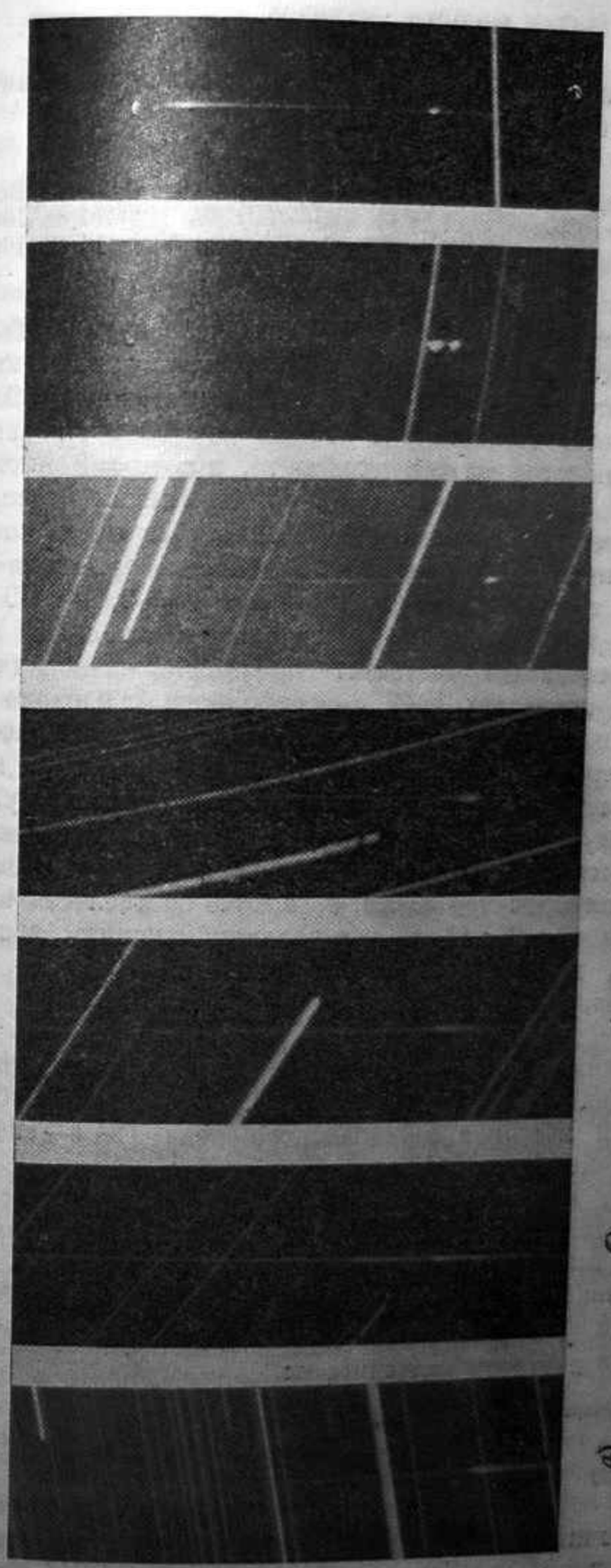


Рис. 131. Особенности изменения яркости метеоров (максимум яркости — во второй половине пути). Фотографии Ашхабадской астрофизической лаборатории, 1950—1953 гг.
а — вспышка, *б* — двойная вспышка, *в* — затяжка и взрыв, *г* — конечный взрыв, *д* — треугольная вспышка, *е* — двойной конечный взрыв, *ж* — перетяжка и сферический взрыв. Движение метеоров сверху вниз.

всегда $p > 0{,}5$, например, по ашхабадским наблюдениям автора мы имеем (для первого полугодия):

Положение максимума яркости, p.	0,0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8	0,8—1,0	Всего	n
Метеоры 1943 г. %	0	1	36	49	14	100%	918
» 1944 г. %	1	9	37	39	14	100%	1558
Число метеоров, n	19	142	904	1061	350	—	2476

Только 6% метеоров имеют $p < 0{,}4$ (в начале пути). Обычно это усиление яркости слабых, невидимых до того метеоров; на это также указывает и фотография. В 78—85% случаев $p = 0{,}5 — 0{,}7$. Х. Разыев, обработав ашхабадские наблюдения 1943 г., нашел, что слабые метеоры имеют p на середине пути, при $m = 3$ он смещается к $p = 0{,}6 — 0{,}7$, при $m = 2$ к $p = 0{,}75$ и у ярких метеоров $p = 0{,}8 — 1{,}0$. Кроме того, положение p зависит от цвета и при переходе от белых метеоров к желтым и далее к оранжево-красным число метеоров с $p = 0{,}5$ убывает вдвое, а с $p = 0{,}8 — 1{,}0$ возрастает втрое: при $p = 0{,}5$, 0,75 и 1 отношение красных метеоров к белым растет, составляя соответственно 8, 15 и 44% ($n = 393$). Метеоры первого полугодия 1943 г., свободного от влияния больших потоков, показали также определенную связь видимой угловой скорости с p: при переходе от медленных метеоров к быстрым максимум от $p = 0{,}8$ смещается на $p = 0{,}5$ (566 метеоров, Х. Д. Гульмедов). Имеется также суточная вариация p: данные за 1943 и 1944 г. (первые шесть месяцев) показывают, что до местной полуночи соотношение чисел метеоров с $p = 0{,}5$, 0,75 и 1,0 составляет 31 : 42 : 17, а после полуночи 40 : 46 : 14, т. е. в среднем максимум p смещается к середине пути, как если бы к утру возрастало число быстрых и белых метеоров, что действительно и происходит.

§ 184. Годичная вариация средней яркости метеоров вызвана влиянием больших потоков; в 1945 г. Л. Г. Елисеева обработала 4833 наблюдений метеоров ашхабадского ряда 1942—1945 гг. и нашла, что для метеоров 3 величины и слабее максимум их числа падает на июнь, минимум на декабрь, для метеоров 2 величины и ярче — ход обратный с минимумом в апреле и максимумами в августе, ноябре и декабре, вызванными потоками Персеид, Таурид, Ариетид и Геминид (Леониды в эти годы были неактивны). А. Ф. Червякова по 11 215 метеорам того же ряда получила следующий сезонный ход средней звездной величины $\overline{m}$:

Месяцы	Янв. — Март	Апр. — Июнь	Июль — Авг.	Сент. — Дек.	Ср. годовое
$\overline{m}$	2,90	2,95	2,80	2,75	2,85
n	2200	2781	2937	3297	11215

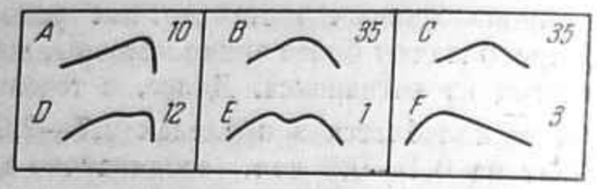
§ 185. Суточная вариация средней яркости метеоров очень слаба: в 1951 г. А. Ф. Червякова обработала 11 215 наблюдений

метеоров автора, произведенных в стандартных условиях, и нашла, что в начале ночи преобладают более яркие метеоры, возможно, за счет более крупных частиц из антиапекса. Далее, в течение ночи средняя звездная величина $\overline{m}$ колеблется в пределах 2,7—2,9 вел. и к утру медленно возрастает на 0,1—0,2 вел., неодинаково в разные времена года. Перед рассветом виден скачок на 0,2 вел. вниз и затем общее нарастание $\overline{m}$ в связи с наступлением рассвета, «съедающего» слабые метеоры. Во время действия больших потоков наблюдатель пропускает более слабые метеоры и потому среднее $\overline{m}$ завышается (явление Плассмана), например, у автора на 0,2 зв. вел.

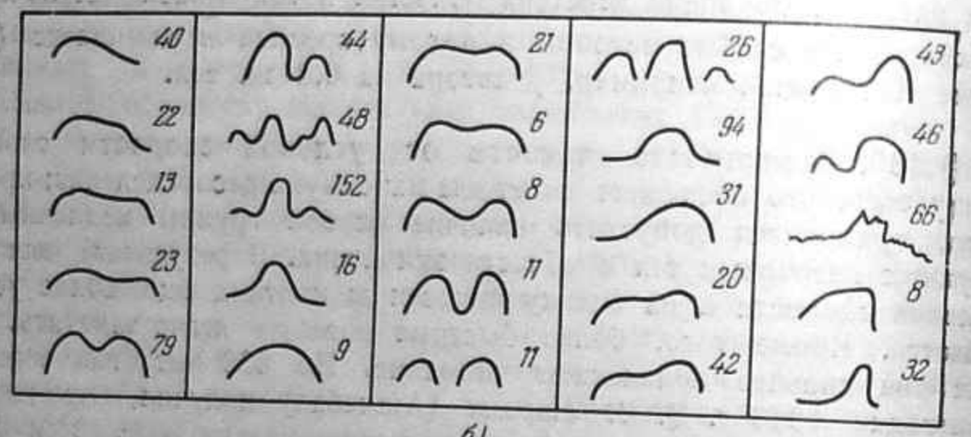
§ 186. Зависимость яркости от угловой скорости сложна ввиду того, что последняя имеет два максимума распределения; кроме того, приходится допустить наличие особой группы медленных и крупных метеорных тел в области эклиптики. В результате влияния угловой скорости ω на оценку яркости m картина еще более усложняется. Кроме того, более быстрые метеоры легче заметить, так как они сильнее привлекают внимание. По 839 метеорам первого полугодия 1943 г. В. В. Нардин (Ашхабад) получил, что яркие метеоры (1 величины и ярче) имеют максимумы на $\omega_2 = 13°$ и 50—60° *сек*$^{-1}$, а более слабые на 20—25° *сек*$^{-1}$.

«Вековой ход» средней яркости, вероятно, существует, но для его выявления надо обработать многолетние ряды однородных наблюдений. Указания на то, что якобы в XIX в. средняя яркость метеоров была выше, чем теперь, нуждаются в строгой проверке. По наблюдениям 1521 метеора в 1925 г. автор получил $\overline{m} = 3{,}11$, а в 1942—1945 гг. по 11 215 метеорам $\overline{m} = 2{,}84$.

§ 187. Кривые изменения яркости метеоров получаются по визуальным [160] и фотографическим [475] наблюдениям (рис. 132, 133), а в будущем, видимо, будут регистрироваться фотоэлектрически. Следует помнить, что ночью кратковременное световое раздражение производит в глазу бо́льшее впечатление, чем постоянный свет той же яркости, в течение 0,06—0,12 *сек* (Шарпантье, 1887 г.), после чего количество света воспринимается без искажения (могущего доходить до 1,5 зв. вел. в зависимости от цвета, яркости фона и т. д.). Однако попытки изобразить графически ход изменения яркости при полете небезуспешны: они согласны между собой у разных лиц и подтверждаются фотографией. Поэтому с 1933 г. автор включил получение этих кривых в программу наблюдений. Из 16 766 обычных метеоров 94,6% оказались относительно «нормальными», а прочие 909 аномальных метеоров дали 242 двойных максимума, 152 — тройных, 48 — четверных; при большем числе максимумов метеор относился к «мерцающим» (66 случаев). При двойном максимуме первый был ярче второго 123 раза, оба равны — 30 раз и



а)



б)

Рис. 132. Кривые яркости метеоров по визуальным наблюдениям 16 766 метеоров (Ашхабад, 1942—1945 гг.):

а — нормальные (95% метеоров), числа указывают проценты, *б* — аномальные (5% метеоров), числа указывают количество метеоров. Направление полета — слева направо.

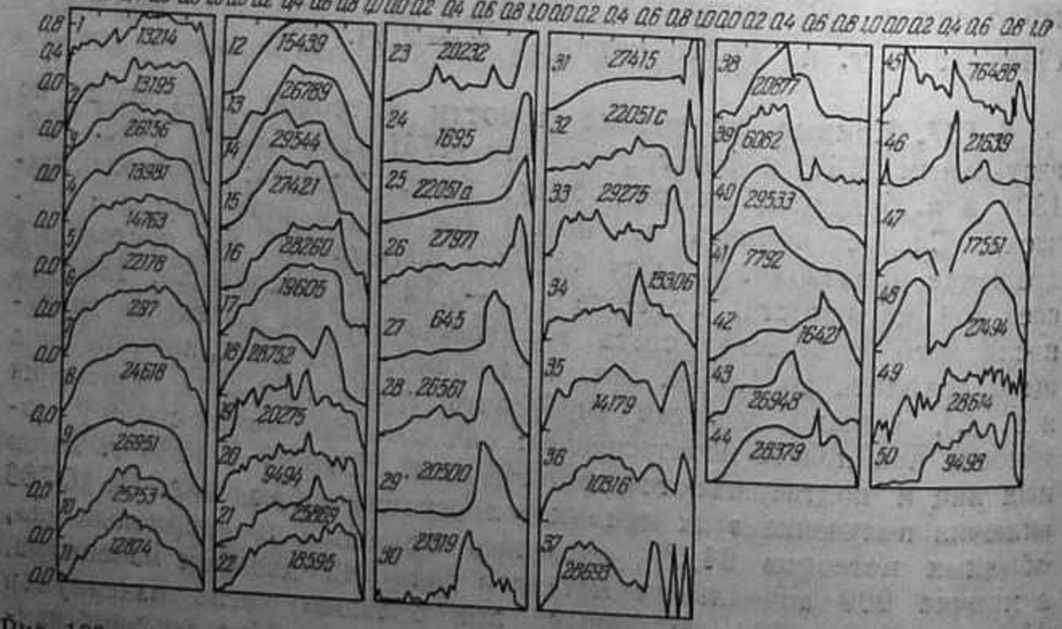


Рис. 133. Кривые изменения яркости некоторых фотометеоров Гарвардской обсерватории (по Хоффлейт).

второй ярче — 89 раз. У 131 метеора максимум был растянут по всему пути (тип «спицы»), у 62 — по первой половине, у 125 — по второй (рис. 132). Только 26 метеоров (0,016%) не вошли в эту схему. У ярких метеоров аномалии гораздо более часты. Если минимум между двумя максимумами был ниже порога видимости, то казалось, что пролетают один вслед другому два разных метеора (11 двойных и 26 тройных). При трех максимумах (рис. 134) всегда

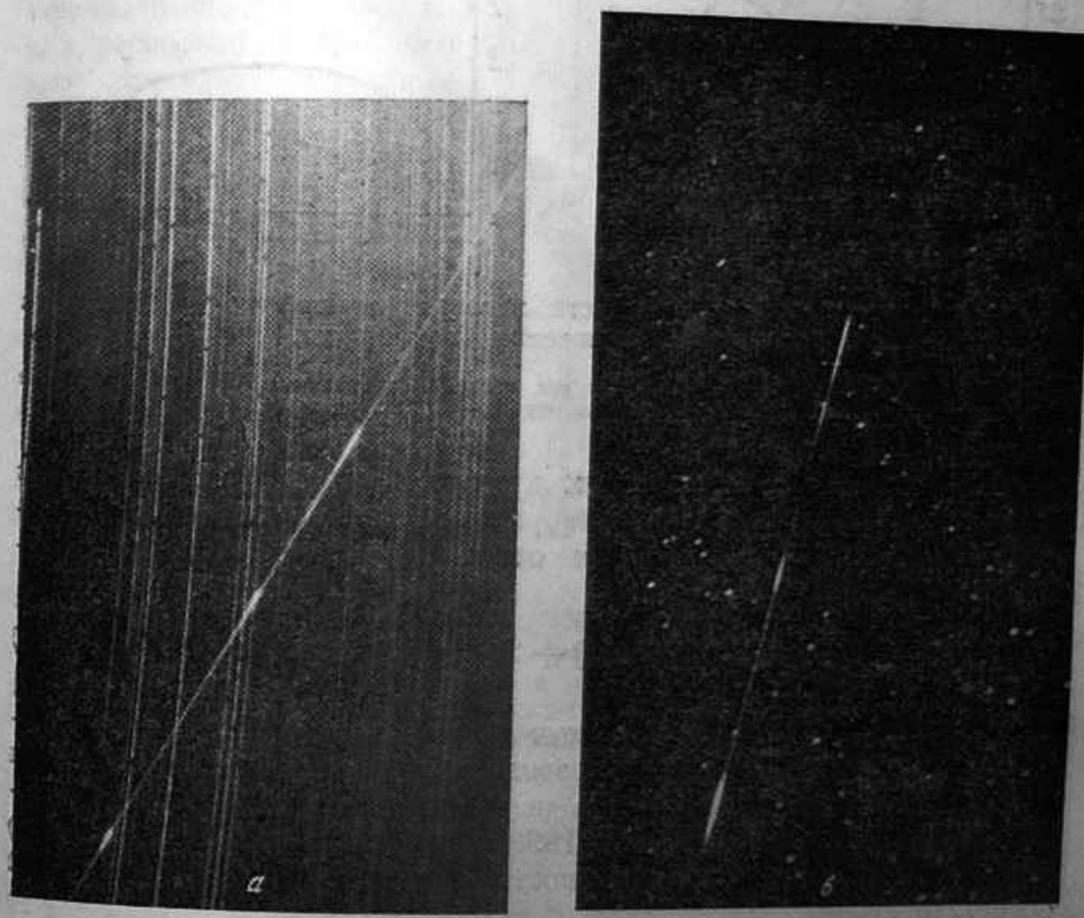


Рис. 134. Три последовательные вспышки метеора:

а — 10 июня 1953 г., Ванновское, Туркмения; *б* — 28 августа 1929 г., Блумфонтейн, Ю. Африка.

первый был слабее прочих, причем в 152 случаях второй ярче третьего и у 48 метеоров наоборот. Поскольку след метеора строго следует кривой яркости $m = f(\lambda)$ метеора, то при его наличии последнюю можно уточнять. Более трудно получать кривые изменения яркости неподвижных (стационарных) метеоров [469]. В 1947 г. Хоукинс [478], без ссылок на советские работы, находил «без труда определимую» кривую яркости персеид и других метеоров. Его 7 типов соответствуют $p = 0{,}1$, 0,3, 0,5, 0,7 и 0,9, типу 0,3—0,9 и «мерцающим» метеорам. С увеличением яркости p у Хоукинса также смещается к концу

пути, как и при убывании скорости. Он заметил, что близ горизонта у персеид p лежит ближе к концу, чем на $h > 30°$ (а для других метеоров при $h > 60°$). Это понятно, так как у горизонта меньше сказывается разница расстояний. В некоторых случаях, особенно для длинных метеоров, ее влияние может оказаться значительным

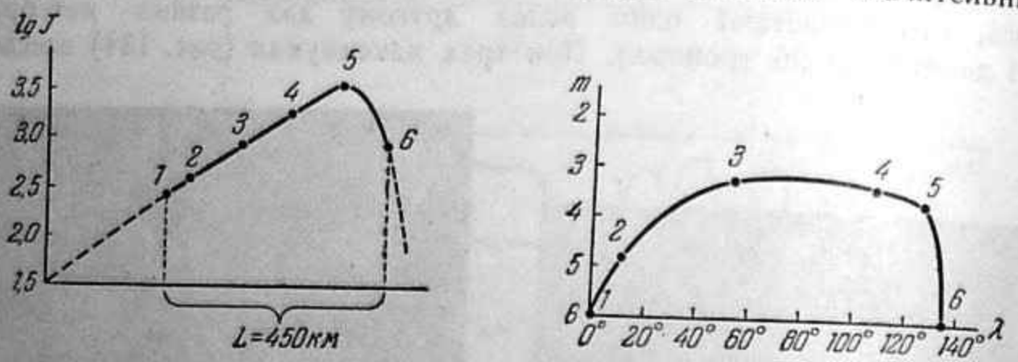


Рис. 135. Изменение видимой яркости метеора (справа) и его силы света (слева) на протяжении 450 *км* пути.

Пунктиром отмечены участки, находящиеся вне пределов видимости. Расстояние до точки появления (*1*) — 187 *км*, до точки исчезновения (*6*) — 307 *км*, угловая длина пути $\lambda = 132°$.

[142] и совсем исказить истинную кривую $I = f(L)$ (рис. 135). Если при элонгации ψ_1 сила света метеора была $i_1 = 1$, а звездная величина m_1, то при другой ψ и m относительная сила света i получается по формуле

$$\lg i = 0{,}4\,(m_1 - m) + 2 \lg (\sin \psi_1 \operatorname{cosec} \psi). \qquad (98)$$

§ 188. Фотографическая фотометрия. Еще в 1922 г. Н. М. Штауде указывала, что фотография позволит определить изменения яркости во время полета [476], важность чего еще раз в 1933 г. была подчеркнута автором [142, 160]. В 1933 г. Хоффлейт измерила (рис. 133) ход изменения оптической плотности 50 фотометеоров Гарвардской обсерватории.

В 1934 г. Н. Н. Сытинская [182] из сравнения интенсивностей почернения пути метеора и звезд (рис. 136), и учитывая разность их угловых скоростей ω_* и ω, показала, как находить изменение яркости вдоль пути по фотографии

$$m = m_* + 2{,}5 \lg \frac{\omega_*}{\omega}.$$

Ею были промерены ташкентские снимки И. И. Сикоры. Оказалось (рис. 137), что они относились к метеорам от —1 до —7 вел. В работе 1936 г. [263] она исследует болид $m = -7{,}4$, снятый Сикорой из трех точек 11 августа 1909 г. На высоте $H = 88$ *км* он дал вспышку силой $65 \cdot 10^6$ *м. св.*, пройдя 4 *км* пути — ослабел до $I = 6 \cdot 10^6$ *м. св.* и еще через 3 *км*, на высоте 85 *км*, дал второй взрыв силой $35 \cdot 10^6$ *м. св.* При появлении на высоте $H_1 = 109$ *км* болид имел $I = 2 \cdot 10^6$ *м. св.* (более слабые части пути на пластинке не вышли), при исчезновении на $H_2 = 83$ *км* $I \sim 5 \cdot 10^6$ *м. св.* Измеренная яркость метеора (по сравнению со звездами) изменялась от $+5{,}4$ до $+1{,}8$ зв. вел., исправленная за разницу скоростей соответственно от $-2{,}1$ до $-6{,}6$, а абсолютная — $3{,}6$ и — $7{,}4$. Отклонения по второму негативу оказались $\pm 0{,}34$ зв. вел., т. е. несколько более, чем дают хорошие визуальные наблюдения.

В 1935 г. Н. Н. Сытинская опубликовала [263] результаты фотографической фотометрии 11 метеоров. Теми же камерами и на таких же пластинках были сняты яркие планеты как при неподвижных камерах, так и при помощи механизма, в 60 раз увеличивающего угловую скорость ω движения звезд. При этом звезды ослабевали на 4,4 зв. вел., согласно расчета

$$\Delta m = -2{,}5 \lg \frac{\omega_{60}}{\omega} = 4{,}44.$$

Общее $\Delta m = 11{,}3$ вел. Быстрые леониды 1932 г. действовали на пластинку сильнее, чем звезды; кривые яркости спорадических метеоров оказались более плавными, чем например, персеид и орионид.

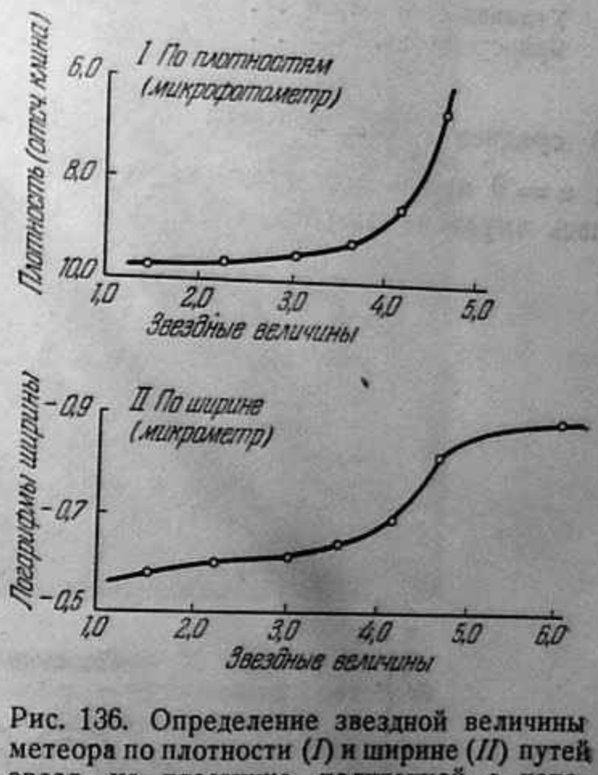


Рис. 136. Определение звездной величины метеора по плотности (*I*) и ширине (*II*) путей звезд на пластинке, полученной с неподвижной камерой (по Н. Н. Сытинской). Первый способ лучше для слабых метеоров, второй — для ярких.

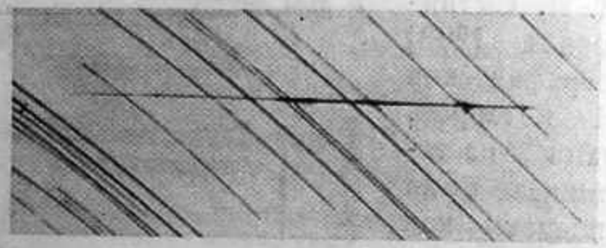
В 1939 г. Н. Н. Сытинская [475] измерила еще 41 фотометеор, пользуясь следами белых звезд. К двум основным типам Хоффлейт (I — плавное изменение с $p = 0{,}5$, II — плавный подъем, вспышка, резкий спад) она предлагает добавить тип III — двойной взрыв в конце. Соответствующее число метеоров оказалось 16, 9 и 8. Сюда не попали восемь метеоров с другими особенностями. При этом, однако, следует помнить, что в местах, где метеор пересекает путь звезды, он кажется ярче из-за влияния предварительной засветки [474]; здесь возникает ложная вспышка.

В 1950 г. важную работу по фотометрии метеоров проделал Д. Л. Аставин-Разумин в Кучине [470, 471]. Фотометрическим эталоном у него являлась электролампа постоянной силы света, отражение которой от плоского вращающегося зеркала попадает в камеру и

дает снимок искусственного метеора (рис. 138). В другом опыте вращалась камера. Эталон соответствовал —5,0 зв. вел. Участки слабее —2,2 зв. вел. при большой ω уже не вышли. Потери яркости в зависимости от ω видны из таблички:

Угловая скорость ω . .	10°	15	20	25	30°	*сек*$^{-1}$
Яркость *m*, зв. вел. . .	—4,6	—4,2	—3,8	—3,4	—3,0	

В среднем $\frac{\Delta m}{\Delta \omega} = -0{,}086$ зв. вел. *град*$^{-1} \cdot$ *сек*. По сравнению с $\omega = 0$ при $\omega = 5°$ *сек*$^{-1}$ теряется 0,4 зв. вел. При этом применялась эмульсия панхром 1300° X и Д и камера ФЭД 1:2, $f = 50$ *мм*.



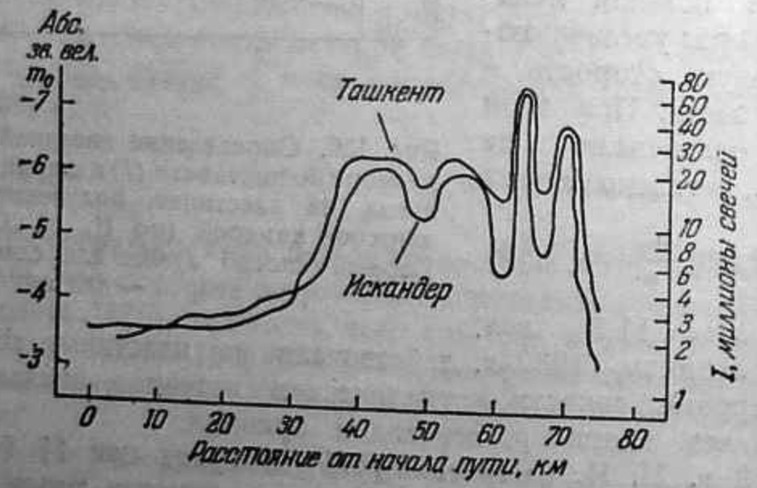


Рис. 137. Изменение вдоль пути абсолютной звездной величины m_0 и силы света *I* болида 11 августа 1909 г., сфотографированного И. И. Сикорой из Ташкента и Искандера. Перевычислено по измерениям Н. Н. Ситинской (1936 г.).

Из опытов 1933 г. в Сталинабаде с качающимся биноклем и в Ашхабаде в 1944 г. с вращающимся зеркалом автор для глаза нашел $\frac{\Delta m}{\Delta \omega} = -0{,}03$, т. е. потерю в 2,5 раза меньше. Вероятно, этот параметр весьма индивидуален. Впечатывая на фотопластинку фотометрический эталон при известной угловой скорости, мы ее стан-

дартизуем, а изменяя яркость источника в известное число раз при той же выдержке, — калибруем ее. Если яркость эталона известна

Рис. 138. Фотография метеора 25 августа 1949 г. Вверху и внизу следы искусственных метеоров (по Д. Л. Аставину-Разумину).

в лабораторных единицах, то возможна абсолютная фотометрия метеора [182].

§ 189. Вспышки и взрывы довольно часты при полете метеоров (рис. 139) и тем чаще, чем последние ярче. Обычно где-либо во второй половине пути метеора яркость внезапно увеличивается на 1—3, реже на 4—6 величин, на фотографии изображение метеора сильно расширяется, возникает ореол и даже (леонид 17 ноября 1932 г.) — соляризация. Чем ярче вспышка, тем дольше она длится (десятые доли секунды) и тем больший отрезок пути занимает (до 1 *км*). Иногда взрывы на фотографии вполне круглы, что указывает на их длительность около 0,001 *сек*. При достаточной яркости вспышки мгновенно озаряют местность, как молния; иногда они следуют серией, создавая «судорожное», «трепетное» освещение. На месте взрыва метеорный след наиболее плотен, что следует иметь в виду при изучении фотографий. Дефекты оптики могут придать взрыву несуществующие детали, рассеяние света — ложные размеры (рис. 68 и 71).

Спектрограммы взрывов указывают на ослабление в них синих линий спектра сравнительно с красными, т. е. на снижение температуры (на десятки градусов), что соответствует расширяющемуся газу.

Так как при этом вещество метеора выбрасывается вбок со скоростью нескольких километров в секунду, а траектория иногда отклоняется на несколько градусов, то здесь должна иметь место сила реакции. Сравнение базисных фотографий из разных точек показывает на неидентичность излучения метеора в разных направлениях при

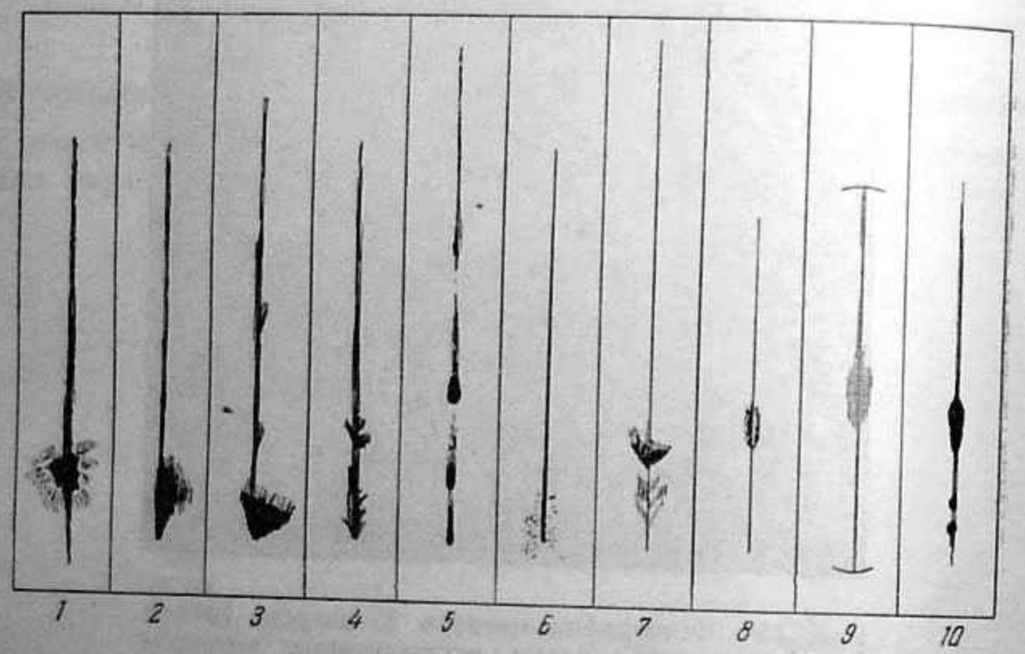


Рис. 139. Взрывы метеоров по фотографическим и визуальным наблюдениям:
1—23/XI 1895 г., фото Батлера (Кэмбридж), *2*—20/X 1952 г., фото ААЛ, *3*—21/VIII 1924 г., фото Сикоры (Ондржейов), *4*—12/VIII 1950 г., фото ААЛ, *5*—23/IV 1922 г., набл. Е. Л. Кринова, *6*—5/IX 1924 г., набл. И. С. Астаповича, *7* и *8*—11/VIII 1901 г., фото Сикоры (Тарту), *9*—11/IX 1933 г., набл. в бинокль И. С. Астаповича (дуги ограничивают поле зрения), *10*—8/VIII 1953 г., фото ААЛ.

взрыве. Часто при взрыве выбрасываются искры, иногда десятками, иногда метеор расщепляется на две (редко более) части, причем изменения яркости каждой (или вторичные взрывы) происходят несинхронно. Высоты взрывов весьма разнообразны. Все это указывает, что причина взрыва лежит не в атмосфере, а в метеоре и, по мнению автора, частью определяется испарением перегретых легкоплавких включений в неоднородном метеорном теле. Судя по углам отклонений, можно допустить, что одновременно может внезапно испариться перегретое включение, составляющее несколько процентов от основной массы. Мелкие метеорные частицы относительно более однородны и поэтому испаряются спокойнее. Однако индивидуальность каждой всегда заметна: рассматривая фотографии метеоров во время звездного дождя, легко видеть, что каждый метеор имеет свои особенности, хотя они и принадлежат одному потоку (рис. 38). Быстрые и неправильные колебания яркости происходят даже при полете геометрически правильных сверхбыстрых пуль, однако влияние формы (палочка, пластинка)

и дробления тоже должно иметь значение. В 1953 г. в ночь 11—12 августа в Ашхабаде было сфотографировано 50 метеоров, на следующую ночь 53, в основном персеиды. Ни одна фотография не была похожа на другую: взрывы имели разный вид и разное положение на траектории, их было то один, то два, три или более, то ни одного. Они располагались на разных высотах в пределах 70—100 *км*.

В 1949 г. Яккиа [271] исследовал фотометеоры Гарвардской обсерватории. С возрастанием скорости в среднем вспышки сдвигались к концу пути; медленные метеоры имели их много, быстрые одну или ни одной. Они являются результатом и дробления и выброса массы (Яккиа) или сбрасывания прогретого слоя (Кук, Эйринг, Томас); последовательный ряд таких сбрасываний объясняет, например, периодичность пульсаций яркости (рис. 140), однако вычисленная частота (10^3 *гц*) не соответствует наблюдениям (на 1—2 порядка ниже).

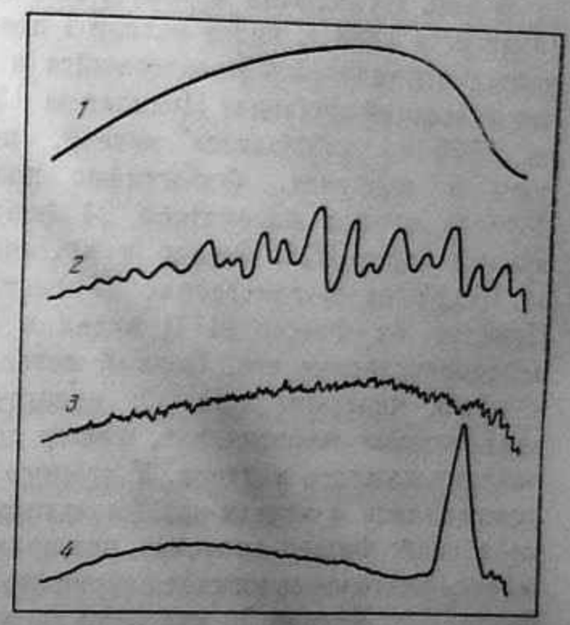


Рис. 140. Некоторые типы кривых изменения яркости фотометеоров (микрофотограммы, по Гофмейстеру).

П. Н. Чирвинский причину вспышек видел в форме метеорного тела, меняющего ориентировку в пространстве, Миллман (1935 г.) — в испарении включений, В. В. Федынский и К. П. Станюкович [95] конечные вспышки объясняют испарением основной массы тела (например, у фотометеора 14 августа 1932 г. на высоте $H = 61$ *км*). Во времена Хладни и позже неправильно полагали, что взрывы являются причиной звуков, Ольберс их реактивным действием хотел объяснить «восходящие» траектории, получавшиеся из-за ошибок наблюдений. Многократные изменения яркости фотометеора 27 февраля 1914 г. Меткоф «объяснял» тем, что метеор состоял из нескольких частей. Очень короткие метеоры (до 0°,3 или 2 *мм* на негативе) из числа 386, обнаруженных Фишером и др. на 100 000 пластинок Гарвардской обсерватории, вероятно, являются часто вспышками более слабых метеоров, остальная часть пути которых не вышла.

Интересны некоторые фотографии метеоров: так, Г. Н. Неуймин в Симеизе 9—10 июня 1932 г. снял метеор, который на 4°,0 пути изменял периодически яркость 10 раз и еще асинхронно дал три взрыва [247]; на снимке, полученном там же 23 августа 1925 г. Г. А. Шайном, два взрыва, длительностью по 1 *мсек*, разделены

интервалом в 0,03 *сек*; на снимке Г. Н. Неуймина 23 сентября 1930 г. конечный участок пути имеет пять пульсаций яркости на 0,2—0,4 вел. и после пятого максимума отклоняется на 2°. Миллман исследовал восемь взрывов болида 26 февраля 1933 г. от —5,4 до —9,2 вел.: увеличение яркости в пять раз удлиняет вспышку на 1 *км* и ее длительность на 0,08 *сек*. Вспышки шли через интервалы около 0,25 *сек* (метеор был из антиапекса).

§ 190. Пульсации яркости. Еще И. А. Клейбер под Петербургом 11 августа 1883 г. видел метеор 1 величины (не персеид), за 2 секунды полета периодически появлявшийся и исчезавший 20 раз; четыре случая пульсаций приводит Цециоли за 1867—1871 гг. В Дании 19 октября 1925 г. наблюдался метеор, периодически исчезавший, «как перо в воздухе». Фотография подтвердила визуальные данные: Роуленд описал фотометеор 24 февраля 1932 г. с четырьмя максимумами через 0°,8, Фишер и др. обнаружили пульсации с частотой до 150 *гц* на фотометеорах 27 сентября 1902 г. и 8 мая 1909 г. Причину их Фишер [477] видел в вибрациях метеорного тела при переориентировке его. Первый метеор имел 71 пульсацию, второй 39 и после перерыва еще 30; полагая, что изменение длины интервала вызвано перспективой, Фишер даже вычислил элонгации и нашел радиант каждого метеора. У второго метеора в конце пути пульсации усложнились и давали как бы наложение двух разных периодических колебаний; Фишер допускал, что произошло дробление и оба тела вращались независимо каждое вокруг своей оси: первое дало 21 пульсацию, второе 11. Метеор 26 мая 1932 г., по Миллману, с высоты $H = 60$ *км* начал правильно пульсировать каждые 250 *м* пути до $H = 56$ *км*: сначала прошло 19 максимумов, затем произошел крупный взрыв, в результате чего интервал укоротился до 200 *м*, а частота стала 135 *гц*, что недоступно глазу. Один леонид 16 ноября 1932 г. изменял яркость на 50% и имел синусоидальные искривления пути с тем же периодом; последние являются *оптическими*, а не истинными, так как требовались бы громадные ускорения, чтобы их создавать. Наиболее простой кажется гипотеза вращающегося фонтанирующего метеорного тела (подобное явление известно при вращении ядер комет, где оно поражает γ-формы). 28 ноября 1938 г. в Сталинабаде был снят желтый метеор —3,5 вел., на середине пути расщепившийся на два, после чего у главного метеора возникли пульсации, отсутствующие у спутника. Замечательные фотографии дробления получили В. П. Цесевич в Одессе (либрид 11 мая 1955 г.) и Цеплеха в Ондржейове (27 октября 1951 г.).

§ 191. Мерцающие метеоры имеют быстрые и неправильные колебания яркости и наблюдаются рядом со звездами или другими метеорами, вовсе не мерцающими. Таким образом, причина мерцания лежит также в метеоре (рис. 141). Они довольно редки (1%), по ашхабадским данным 1942—1945 гг. максимум их падает на ноябрь, минимум на май. В основном это медленные метеоры (хотя максимум последних приходится на весну, а минимум — на осень). Наблюдаются мерцающие метеоры лишь до полуночи и причина мерцания, возможно, связана с составом или формой метеорных тел (пластинка?). Характер мерцания такой же, как у сверхбыстрых пуль в воздухе.

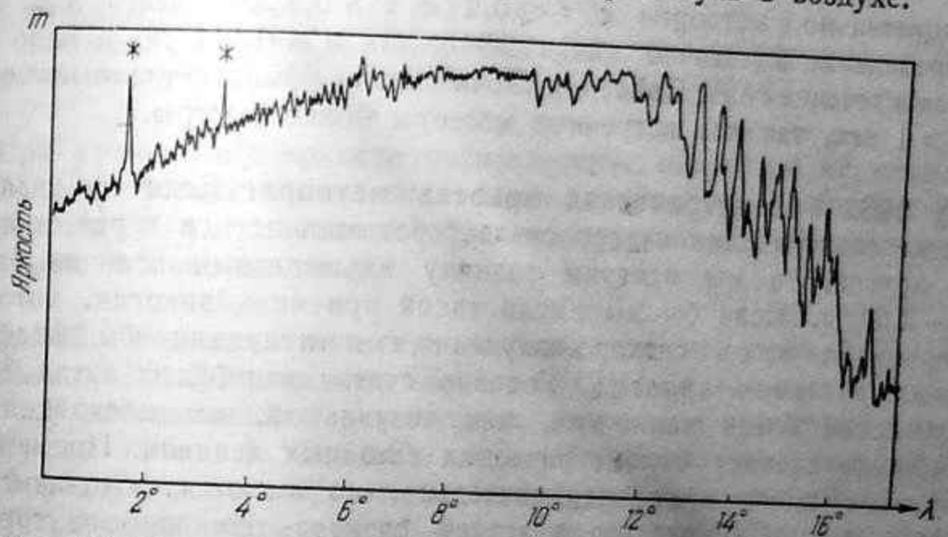


Рис. 141. Изменение яркости мерцающего метеора 2 марта 1939 г. (микрофотограмма, по Гофмейстеру).

Связь яркости с температурой установлена визуально и инструментально. Визуально при возрастании яркости мы имеем уменьшение числа оранжевых и красных метеоров и увеличение числа голубых; даже один и тот же метеор в полете меняет цвет сообразно яркости в том же смысле. Из соотношения интенсивностей линий спектров трех леонид 16 ноября 1932 г. Миллман получил при $m = -1{,}7$, $-2{,}5$ и $-3{,}0$ вел. эффективные температуры соответственно 2660, 2970 и 3220° K, т. е. метеоры «белеют» с ростом яркости.

§ 192. Длительность свечения или продолжительность полета τ оказывается связанной с яркостью. Автор из своих наблюдений 1925—1928 гг. нашел эмпирическую формулу $\lg \tau = Cm_z + D$; если τ выражать в секундах, то $C = -0{,}096 \pm 0{,}005$, $D = -0{,}17 \pm 0{,}02$, а так как m_z пропорциональна $\lg I$, то τ примерно пропорционально $\sqrt[4]{I}$. Далее, τ имеет суточную вариацию: к утру из апекса появляются более быстрые метеоры и мода τ с 0,32 *сек* смещается на 0,22 *сек*, т. е. укорачивается на 30% (обработка Х. Д. Гульмедовым ашхабадских наблюдений, 1944 г.). В течение ночи процент метеоров с $\tau < 0{,}35$ *сек* растет, а процент метеоров с $\tau > 0{,}35$ *сек* убывает соответственно с 38 до 75% и с 33 до 13% (по 2480 наблюдениям 1945 г., исследованным также Гульмедовым). Среднее распределение продолжительности

свечения по 3081 метеору в первом полугодии 1943 и 1944 гг. вне действия больших потоков следующее:

Среднее $\bar{\tau}$, *сек*	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	>1	Всего
% метеоров	1	17	41	17	8	4	2	3	1	3	3	100%

Следовательно, метеоров с $\tau < 0{,}2$ и $\tau > 0{,}8$ *сек* всего 8%. Это распределение идентично как в 1943, так и в 1944 гг. и мало меняется в течение года. После полуночи сильно убывает число метеоров с $\tau > 1$ *сек*, так как встречные метеоры более быстры.

§ 193. Болометрическая яркость метеора. Если на видимом участке спектра один метеор создает освещенность в $\varkappa$ раз больше, чем другой, то мы отметим разницу их звездных величин $\Delta m = -2{,}5 \lg \varkappa$. Если бы мы имели такой приемник энергии, который воспринимал весь спектр излучения, то получали бы видимую *болометрическую яркость*. Условно считая для белых звезд болометрический блеск таким же, как визуальный, мы построили бы аналогично систему болометрических звездных величин. Применение болометра к метеорам затруднительно, но имеются фотоэлементы, чувствительные к разным участкам спектра. Их широта гораздо больше фотографической широты. Исследование А. Н. Полуянова (Ашхабад, 1951 г.) показало, однако, что обычные фотоэлементы непригодны пока для этой цели из-за малой яркости метеоров и требуется применение фотоумножителей. В силу того, что в процессе эволюции глаз приспособился к свету Солнца, болометрическая яркость при иных температурах, чем солнечная, будет всегда меньше, так как максимум излучения будет находиться не в желто-зеленой области спектра, а вне ее.

§ 194. Радияркость метеоров определяется на экране катодного осциллографа величиной A амплитуды отражения и расстоянием r метеора и зависит от количества ионов и их концентрации α в ионной колонне, созданной метеором. Из параллельных наблюдений 1952 г. и теоретических расчетов сейчас нульпункт этой шкалы установлен удовлетворительно. Сначала вычисляется погонная плотность α электронов/*см* по формуле Ловелла — Клегга (1948 г.):

$$\alpha = \sqrt{12\pi}\left(\frac{mc^2}{e^2}\right)\frac{A}{G}\sqrt{\frac{r^3 e_0}{W\lambda}}, \qquad (99)$$

где e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, G — коэффициент направленности антенны, W — пиковая мощность, λ — длина волны и e_0 — уровень шумов. Обычно $\alpha \sim (2 \div 25) \cdot 10^{10}$ электронов/*см*, тогда $m_z = 35 - 2{,}5 \lg \alpha$ согласно Гринхоу и Хоукинсу [478], нашедших постоянный член из опыта. Если $\alpha > 10^{12}$, что бывает редко, то это выражение непригодно. Наиболее слабые метеоры при $\lambda = 8$ *м* дают $\alpha = 2 \cdot 10^{10}$, откуда их $m_z = 9{,}2$ зв. вел. Статистика (с учетом потерь) метеоров из визуальных и радионаблюдений дает разницу для m_z менее 0,5 вел. Английские данные 1948—1951 гг. приводят к следующему:

Яркость, m_z	+3	4	5	6	7	8	9 зв. вел.
Плотность, $\alpha \cdot 10^{-10}$	500	200	80	30	10	5	2 *эл/см*
Число метеоров, n	8	57	223	253	335	97	1

При уменьшении яркости распределение скоростей не меняется.

Вопрос об *электромагнитной яркости* метеоров, определяемой мощностью W их собственного радиоизлучения (гл. 28) пока может быть нами только поставлен.

§ 195. Фотоэлектрические наблюдения метеоров. В 1943 г. Гартлейн [479] (университет Корнелла, США) использовал фотоэлемент для автоматической регистрации метеоров и определения m и τ (Персеиды 1945 г.). В 1949 г. Д. Мак-Кинли построил аппарат из 19 фотоумножителей, охватывающий небесную полусферу, имея в виду регистрировать момент полета метеора и область его полета (см. рис. 48). От каждой трубки импульс подавался на экран катодного осциллографа, где и фотографировался на киноленте, протягиваемой со скоростью 100 *мм/мин* (см. рис. 49). На этой же ленте фиксировалось расстояние радиолокатором и сигнал визуального наблюдателя. Наблюдения были начаты в эпоху Геминид 12—14 декабря 1949 г. Было получено 22 полных наблюдения, причем визуальные и фотоэлектрические моменты совпадали с точностью до 1 секунды, радиоэхо иногда запаздывало до 6 секунд (пока диффузия не делала след достаточно широким для отражения волны). Фотоэлектрически регистрировались метеоры до +2,5 вел. включительно, в том числе пропущенные визуально, но отмеченные радиолокатором. Иногда более яркие метеоры фотоэлектрически не записывались (область чувствительности фотоэлемента лежала в синих лучах). Порог чувствительности определялся яркостью звезд и неба и был далек от уровня темновых шумов. Яркость метеоров оказывалась выше во второй половине пути. «Фотоэлектрический метеорный детектор» отмечал также момент полета метеора с точностью до 0,05 *сек*. В его схеме работают 140 электронных ламп. Установка Д. Л. Аставина-Разумина в Кучине дает регистрацию метеоров до +2, +3 вел. на отечественных фотоумножителях ФЭУ-19.

Еще одну установку с объективом $\Phi = 1{:}2{,}5$, $f = 250$ *мм* собрал в 1957 г. Ю. Л. Трутце в Ашхабаде. Она работает по схеме модуляции светового потока метеора, который прерывается более 100 раз в секунду, после чего принимается фотоэлементом и дает переменный ток, усиливаемый затем во много раз обычным способом.

Прибор, снабженный фотоумножителем ФЭУ-22, может отмечать метеоры до 2—3 зв. вел.

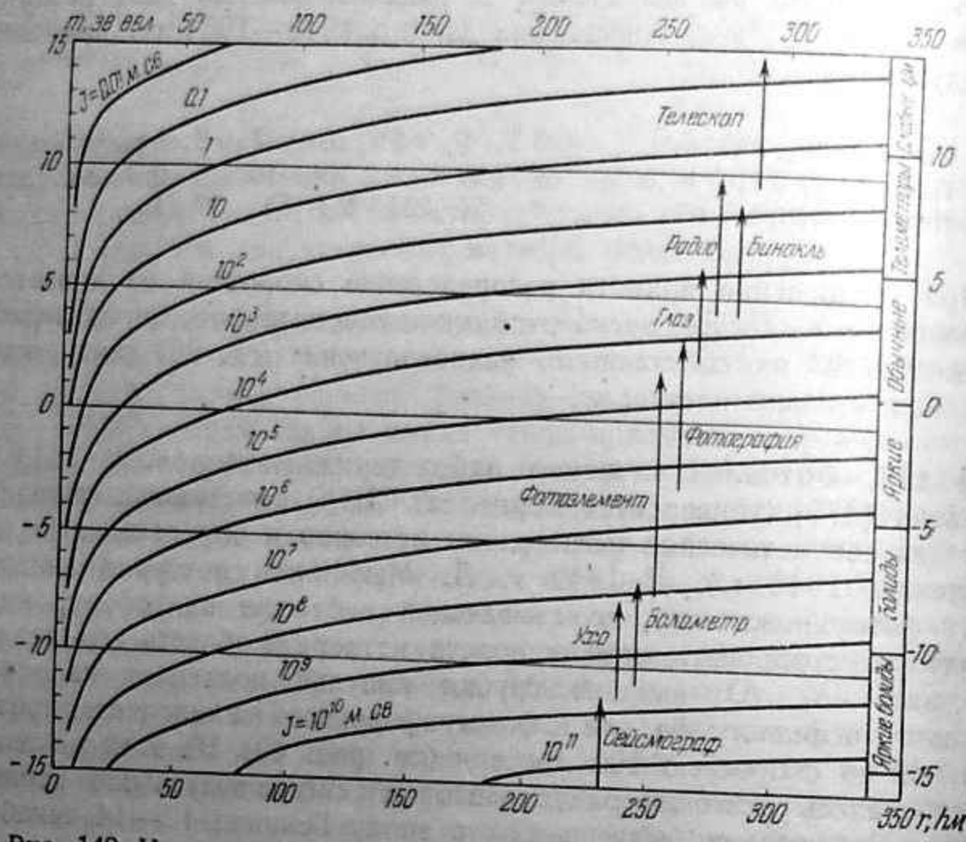


Рис. 142. Номограмма для нахождения силы света I (в международных свечах) метеоров разных классов яркости по видимой звездной величине m и расстоянию r. Стрелки указывают пределы применимости различных методов (на 1955 г.).

В заключение приведем номограмму для определения силы света метеоров и характеристику проникающей способности разных методов (рис. 142).

ГЛАВА 17

СПЕКТРЫ МЕТЕОРОВ

§ 196. Введение. На первый взгляд кажется почти невозможным получить спектр метеора, место и время полета которого неизвестно. Но эта задача решается путем длительного наблюдения и первое ее решение было дано русскими астрономами полвека назад. С тех пор получено около 240 метеорных спектрограмм и агностический тезис О. Конта из «Курса позитивной философии» о том, что «есть вещи, которые человечество никогда не узнает, как, например, химический состав небесных тел» — оказался ниспровергнутым также и по отношению к метеорным телам.

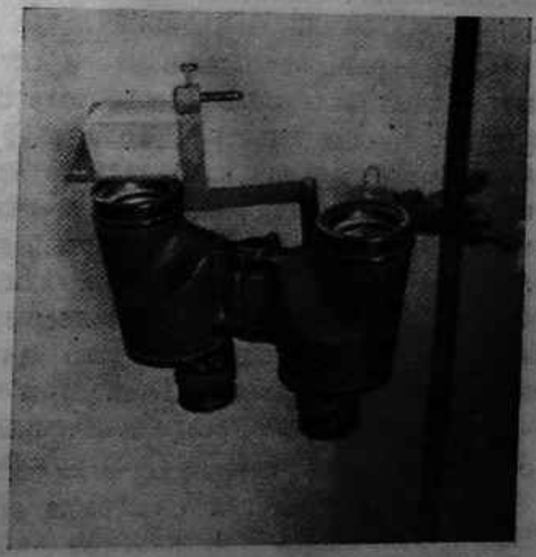


Рис. 143. Бинокль с призмой для визуального наблюдения спектров телеметеоров (Ашхабадская астрофизическая лаборатория, 1951 г.).

Характер явления требует применения метода объективной призмы; с ее помощью в прошлом веке визуально наблюдалось свыше тысячи спектров [497] и получено с тех пор основное количество спектрограмм; щелевым спектрографом получен только один спектр, да и тот случайно [486]. Этот же метод (рис. 143) позволил в последние годы рассмотреть спектры телескопических метеоров, недоступных фотографии. Дифракционной решеткой 11 августа 1950 г. получен спектр с наибольшим числом подробностей и, вероятно, ее применение в ближайшее время окажется наиболее эффективным. Советские оптики указывают на возможность изготовления единой призмы-объектива для метеорных спектрографов. Рассмотрим этапы развития изучения спектров метеоров.

§ 197. Визуальная спектроскопия. Первый спектр метеора увидел А. Гершель 18 января 1864 г. при наблюдении в окулярный спектроскоп Капеллы: метеор 0 величины пересек поле зрения. Заинтересовавшись явлением, Гершель применил комбинацию призм с полем 30°, дающих спектр в 1° длиной. Ожидая возвращения Леонид в 1866 г., Браунинг построил несколько спектроскопов прямого зрения для наблюдения одновременно двумя глазами; простейший состоял из двух 60-градусных призм, еще в 1900 г. являвшихся «полезной выдумкой» (А. Гершель [494]). В 1867 г. Браунинг добавил цилиндрическую призму, уменьшавшую угловую скорость метеора. В 1868 г. Секки, стремясь определить спектры всех небесных тел, описал также спектры метеоров. Арчимис упоминает о 800 спектрах, но в то время плохо различали метеоры от их следов и данные относятся, видимо, к этим последним, как к более продолжительным. Н. Конколи в Венгрии дал наиболее полный ряд наблюдений (1873—1883 гг.), начав его 13 октября 1873 г. с наблюдения спектра следа метеора в телескоп. След был виден 25 минут, имел три светлые линии. После этого визуальная методика уже не дала ничего нового.

Одно время полагали, что в спектрах метеоров можно увидеть свечение атмосферных газов, хотя Эрош и Врубен установили отсутствие в этих спектрах водорода; в то время сильны были ныне устаревшие воззрения на наличие в верхних слоях атмосферы преимущественно H и He, а позже — «геокорония». Уже первые визуальные наблюдения указали на линейчатый характер спектров: это доказало, что в метеоре светятся пары и газы, а не твердое или жидкое тело. Изредка был, однако, виден непрерывный спектр «ядра». Более яркие метеоры имели большое число линий. Не удавалось установить, одинаковы или различны спектры метеоров разных потоков. Из 200 спектров, лучше всего замеченных, 150 имели оранжевую линию — ее приписывали натрию с $\lambda = 5893$ Å, выделялась зеленая линия магния λ 5173; когда она была ярка, то метеор был зеленоватым. Часто отмечались две красные линии близ линии лития λ 6708, две неизвестные зеленые линии, то вместе с ними, то отдельно, у нескольких метеоров во множестве вспыхивали линии в зеленой и голубой частях спектра; именно здесь лежит большинство линий излучения веществ, входящих в состав метеоритов, в частности, мультиплета железа. Все эти данные впоследствии были полностью подтверждены фотографией, например, непрерывный спектр ядра — Е. Н. Крамером (Одесса) в августе 1952 г. и Миллманом и Куком в Оттаве в 1955 г. [493].

§ 198. Спектрографирование метеоров впервые было поставлено специально на Московской обсерватории С. Н. Блажко. «В 1904 году я построил призменную камеру с эйрископом Фойхтлендера отверстием 50 *мм* и фокусным расстоянием 300 *мм* и с призмой

кронового стекла с преломляющим углом в 45°», — пишет он [85]. Эта призма полного внутреннего отражения (от старого геодезического прибора) прекрасно сыграла свою новую роль. «Во время экспозиции первой же пластинки этим прибором 11 мая 1904 г. в поле зрения появился яркий метеор и был получен его спектр». До 1907 г. было получено еще два спектра и затем до 1920 г. работа продолжалась при каждом удобном случае, но метеоры как бы обходили камеры. Как велика здесь роль случая, видно, например, из того, что лучший из спектров Аризонской экспедиции 26 февраля 1933 г. был получен в последнюю ночь программы на последней, 788 пластинке, а фотография наиболее яркого из известных болидов (см. фронтиспис) снята 23 октября 1952 г. в Ашхабаде за несколько секунд до конца экспозиции.

С. Н. Блажко не только получил первые спектры, но и, пользуясь серией водорода и линией гелия в спектрах звезд, правильно их расшифровал: из 10 линий две принадлежали Ca II (H и K), λ 3836 триплету *Mg*, λ 4046 дублету *K*, λ 4237 также кальцию. С. Н. Блажко замечает, что интенсивность ее сильно зависит от условий свечения, что через 30 лет было использовано Миллманом для определения температуры. Другой камерой была получена прямая фотография этого метеора: визуально он был ярче 1 величины, желтый, со следом 25° в течение 3 секунд. Этими же камерами 12 августа 1904 г. С. Н. Блажко с помощью П. И. Яшнова получил спектр персеида из 13 линий. Метеор вспыхнул во второй половине пути и стал зеленым, что совпало с появлением зеленой линии таллия λ 377 mμ. Третий московский спектр 12 августа 1907 г. содержит 21 линию. Так как по соседству не было ярких звезд, то С. Н. Блажко для нахождения длин волн создал специальную теорию дисторсии призмой спектрального изображения метеора. Эта работа является классической; ныне спектры метеоров хорошо известны и с одного взгляда специалист определяет его тип и большинство линий. В итоге этих работ на протяжении почти 15 лет Московская обсерватория обладала 60% всех метеорных спектрограмм (тремя из пяти!). Две другие были получены случайно — одна при съемке звезд в Арекипе (Перу) 18 июня 1897 г. 8-дюймовой камерой с призмой, другая — там же 18 мая 1909 г. Первый спектр имел шесть линий, ошибочно приписанных водороду — пример предвзятого мнения; второй был снят 24-дюймовым астрографом и имел 53 линии, за исследование которых взялся В. Рамзай, так и не опубликовавший итога работы. Также случайно, при проведении другой работы, был получен 10 августа 1920 г. спектр метеора на обсерватории Маунт-Вилсон и в последующие годы — несколько других, в том числе в Бергедорфе 29 сентября 1924 г. [506], который по Швассману и Вахману оказался очень похожим на дуговой спектр железа.

С апреля 1928 г. было возобновлено спектрографирование метеоров на Московской обсерватории под руководством В. В. Федынского.

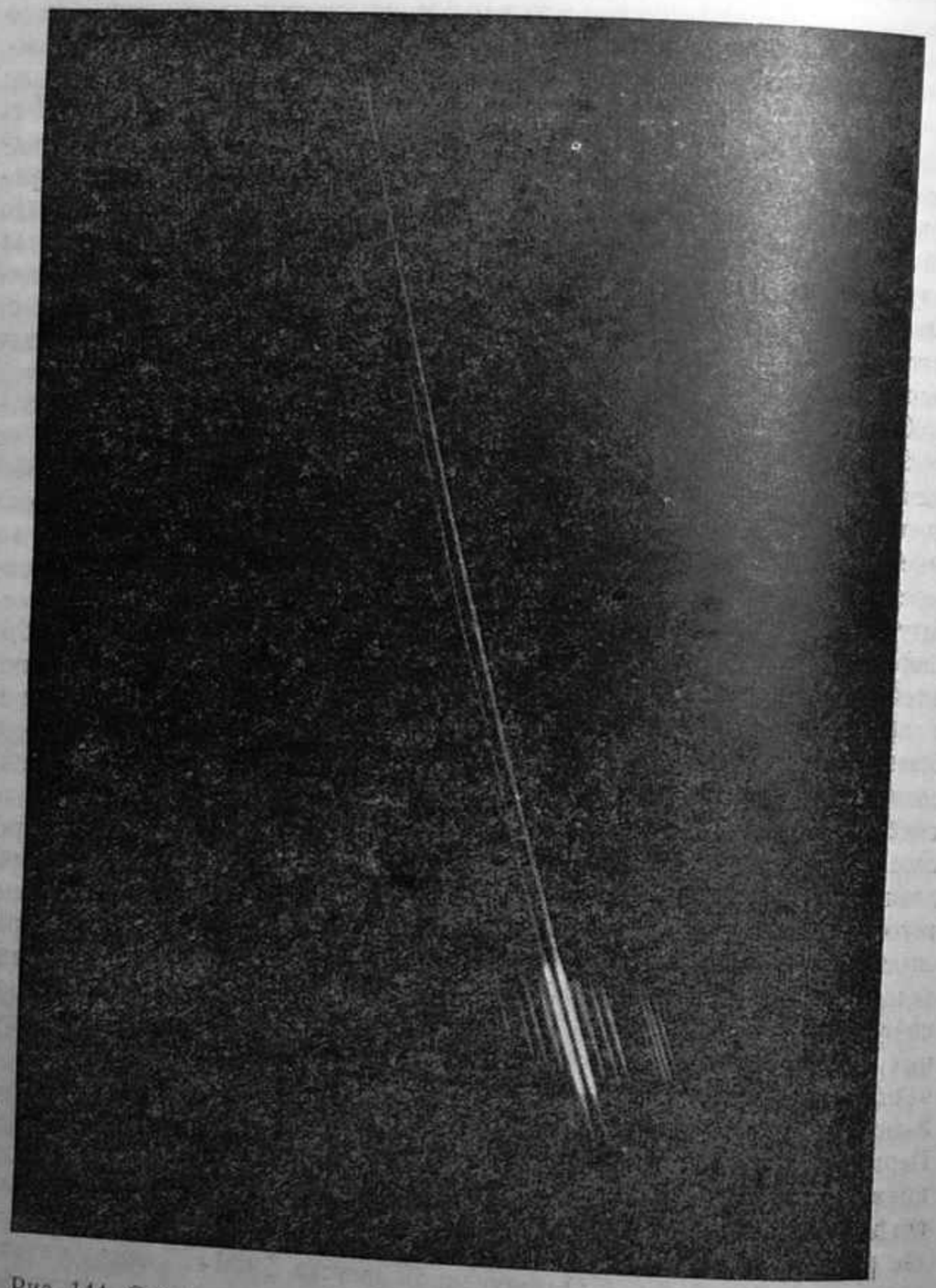


Рис. 144. Спектр метеора 12 августа 1934 г., полученный К. П. Станюковичем (МОВАГО) в Кучино. Длина яркой вспышки линий Ca II 2,8 *км* на высоте 41 *км*. Большинство прочих линий принадлежит железу.

Коллективом наблюдателей МОВАГО 12 августа 1934 г. в Кучине был получен спектр персеида из 47 линий (рис. 144), его высоты, скорость и торможение. Линии H и K ионизованного кальция были видны все время полета, а во время вспышки были видны линии железа, марганца, никеля, и, возможно, алюминия и кремния (рис. 145).

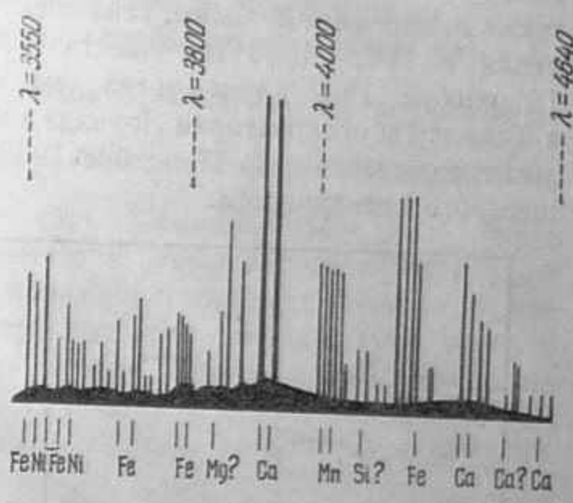


Рис. 145. Диаграмма спектра метеора 12 августа 1934 г. № XXXV (рис. 144). Несомненны Fe, Ca, Ca II, Mn, возможны Mg, Al, Si, отсутствуют K, Na, Ti, Co (по В. В. Федынскому и И. С. Астаповичу).

Метеорный патруль Сталинабадской обсерватории, построенный в 1937 г., был снабжен семью метеорными спектрографами (рис. 146); уже 19 сентября 1938 г. было получено [488] два спектра одного метеора, а в 1939—1940 гг. — еще три спектра. С 1949 г. 15 спектров было получено в Симферополе активным коллективом наблюдателей Симферопольского отделения ВАГО под руководством В. В. Мартыненко и К. А. Любарского. В 1951 г. в Ашхабаде была сделана попытка спектрографирования с применением новейшей техники (гиперсенсибилизация фотоэмульсий засветкой и проявлением, применение сверхсветосильной оптики и т. п.). Уже через полчаса после начала съемки был получен 11 августа 1951 г. первый спектр δ-акварида 0 величины из четырех линий и за несколько последующих ночей еще 8 спектров: 2 кассиопеида, 2 персеида, остальные — спроадические (рис. 147).

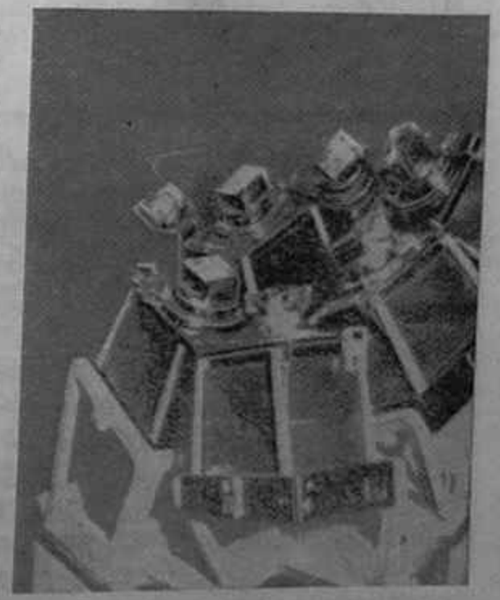


Рис. 146. Спектральный агрегат из семи камер 1:3,5, $f=105$ *мм*, призмы 45° (Сталинабадская обсерватория, 1938 г.) для получения спектров метеоров.

За рубежом систематическое фотографирование метеорных спектров было начато в ноябре — декабре 1931 г. на Гарвардской обсерватории по инициативе Миллмана, давшего ряд важных исследований в этой области. Один из спектров был найден на пластинке, считавшейся «пустой». В результате

поисков спектров на пластинках стеклянной библиотеки обсерватории обнаружен спектр, снятый еще 9 января 1913 г. и в свое время также незамеченный. Далее, семь спектров получила Аризонская экспедиция в 1932—1933 гг., шесть — Миллман в Ок-Ридже (леониды 16 ноября 1933 г.) и тогда же еще два — группа любителей в Техасе. На обсерватории Лоуэлла в Флагстаффе (Аризона) при съемке спектра свечения неба 17 ноября 1933 г. метеор влетел в поле зрения щелевого спектрографа.

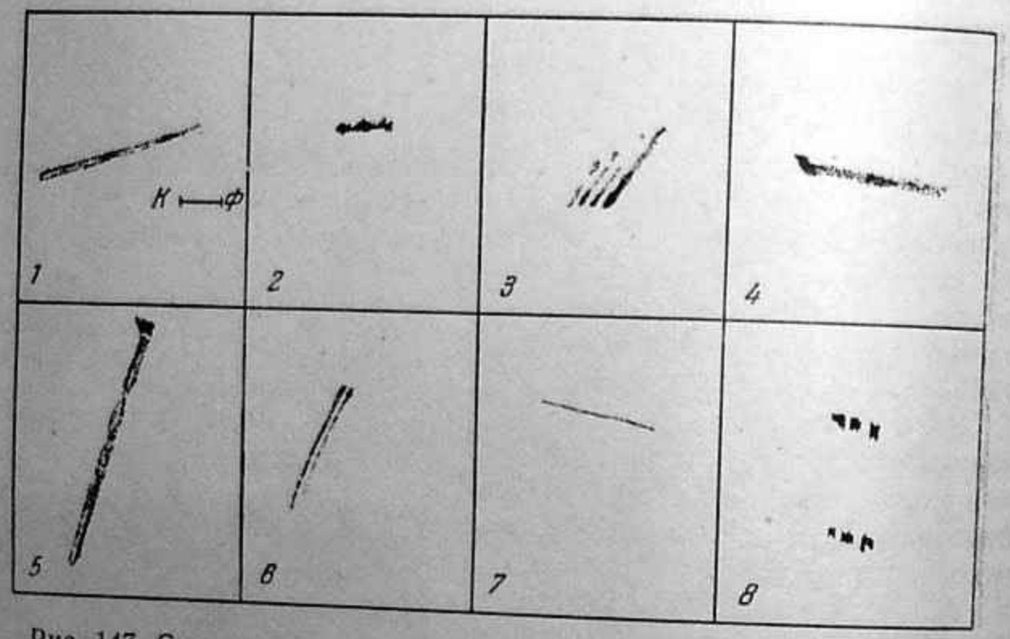


Рис. 147. Схемы некоторых слабых спектрограмм метеоров (ААЛ);
1 — 11/VIII 1951 г., персеид — 2 вел., Ca II; *2* — 10/VIII 1951 г., спорадический — 1 вел., спектр вспышки, железные мультиплеты; *3* — 11/VIII 1951 г., δ-акварид 0 вел. Ca II, Fe; *4* — 13/VIII 1951 г., персеид — 1 вел., полет вдоль спектра; *5* — 11/VIII 1951 г., каснопеид — 1,5 вел., вне фокуса, Ca? *6* — 12/VIII 1951 г., персеид — 3 вел., Ca II, Fe; *7* — 12/VIII 1951 гг. спорадический — 1 вел., полет вдоль спектра, Ca II; *8* — два спектра метеора 30/VIII 1950 г., Fe. *К—Ф* — длина спектра (λ = 396—720 *мμ*) и направление дисперсии.

В то время в эпохи больших потоков на получение одной спектрограммы требовалось 5—7 часов, а при круглогодичной съемке — 25—30 часов. Но уже во время дождя Драконид 10 октября 1946 г. Миллман получил 37 спектрограмм, показавших замечательное «фамильное» сходство, а 13 августа 1952 г. на метеорной обсерватории Минуки (Канада) репликой дифракционной решетки был получен спектр из 104 линий. В 1955 г. в Ашхабаде были получены первые цветные фотографии трех метеоров и четырех спектров; спектр 26 октября 1955 г. имеет 14 линий и по определению Миллмана содержит полосу атмосферного азота N_2^+ в красной части.

§ 199. Спектры метеоров. Из ста спектров, полученных к 1949 г. во всем мире, 53 имели по 10 линий и более. Разных линий обнаружено 64, как отдельных, так и слившихся (мультиплетов). Все они соответствуют самым низким уровням возбуждения атомов метеорного

тела, подобно свечению паров в электродуге. Более высокая степень возбуждения приводит к ионизации (разряд искры, горячие звезды). Таким образом, атомы метеора в основном электронов не теряют: возвращаясь на прежние уровни, электроны «высвечивают» квант $h\nu$, дающий появление линии $\lambda = \frac{c}{\nu}$. При $T = 7200°$ K энергия движения атома согласно уравнению $\frac{1}{2}\mu v^2 = eV = h\nu = \frac{3}{2}KT$ составляет 1 *эв* (электрон-вольт) и соответствует частоте $\nu = 2{,}25 \cdot 10^{14}$ *сек*$^{-1}$. Линия излучения $\lambda = 1340$ *mμ* будет лежать в инфракрасном спектре и мы ее не увидим. Чтобы излучение попало в оптическую область, нужна бо́льшая энергия. Поэтому спектры метеоров соответствуют уровням в несколько (2—4) электрон-вольт и представлены нейтральными атомами Fe I, Na I, Ca I, Mg I, Ma I, Cr I, Si I, Ni I, Al I. Из ионов представлены лишь Ca II, Mg II, Si II, и Fe II, т. е. ионы с низшими потенциалами ионизации.

В 1950 г. Миллман, применяя инфрахроматическую эмульсию, получил в спектре линию нейтрального кислорода O I, азота N I и, возможно, водорода H I, а в 1952 г. подтвердил наличие линии H_α (λ 6563) водорода: она принадлежит не воздуху, а метеорному телу и была найдена С. Н. Блажко еще в 1904 г. По некоторым новым данным метеорные тела могут содержать углеводороды и замерзшие газы, как и ядра комет, на возможность чего указывали одесский профессор Ф.Я. Шведов в 1881—1882 гг. и И. А. Клейбер в 1884 г. («ледяные метеориты»). Переход в 1934 г. на эмульсию ортохром, в 1940 г. на панхром и в 1950 г. на инфрахром дал последовательно желтую линию натрия λ 5893, красную линию кремния Si II, красную линию кислорода λ 7772 и линии азота и водорода. В двух метеорных спектрах обсерватории Маунт-Вилсон имеются молекулярные полосы окиси железа FeO, вызванные *колебаниями* ядер. *Вращательные* спектры молекул у метеоров замечены быть не могут, так как изменения λ при соответствующих энергетических состояниях достигают лишь нескольких *mμ*. При электронных перескоках, напротив, изменения энергии молекулы очень велики и полоса излучения, образованная колебаниями ядер под действием атомных сил, может сместиться на сотни *mμ*. Некоторые спектрограммы имеют молекулярные полосы, но они еще не изучены; их наличие указывает на не слишком большую температуру метеорного тела и на свечение не только газа, но и пара.

§ 200. Зависимость от скорости. В двадцати шести спектрах наиболее медленных метеоров драконид ($v = 23$ *км/сек*) вообще не заметны линии ионизованных атомов, а имеющиеся — соответствуют самым низким потенциалам возбуждения. В 10 спектрах более быстрых геминид (35 *км/сек*) временами появляются линии ионизованного кальция Ca II. При скоростях 40 *км/сек* начинается более заметная ионизация (визуально следы метеоров возникают при $v \geqslant 47$ *км/сек*, а для радио-

локаторов при $v \geqslant 5$ *км/сек*). Уже у персеид (61 *км/сек*) хорошо видны линии Ca II, Mg II и Si II (из исследованных 104 спектров им принадлежит 25). С ними сходны спектр орионида (68 *км/сек*) и 13 спектров леонид (72 *км/сек*).

Спектры метеоров одного потока, как сказано, обладают «фамильным сходством». Крупным потокам принадлежит 75 спектров из 104, прочие 29 — малым потокам или спорадическим метеорам. Остальные спектры пока не описаны. Из 15 метеоров, заведомо не принадлежащих потокам, у восьми нет линии Ca II, у семи других она является основной. В свое время (1935 г.) это послужило причиной деления спектров на два типа — Y и Z, т. е. на «железные» и «каменные» (рис. 148). Очень большую роль при образовании спектра играет скорость, а также состав метеорного тела. В одиннадцати спектрах заметно, как по мере полета меняется соотношение интенсивностей линий в синей и красной частях спектра, причем в 10 случаях этому соответствует переход метеора от более красного цвета к более синему, т. е. к более высоким потенциалам возбуждения. Это явно связано с постепенным повышением температуры метеора к концу полета. В одном случае картина обратная, вероятно, из-за начавшегося заметного торможения. Линии железа вызваны переходами с трех самых низких уровней энергии атома, а в целом потенциалы — ниже 6 *эв*, кроме Ca II, где он равен 9 *эв*. Еще Бонилла в Сокатекасе (Мексика) в 1885 г. визуально отметил Fe, Ni, Mg, Na и C; кроме последнего, все они были подтверждены фотографией.

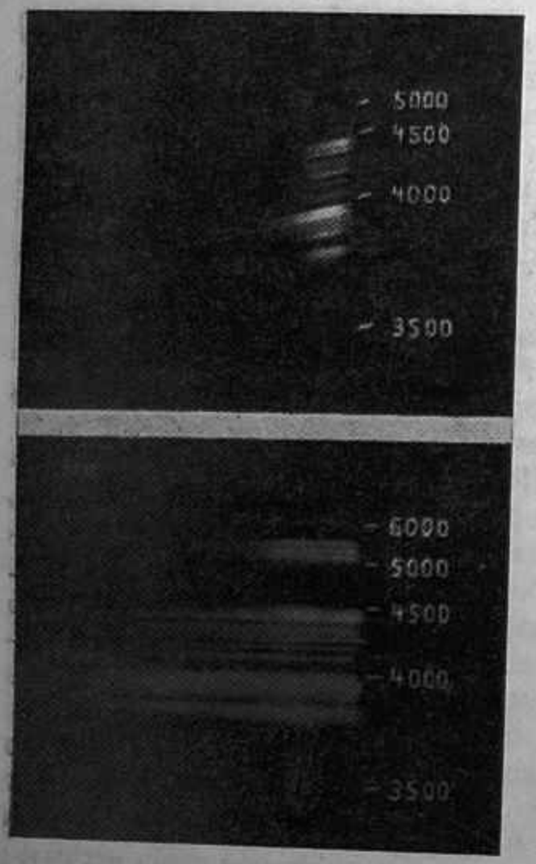


Рис. 148. Два основных типа спектров метеоров:

Вверху — тип Z, железные мультиплеты (леонид — 3 вел. 18 ноября 1935 г.); внизу — тип Y, яркие линии H и K Ca II, состав каменный (спорадический метеор 15 декабря 1931 г.) (по Миллману).

§ 201. Связь со спектрами комет и метеоритов. Если взять средний состав метеоритов, упавших на Землю [503], и для входящих в них химических элементов выбрать наиболее яркие, так называемые «последние линии» спектра (при ослаблении спектра они угасают последними), то при потенциалах возбуждения менее

6 *эв* мы получим теоретический спектр, довольно близкий к среднему спектру метеоров. Этим впервые экспериментально подтверждается справедливость мысли Хладни о принципиальной тождественности состава метеоров и метеоритов. Прямые дуговые спектры метеоритов, получаемые в лабораториях, дают такое же сходство. Поскольку спектр персеид соответствует составу каменных метеоритов, то в 1935 г. автор [486] и тогда же независимо Миллман заключили, что в составе ядра кометы 1862 III, связанной с этим потоком, присутствует материал типа каменных метеоритов (бронзит-гиперстеновые хондриты). То же относится к комете 1866 I (Леониды), а также к комете Биэлы (Андромедиды) и Джакобини — Циннера (Драконіды). В спектрах комет обычно светятся газы, выделяющиеся при нагревании каменных метеоритов, и только вблизи Солнца появляются линии металлов, соответствующие также метеоритному материалу.

§ 202. Прочие свойства спектров. При $T = 2700^{\circ}$ K тело размером 2, 10 и 20 *мм* на расстоянии 100 *км* будет иметь блеск $+5$, $+2$ и 0 вел., т. е. будет в несколько десятков раз слабее соответствующих метеоров. Таким образом, основное излучение дает не метеорное тело, а его пары и газы, что и соответствует наблюдаемому спектру (рис. 149). Только у очень медленных метеоров непрерывный спектр может составлять до 10—17% общей яркости спектра. Замечательно, что даже при взрывах, при изменении яркости метеора в десятки раз, соотношение интенсивностей линий почти не меняется. На высотах более 80 *км* до образования воздушной подушки преобладает линия Ca II, а ниже — линии железа. Визуальные наблюдения давно показывали, что на этой высоте прекращается образование

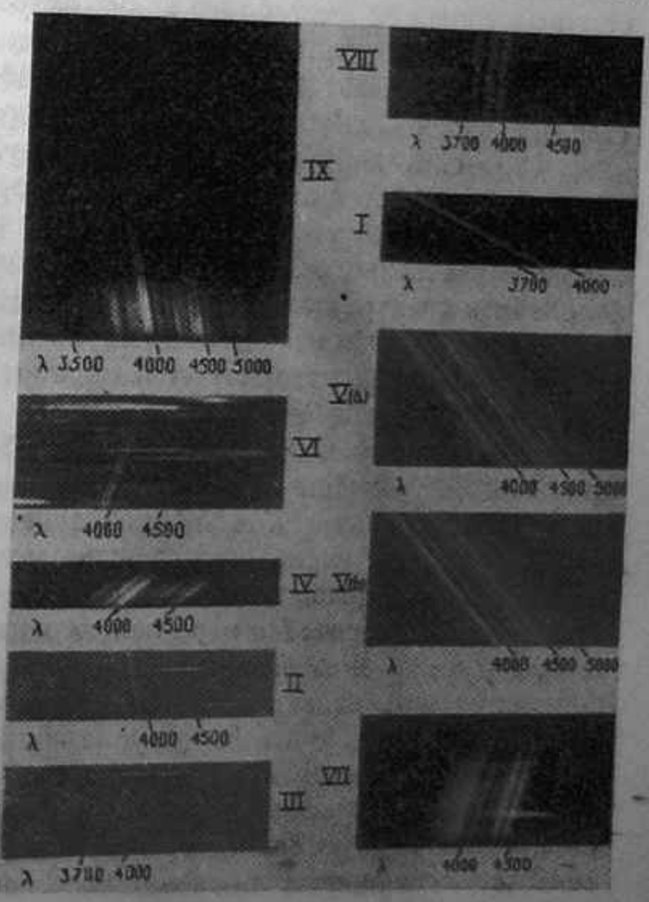


Рис. 149. Спектры первых девяти метеоров (1897—1931 гг.). Спектрограммы *II*, *III* и *IV* получены С. Н. Блажко в Москве в 1904—1907 гг. (по Миллману).

метеорного следа и метеор делается резко очерченным: встречные молекулы перестают ударяться о метеорное тело, защитившееся воздушной подушкой, и вязнут в ней. При фотографировании спектров метеоров могут выйти только яркие метеоры, так как общая яркость распределяется на большое число линий; в тех случаях, когда ее можно было определить из визуальных или фотографических наблюдений, она оказывалась от +1 до —9 вел., в среднем —2 вел., т. е. примерно на 2 вел. ярче метеоров, сфотографированных на пределе данными камерами. Как меняются спектры метеоров в течение ночи, из-за недостаточности материала мы пока не знаем. Можно думать, что к утру различие спектров усилится: в «быстрой» группе чаще будут появляться линии ионов, в «медленной» будет увеличиваться число обычных линий за счет более ярких метеоров. Спектрографирование особенно важно в комплексе с визуальными, радиолокационными, фотографическими и фотоэлектрическими наблюдениями, причем важна стандартизация снимков для целей спектрофотометрии.

В 1955 г. Аллан Кук [302] подчеркнул, что в спектрах быстрых метеоров появляется линяя λ 4481 ионизованного магния Mg II, ранее найденная в 1940 г. А. Н. Высотским [507] в спектре орионида. Линии ионизованного магния Mg II и кремния Si II впервые нашел Миллман в спектрах двух персеид 10 и 12 августа 1939 г. благодаря применению панхроматической эмульсии. На этих спектрограммах степень ионизации увеличивается на протяжении полета, что можно видеть из сравнения линий Ca II (H, K) с линией D натрия λ 5893; то же показывают и линии Mg II 4481, Sl II 3856 и 6359. В спектре орионида 20 октября 1939 г. Высотский, кроме двух последних, нашел также линию λ 4650 ионизованного железа Fe II. Расселл в 1949—1951 гг. исследовал спектры двух других персеид. При появлении они содержали лишь линии Fe I, напоминая этим спектр медленных метеоров. По мере полета ионизация увеличивалась, кроме того, она была сильнее при вспышках, где ионизованным оказывался полностью весь кальций, как об этом можно было судить по сравнению линий Ca I и Ca II. Другие вспышки однако этого не указывали. В целом можно считать, что возбуждение и ионизация растут с увеличением яркости и скорости метеора. Миллман полагает, что он получил первую спектрограмму газового следа метеора 13 августа 1949 г. в перерыве, произведенном обтюратором [502] в течение 0,05 сек. Четыре линии Fe I были видны в течение 0,01 секунды, четыре другие — на протяжении всего интервала; они принадлежали Mg I, Ca I и Fe I. Кроме того, две сомнительные линии, тоже на всем отрезке, принадлежат Fe I и Na I. Потенциалы ионизации «кратких» линий 3,2 — 4,6 *эв*, «долгих» 2,9 — 5,9 *эв*. След этого метеора имел высоту H=70 — 85 *км* с максимумом на H=83 *км*. В 1953 г. Миллман получил два спектра персеид тоже в перерыве обтюратора, которые он приписывает «хвосту» из мелких частиц. В одном случае яркость этого хвоста была сравнима с яркостью самого метеора.

В спектре хвоста не было вовсе линий ионизованных атомов (кроме H, K Ca II), а лишь нейтральные Fe I, Mg I и Ca I с потенциалами возбуждения V соответственно 2,4 — 3,0, 2,7 и 1,9 *эв*. Таким образом, в спектре следов V доходит до 6 *эв*, а у хвостов лишь до 3 *эв*. Для устранения сомнений, однако, спектр следа надо снимать *после* полета метеора.

Спектр хвоста, таким образом, похож на спектр метеора при появлении (т. е. в начале пути). Степень возбуждения и ионизации зависит от отношения размеров метеорной частицы к длине пробега атома, испаряющегося с поверхности [302]. В спектре метеора 12 августа 1952 г. по Миллману 104 линии, среди них восемь мультиплетов железа Fe II и линия H_α водорода (последний может входить в состав минералов метеорного тела). Три инфракрасных спектра Миллман получил для персеид: два слабых в 1952 г. и один яркий 14 августа 1956 г. Были найдены ожидаемые линии кислорода O I λ 7774 и несколько мультиплетов азота N I; кислород имеется и в атмосфере, и в составе метеорного тела, азот — только атмосферный. Последнему Кук и Миллман приписывают (за счет I и II положительной полосы молекулы N_2) усиления яркости в непрерывном спектре метеора 11 августа 1950 г. [302]. Наивысшие потенциалы возбуждения равны для N I—13,9, для N_2—12,1, для H I—12,0, для O I—10,9 *эв*. Для сравнения укажем, что для Si II этот потенциал равен 12,5, для Mg II 11,6 *эв*, а первые ионизационные потенциалы Mg, Si, Ca и Fe соответственно равны 7,6, 8,1, 6,1 и 7,9 *эв*. Кук и Миллман [493] для персеида 11 августа 1950 г. провели абсолютную спектрофотометрию, найдя в эргах энергию, излучаемую в отдельных линиях в спектре; например, для линий H и K Ca II получено 0,15 *эрг/см*^{2}, что дает всего $1{,}8 \cdot 10^{17}$ атомов кальция, находившихся на верхнем уровне (визуальная яркость метеора около —5 вел.).

В дальнейшем необходимо получение новых спектров метеоров и раздельно спектра ядра, оболочки и хвоста, а также спектров следов. Поскольку в создании оболочки играет роль ударная волна, то ее спектр должен существенно отличаться от спектра ядра и хвоста.

§ 203. Спектроскопические наблюдения телеметеоров. Из сказанного вытекает, что даже светосильной камерой (рис. 150) пока можно получать спектрограммы только ярких метеоров, между тем необходимо, конечно, изучать спектры также обычных и особенно телескопических метеоров. Линейная дисперсия 60-градусной призмы из стекла в области линии натрия равна $dD/d\lambda = 540$, где D — длина спектра; тогда угловая дисперсия будет $\frac{dD}{d\lambda} \cdot \frac{1}{\text{arc } 1^\circ}$. Видимый спектр с диапазоном длин волн $\Delta\lambda = 410$ *мк* $= 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ *см* будет иметь угловую длину $\Delta D = \Delta\lambda \cdot 540 \cdot 57^\circ{,}3 = 1^\circ{,}3$. Это значит, что если поставить такую призму перед объективом рефрактора, то субъективная угловая длина спектра будет в x раз больше, где x — увеличение инструмента. В этих условиях легче различить подробности.

Хотя особенно много здесь ожидать не приходилось, однако за неимением лучшего в Ашхабаде с августа 1951 г. было начато спектроскопирование телеметеоров. Проще всего было помещать призму на бинокль (см. рис. 143), при этом длина спектра составляла 8—10°. В наблюдениях приняло участие несколько человек. По 1954 г. описано несколько десятков спектров [491]. Оказалось, что часто у слабых метеоров 7—8 величины была видна только одна линия, как будто никакой призмы не было. По-видимому, это линия кальция Ca II (H, K); у метеоров 6—7 величины часто вспыхивали 2—3 линии, более яркие метеоры давали несколько линий, разделенных темными промежутками, в 15% случаев был виден непрерывный спектр, обычно он вовсе отсутствовал. Хвосты более ярких метеоров состояли из тех же линий, но ослабленных.

Рис. 150. Метеорный спектрограф с объективной призмой конструкции Н. И. Гришина (Москва, МОВАГО). 1:2, $f = 125$ *мм*, призма 15°.

§ 204. Спектры искусственных метеоров. Уже в 1947 г. Р. Вуд писал [509] о спектрах металлических частиц, выбрасываемых направленным взрывом. В 1952 г. были описаны [508] семь спектрограмм металлических ультрапулек: трех алюминиевых, двух магниевых, одной титановой и одной из сплава Mg, Li и Al. Их скорости были соответственно 5,0, 5,9, 4,5 и 6,0 *км/сек*. Развивая силу света до $3 \cdot 10^4$ *м.св*, они давали хорошие полосчатые спектры окислов AlO, MgO и TiO_2, затем линии магния, резкую линию лития и для сплава — непрерывный спектр, в котором линии MgO оказались слабыми. Хотя при полете Al полностью сгорал в воздухе, однако свечение AlO еще продолжалось, так как молекула находилась в возбужденном состоянии. Следовательно, возникали спектры трех типов: непрерывный, полосчатый и линейчатый. Прежде всего, выступала зависимость спектра от состава пульки. По интенсивности AlO температура оказалась $T = 4100°$ K, свечение длилось 0,1—0,2 *мсек*, линии атмосферных газов в спектре отсутствовали. Получалось так, как если бы удары встречных молекул воздуха повышали температуру поверхности пульки до стадии плавления или испарения, после чего сорванный металл соединялся с кислородом воздуха и давал окисел.

§ 205. Спектры метеоров СССР. Таблица 6 (стр. 309—311) содержит спектры метеоров России и СССР, полученные за первые полвека их изучения [487].

Таблица 6

Спектры метеоров СССР (1904—1957 гг.)

№	Международное обозначение	Дата	Пункт	Наблюдатель	Принадлежит к потоку	Зв. вел.	Число линий
1	II	1904 V 11	Москва	Блажко	Вирginид?	—3	17
2	III	1904 VIII 12	»	Блажко, Яшнов	Персеид	—3	13
3	IV	1907 VIII 12	»	Блажко, Полак	Персеид	—4	22
4	XXXV	1934 VIII 12	Кучино	Станюкович, Затейщиков	β-Кассиопеид	—3	47
5	XL	1936 VIII 11	Пиршаги (Апшерон)	Станюкович, Затейщиков	Спорадический	—2	—
6	XLI	1936 VIII 14	»	»	Персеид	—2	15
7	XLII	1937 VIII 4	Кучино	Ситник	Персеид?	0	6
8	XLVIa	1938 IX 19	Сталинабад	Бахарев	Спорадический	—3	8
9	XLVIb	1938 IX 19	»	»	»	—3	—
10	LIIIa	1939 IX 20	»	»	»		14
11	LIIIb	1939 IX 20	»	»	»		—
12	—	1940 VIII 13	»	»	Персеид	—	—
13	—	1949 X 27	Ашхабад	Музафаров	Орионид	—2?	4
14	109	1950 VIII 19	Симферополь	Гришин	Персеид	—2	20
15	110	1951 IV 20	Ашхабад	Любарский	Лирид	—1	2
16	111	1951 VIII 11	»	Астапович	δ-Акварид	0	4

№	Международное обозначение	Дата	Пункт	Наблюдатель	Принадлежит к потоку	Зв. вел.	Число линий
17	112	1951 VIII 11	Ашхабад	Астапович	β-Кассиопеид	—1,5	2
18	113	1951 VIII 11	»	»	Персеид	—2	2
19	123	1951 VIII 11	Одесса	Крамер	»	—4	6
20	114	1951 VIII 12	Ашхабад	Астапович	»	—3	3
21	115	1951 VIII 12	»	»	Цетид?	—3	2
22	116	1951 VIII 13	»	»	Спорадический	—1	2
23	117*а*	1951 VIII 30	»	»	β-Кассиопеид	—1,5	6
24	117*б*	1951 VIII 30	»	»	»	—1,5	5
25	118	1951 VIII 30	»	»	Спорадический	—1	6?
26	—	1952 VIII 8	Одесса	Крамер	Персеид	—2	2?
27	—	1952 VIII 9	Симферополь	Любарский	»	0	2
28	127	1952 VIII 11	»	»	»	—1	3
29	130	1952 VIII 18	»	»	»	—1	3
30		1953 V 12	Одесса	Крамер	Виргинид?	—5	18
31	—	1953 VII 20	»	»	Спорадический	Болид	11
32	—	1953 VIII 12	Симферополь	Любарский	Персеид	—1	?
33	—	1953 VIII 12	»	»	»	0	2
34	—	1953 VIII 12	»	»	β-Кассиопеид	0,5	2
35	—	1953 VIII 12	»	»	Персеид	—1	3
36	—	1953 VIII 12	»	»	»	0	2
37	—	1953 VIII 12	Кучино	Аставин-Разумин	»	—2	7
38	—	1953 VIII 13	»	»	»	—6?	10
39	—	1953 VIII 13	Одесса	Крамер	Персеид	—2?	4
40	—	1953 XII 13	»	»	Геминид	—4?	24
41	—	1953 XII 13	»	»	»	—3?	6
42	—	1953 XII 13	»	»	Геминид	—3?	5
43	—	1955 VIII 13	Ашхабад	Любарский	Персеид	—0,5	2
44	—	1955 VIII 20	»	»	Спорадический	—1	?
45	—	1955 VIII 20	»	»	»	0	?
46	—	1955 VIII 22	»	»	β-Кассиопеид?	—1	?
47	—	1955 X 16	»	Трутце	Орионид	—1	2
48	—	1955 X 18	»	Симоненко	»	—2	3
49	—	1955 X 18?	»	Родионов	Спорадический	—1	2
50	—	1955 X 26	»	Насыров	Орионид	—4	14
51	—	1956 VIII 7	Одесса	Крамер	Персеид	—	9
52	—	1956 VIII 8	»	»	Спорадический	—	7
53	—	1956 VIII 9	»	»	Персеид	—	5
54	—	1956 VIII 11	»	»	»	—	10
55	—	1956 VIII 11	Симферополь	Мартыненко	Спорадический?	—	7
56	—	1956 VIII 11	»	»	Персеид	—	2
57	—	1956 VIII 11	»	»	»	—	3
58	—	1956 VIII 11	»	»	»	—	2
59	—	1956 VIII 11	»	»	»	—	2
60	—	1956 VIII 11	»	»	»	—	5
61	—	1956 X 7	Одесса	Крамер	Спорадический	—	32
62	—	1957 I 4	Симферополь	Клюкина	Квадрантид?	—10	12

Примечания: **1.** Оценка яркости по негативу Московской обсерватории. **2.** То же, см. [492]. **3.** Как и оба предыдущие, исследован С. Н. Блажко. **4.** Спектр изучен В. В. Федынским и автором, в пределах 355—464 *мμ* несомненны Ca, Ni, Mn и Fe, возможны Al, Si, отсутствуют K, Mg, Ti и Co. Спектрограф 1 : 3,8, $f = 135$ *мм*, призма крон 60°. Потенциалы возбуждения 3,9—9,2 *эв*, при взрыве 3,6. **5.** Апшеронская экспедиция МОВАГО, камера 1 : 3,5, $f = 105$ *мм*, призма 60° увиоль, метеор перпендикулярно к ребру, смазал спектр. **6.** Там же, камера 1 : 3,8, $f = 135$ *мм*, более яркие линии Ca II и Fe I; Малая Медведица. **7.** Получен случайно в области αβ Большой Медведицы при съемке кометы Финслера, часть пути была видна в гид, метеор весьма яркий, под углом 30° к горизонту прошел налево вниз, камера 1 : 4,5, $f = 700$ *мм*. Спектр из пяти линий близ головы кометы, крайне слабых, H, K кальция и спектр железа. **8.** Получен при случайной задержке после окончания работы, вышел на двух пластинках патруля (см. 9). **10—11.** На двух пластинках спектрального патруля. **12.** Слишком слаб для обработки. **14.** Исследован А. М. Бахаревым, яркие линии Ca II, много линий Fe *I*, есть Cr I и Mn I, возможно Co I и Ni I; визуально метеор желтоват, 35°, два взрыва, второй вуалирует спектр. **15.** Этот спектр и последующие три очень слабы, призма крон 45°, «Зоннар» 1 : 1,5, $f = 50$ *мм*, четыре камеры. **16.** Железный спектр, Ca II нет. **17.** Только H и K, Ca II. **18.** То же. **19.** Камера ФЭД со школьной призмой, Ca II и Fe I. **20.** H и K, Ca II. **21—23.** Слабы, линии Ca II. **23—24.** Два спектра одного метеора — идентичны. Линии Ca II и мультиплеты Fe I. **23, 25.** На одном негативе. **23, 44—46.** Полет вдоль спектра. **26.** Линии H и K Ca II. **27.** Дублет Ca II и, видимо, мультиплеты Fe I. **29.** Вначале три линии, при взрыве 8—10. **30.** Спектр метеорной вспышки, H и K, фон — непрерывный спектр. **30—31, 39—42, 51—54, 61.** Английские камеры с объективами $D = 24$, $f = 125$ *мм*, призмы 12° из флинта. **34—35, 43.** Очень слабы. **37—38.** Исследованы Д. Л. Аставиным-Разуминым, см. [484]. **47—50.** Цветные спектры, основной фиолетовый (на негативе лимонно-желтый) дублет H, K Ca II, **50** также Fe, Na и N_2^+, получен камерой 1 : 2, $f = 125$ *мм* (рис. 150), пленка 700° X и Д. **55, 57, 58, 60.** Линии H и K. **61.** Болид, около 25 вспышек, хорошо выделяется непрерывный спектр. **62.** Линии Fe, Mn? Три метеора **(8—9, 10—11, 23—24)** оказались спектрографированными дважды.

ГЛАВА 18

ЦВЕТ, ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕТЕОРОВ

§ 206. Введение. Ни одна характеристика метеоров не отмечается так неуверенно, как цвет: это касается и двойных звезд, и метеоров. Только у 60% людей восприятие цвета более или менее согласно и потому считается «нормальным», у остальных оно сильно отклоняется от «нормы», что обнаруживается обычно случайно и сильно осложняет обработку наблюдений. Общее название неправильного цветовосприятия — дальтонизм: чаще всего не воспринимаются крайние концы спектра, красный (обычно с зеленым), синий (с желтым); гораздо реже встречается собственно дальтонизм — «фотографическое зрение», когда цвета представляются разными оттенками серого. Для проверки кривой цветовосприятия глаза $E_\lambda = f(\lambda)$ нужен спектрофотометр, но проще псевдоизохроматические таблицы, на которых цветно-слепые одного типа не различают одних знаков, а другого типа — других.

§ 207. Некоторые понятия из колориметрии. Попытки создать систему цветов восходят к И. Ньютону. Требования промышленности (красители), полиграфии, искусства — сразу натолкнулись на физиологические трудности. Потребовалось создание колориметрии — науки о цвете, определяемом независимо от субъективного впечатления. В астрономии было введено понятие «показателя цвета», как разности звездных величин, воспринимаемых двумя разными приемниками излучения с различными кривыми $f(\lambda)$. За основу проще всего было взять цвета спектра Солнца, хотя некоторые цвета (пурпурный, серый, малиновый) в нем не представлены, а другие могут быть получены неоднозначно (например, зеленый — как таковой и как смесь желтого с синим). Условимся называть *чистым* спектральным цветом фиолетовый при $\lambda = 410$ *мμ*, синий — при 440 *мμ*, голубой при 470 *мμ*, зеленый — при 520 *мμ*, желтый — при 580 *мμ*, оранжевый — при 600 *мμ*, и красный — при 650 *мμ*. Крайними границами будут λ 390 и 750 *мμ*. Опыт показывает, что всякий цветной световой поток Φ дает то же ощущение, что и поток чистого спектрального цвета Φ_λ с примесью потока $\Phi_б$ чисто белого цвета, так что $\Phi = \Phi_\lambda + \Phi_б$. Тогда $p = \Phi_\lambda/\Phi$ называется *чистотой* (насыщенностью) цвета.

Насыщенные монохроматические цвета имеют $p=1$; с уменьшением p растет белесоватость. Из-за свойств глаза очень слабый желтый, оранжевый, красный и пурпурный цвета кажутся соответственно оливковым, кирпичным, шоколадным и гранатовым; такие оценки действительно имеются в описаниях цветов двойных звезд. Черный цвет соответствует $\Phi=0$, т. е. отсутствию света. Световой поток Φ, цветовой тон λ и насыщенность p вполне определяют цвет, например, у Солнца $p=0\%$, у керосиновой лампы $\lambda=592$ $m\mu$, $p=85\%$, у полуваттной лампочки 584 $m\mu$ и 45%, у электродуги 584 $m\mu$ и $33—41\%$, у ацетиленового пламени 585 $m\mu$ и 64%. В трехмерном пространстве Φ, λ, p можно рассматривать как координаты точки некоторого «цветового тела»; для их нахождения служат колориметры.

§ 208. Визуальные методы определения цвета метеоров. 1) Метод сравнения. Обычно цвет метеоров определяется по сравнению с цветом звезд, находящихся на той же высоте, чтобы исключить покраснение, вызванное атмосферой и хорошо заметное близ горизонта (например, при восходе Солнца и Луны). Уже в 1930 г. В. В. Федынский [237] составил специальный каталог звезд для этой цели. Он отметил, что цвет метеора определяется набором спектральных линий его спектра, поглощением в его оболочке и атмосферным поглощением. Практически цвет удобно определять по шкале Остгоффа (белый 0^c, желто-белый 2^c, желтый 4^c, красный 7^c, голубые цвета — 1^c, — 2^c), так как особенные цвета (зеленый, фиолетовый, синий, розовый, бирюзовый) довольно редки.

Как показал Б. М. Машбиц [524а], у каждого наблюдателя существует «излюбленный» цвет, которым он охотнее пользуется, и есть цвета, никогда им не используемые. Чтобы найти более правильный результат, можно рассмотреть процентное распределение метеоров по цвету для нескольких наблюдателей, образовать простое среднее; оно будет ближе к истине, а разница между ним и распределением для данного наблюдателя даст ту поправку, которую следует вводить в его наблюдения. Если наблюдается один и тот же метеор, то из коллективных наблюдений поправку цвета найти еще легче. Особенно это удобно при массовом наблюдении болида: представление о его цвете можно получить, подсчитав, сколько оценок было одним оттенком, сколько — другим и т. д. Этот метод иногда применяется для описания цвета Луны во время затмения или солнечной короны. В некоторых пределах шкала Остгоффа позволяет образовывать усредненный балл по нескольким оценкам. Если метеор менял цвет в полете, то учет этого позволяет устранять кажущиеся противоречия в оценке цвета.

2) «Метод дальтоников» применим тогда, когда хотя бы один наблюдатель имеет пониженную цветовосприимчивость к красному или синему. Пусть отмечается не цвет, а яркость метеора.

Условимся для белого метеора считать ее одинаковой у дальтоника и нормального наблюдателя. Тогда, в случае пониженного восприятия, например, красного цвета, яркость красного метеора может быть ниже, как показывает опыт, на несколько десятых звездной величины. Автор проводил испытания с двумя дальтониками — красно-слепым и сине-слепым. Несколько десятков наблюдений метеоров уже характеризовали их цвет (более синий, чем белые звезды). Когда в 1934 г. появилась Новая Геркулеса, то пока она была белой, оценки ее яркости у обоих наблюдателей вполне совпадали; при покраснении звезды они стали систематически расходиться.

§ 209. Полуинструментальные методы. 1) Телескопические наблюдения. Простым глазом можно видеть цвет метеора только до 3 величины (кроме красного). Гораздо легче цвет определяется в телескоп, который, кроме того, дает возможность видеть цвета метеоров слабее $+3$ величины (бинокль до $+5$, бинокуляр до $+8$ величины и т. д.).

2) Метод светофильтров по существу использует принцип «метода дальтоников»; наблюдения ведутся через окрашенные светофильтры, например, красный и синий. При этом определяется яркость метеоров относительно известных (белых) звезд (типа A0 — B9). Метод применяли в 1939 г. А. М. Бахарев и Г. О. Затейщиков в Сталинабаде, в 1942 г. В. Е. Штепан и М. Е. Набоков в Ульяновске и в 1950 г. Е. Н. Крамер и автор в Ашхабаде. Через желтый фильтр метеоры оказывались ослабленными по сравнению с белыми звездами; таким образом, в метеорах более сильно излучала синяя часть спектра, они голубее белых звезд. Еще в прошлом веке было известно, что среди метеоров сравнительно мало красных.

§ 210. Инструментальные методы. 1) Метод светофильтров. В предыдущем методе заменим глаз фотопластинкой, примем блеск белых звезд условно одинаковым на обоих негативах, звездные величины метеоров определим относительно этих звезд. Тогда разность звездных величин даст *специальный показатель цвета*. Если съемка велась в фотографических и визуальных лучах, то разность полученных звездных величин $m_p - m_v$ есть *показатель цвета*. Например, 7 сентября 1942 г. Классен снял через три светофильтра $\lambda=390$, 446 и 630 $m\mu$ тремя камерами метеор, для которого специальный показатель цвета оказался $+1^m,85$, т. е. метеор следовало считать красным. Сравним фотографические яркости метеоров с визуальными: 16 ноября 1932 г. Миллман снял три леонида, средняя фотографическая звездная величина m_p оказалась на $1^m,8$ меньше визуальной m_v, т. е. показатель цвета $m_p - m_v = -1^m,8$, иначе говоря, леониды «синее» самых горячих звезд неба, очевидно, за счет окрашивания

фиолетовой линией H, K (при $T=\infty$ у звезд предел $m_p - m_v = -0^m,64$).

2) Специальный показатель цвета. Ввиду того, что предыдущий метод связан с потерей яркости на 2—3 величины из-за поглощения в светофильтре, можно следовать примеру Н. Н. Сытинской, использовавшей пластинки разных эмульсий — обычную (несенсибилизированную) и ортохроматическую. Зная их спектральные характеристики $E_\lambda = f(\lambda)$, можно получить специальный показатель цвета.

3) Метод интегрирования спектральных линий основывается на том, что, зная функцию E_λ пластинки, можно по спектру метеора и белой звезды сравнения, суммируя все $E_\lambda d\lambda$, найти цвет метеора. Автор применил этот метод для спектра метеора 12 августа 1934 г. По сравнению со спектром Солнца в метеоре была более интенсивна синяя часть; метеор следовало отнести к белым или голубоватым.

4) Метод продольного астрографа. Из-за аберраций фокальные изображения звезд окружены ореолом лучей, не попавших в фокус. Изучая распределение яркости в таком ореоле, Г. А. Тихов (1907 г.) обнаружил, что оно зависит от показателя цвета. С. Н. Блажко в 1932 г. также заметил, что метеор 12 августа 1907 г. при взрыве оказался с ореолом ультрафиолетовых лучей, не собравшихся в фокусе, для которого был исправлен объектив. Белая и красная звезда при фокусировке, соответствующей наибольшему числу звезд, дадут соответственно сильный и слабый ореол вокруг размытого либо резкого ядра. Таким образом, метеор 12 августа 1907 г. следует считать синеватым. В другом случае в 1940 г. метеор —5 величины был снят на эмульсии панхром без фильтра, причем белые звезды имели ядро, созданное красными лучами, окруженное «голубой цитоплазмой». «Цитоплазма» метеоров оказалась более интенсивной, чем у звезд типа O — *B*0 того же блеска, что дало бы температуру $T = 100\,000°$ K (для абсолютно черного тела). Это не соответствует, конечно, реальности и вызвано окрашиванием той же линией Ca II [500, 533].

5) Метод цветовой температуры. В 1946—1950 гг. Миллман для пяти метеоров от 0 до —5-й величины (2 драконида, 2 персеида и 1 спорадический) определил отношение яркости красно-желтой (500—670 *мμ*) и сине-фиолетовой (370—500 *мμ*) частей спектра; за эталон бралась Вега. При этих яркостях даже метеоры с $v = 16$—32 *км/сек* были такими же белыми, как Вега, а при 48—64 *км/сек* они казались сначала желтее, чем Вега, а затем становятся синее любой звезды из-за той же линии Ca II.

6) Метод цветной фотографии. Мы уже знаем, какую следует соблюдать осторожность во избежание нарушения цветопередачи при съемке, обработке и особенно печатании. Для контроля следует производить на той же пленке снимки известных источников и серой шкалы. Лучше получать цветной негатив метеора и звезд и истинные цвета находить как дополнительные, или применять эмульсию с обращением.

§ 211. Понятие температуры метеора. Физика различает несколько понятий температуры: *газокинетическую*, определяемую, как меру скорости v атома или молекулы массы μ из выражения $\frac{1}{2}\mu v^2 = \frac{3}{2}\mu RT$, *цветовую* из закона смещения Вина $\lambda_m T = \text{const} = 0{,}29$ *мμ* · град., *температуру излучения*, определяемую из закона Стефана — Больцмана $E = \sigma T^4$, *электронную* температуру и др. При этом предполагается, что имеет место термодинамическое равновесие и справедлив закон излучения черного тела. Но реальные источники показывают уклонение от этого закона и поэтому дают «серое» излучение (угольная нить накаливания) или «селективное» излучение (газокалильный колпачок). Считая, что наблюдаемое распределение энергии E_λ по λ соответствует излучению черного тела с температурой T, эту температуру T называют «эффективной». Следовательно, эффективная температура T_e есть температура абсолютно черного тела, находящегося в термодинамическом равновесии и имеющего наблюдаемое распределение энергии в спектре излучения E_λ. Например, Солнце имеет цветовую температуру $T = 6500°$ K, а эффективную $T_e = 5750°$, ацетиленовое пламя соответственно 2360 и 1730°.

В метеоре термодинамическое равновесие и, вероятно, «черное излучение» отсутствуют и в элементарном объеме его могут находиться частицы, движущиеся с самыми разнообразными энергиями. Мы уже встречались с явлением термодинамического парадокса. Он имеет место в газовых туманностях, солнечной короне, верхних слоях атмосферы и т. д. С газокинетической точки зрения температура метеора $T = \frac{v^2}{3K}$ при $v = 90$ *км/сек* будет 1 200 000° K. Это может иметь место до образования воздушной подушки в точке удара встречной частицы воздуха с поверхностью метеорного тела. При возникновении подушки энергия удара передается частицам этой подушки и после примерно 30 соударений скорость встречной частицы становится тепловой; для этого потребуется на $H = 80$ *км* около 10^{-5} *сек*. Теория взрывов и неустановившихся процессов имеет дело с подобными явлениями. Хотя закон Вина в данном случае неприложим (он выведен для непрерывного спектра), но поскольку в метеоре излучают одновременно сотни линий, то при возбуждении более высоких уровней в общем максимум энергии переходит к более коротким волнам и возникает некое подобие закона Вина, нарушаемого действием отдельных ярких линий. Поэтому с возрастанием скорости и яркости метеор становится белее. Можно определить эффективную температуру метеора по соотношению интенсивностей спектральных линий в красной и синей частях спектра (рис. 151),

выводимых в предположении наличият еплового равновесия в метеоре. Приводим данные Миллмана:

Метеор	№ спектра	$\frac{H+K}{\lambda 4227}$	$\frac{\lambda 4050}{\lambda 3850}$	T_e	Зв. величина (виз.)	След
1932 XI 17	22	4,5	0,6	1870° K	—	?
XI 16	16	7,0	0,8	2660	—1,7	был
XI 16	15	13,5	1,7	2970	—2,3	80 *сек*
XI 16	19	14,0	1,7	3220	—3,0	180 »

Следовательно, с увеличением яркости растет интенсивность возбуждения атомов кальция и железа и длительность ионного следа. Из визуальных наблюдений нами установлено, что медленные метеоры

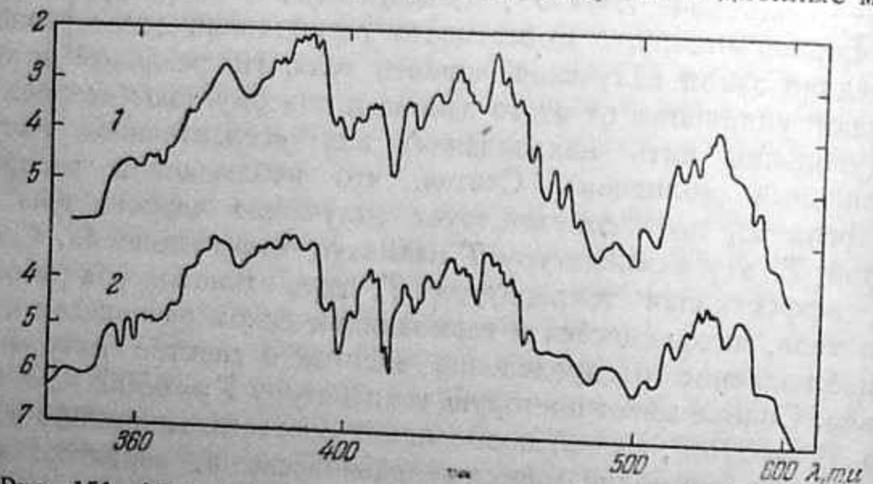


Рис. 151. Интенсивность железных мультиплетов в спектре метеора — 9 вел. 26 февраля 1933 г.:

1 — во время 1-го взрыва на высоте 75 *км*, *2* — после 4-го взрыва на высоте 67 *км*. Доказательство изменения температуры при полете (по Миллману).

(например, Андромедиды, Драконіды) кажутся красноватыми при яркости 3 вел., желтыми при 0 вел, а при —3 вел. белыми и даже голубоватыми. Таким образом, более яркие метеоры кажутся белее не только из-за явления Пуркинье, но и потому, что у них действительно больше синих лучей. Однако примесь излучений натрия может сделать белый метеор желтым. Мультиплеты железа, триплет хрома λ 5206 или совместное действие линий H, K кальция и D натрия окрасят его в зеленый цвет. Так как красную окраску трудно приписать одному элементу, то она определяется рядом линий с низкими потенциалами возбуждения, для чего нужна малая скорость. Поэтому медленные метеоры красноваты, согласно естественной «шкале охлаждения» (голубой → белый → желтый → красный). Применение «красителей пламени» встречается уже в пиротехнике [522], рассматривающей также температуры пламенных составов, атомарное и молекулярное свечение разных видов пиротехнического пламени и их оптические характеристики.

Если бы удалось измерить излучение E с 1 $см^2$ поверхности метеорного тела, то соответствующая ему из закона $E = \sigma T^4$ температура

была бы *температурой излучения*. Если учесть атмосферное поглощение и выбрать нульпункт по звездам-гигантам, то звездная величина метеора в этой системе будет *болометрической*. Если поглощение не учитывать и за звезды сравнения брать тип *A0*, то получим *радиометрическую* шкалу.

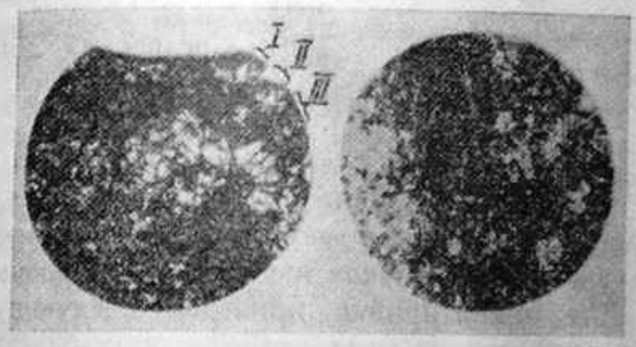


Рис. 152. Слева — строение коры плавления каменного метеорита Моч. Зоны: *I* — плавления, *II* — всасывания, *III* — импрегнации. Увеличение 9× (по Чермаку).

Справа — строение черной жилки того же метеорита, возникшей в результате проникновения вещества расплавленной наружной пленки по трещинам внутрь метеорита под атмосферным давлением. Увеличение 30× (по П. Н. Чирвинскому).

Рис. 153. Разрез железного метеорита Шарлотта (Теннесси, США). Видна зернистая структура — результат отжига приповерхностного слоя при прохождении сквозь атмосферу. Увеличение 1,5×.

§ 212. Температура метеорных тел вне Земли. Черный шарик на расстоянии r астр. ед. от Солнца, получающий от него энергию и затем переизлучающий ее, в случае установившегося теплового равновесия будет иметь $T = \frac{288°}{\sqrt[4]{r}}$. Таким образом, метеориты, попавшие с дневной стороны Земли, не могут быть холодными. На ночной стороне в тени Земли охлаждение метеорных тел происходит очень быстро и за время пребывания метеорного тела в конусе тени Земли (не менее 1,5 минут при $z_\odot = 180°$) его температура упадет на несколько десятков градусов и более. Известен случай, когда метеорит Дхурмсала после падения покрылся инеем. Изучение структуры упавших метеоритов указывает, что они нагревались только снаружи (рис. 152—154) при движении в атмосфере.

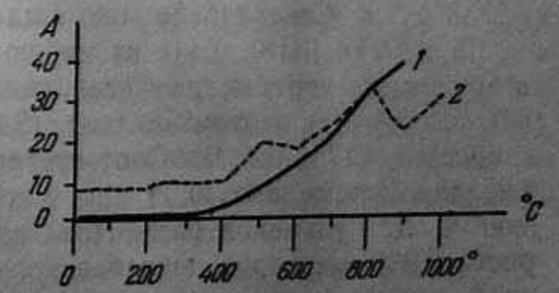


Рис. 154. Изменение магнитной проницаемости *A* (условные единицы) при нагревании каменных метеоритов Саратов (*1*) и Пултуск (*2*) по Ф. Ю. Левинсону-Лессингу и А. А. Турцеву. Ход кривых показывает, что при полете они не прогревались выше 400°.

§ 213. Зависимость температуры от скорости можно видеть из следующей таблички, полученной по данным измерения спектрограмм [500]:

№ спектра	Дата	Средняя высота	Скорость	T_e	Примечание
14	1932 V 27	$H=104$ *км*	Очень велика	3130° К	—
—	Леониды	91	72 *км/сек*	2700	Среднее
—	Персеиды	88	61	2100	»
13	1932 V 26	75	34	1810	Среднее из 2 измерений
24	1933 II 26	67	12	1950	Среднее из 9 измерений

Московский спектр 11 мая 1904 г. дал $T=1700°$ К, откуда можно видеть, что он принадлежал медленному метеору ($v=30$ *км/сек*, виргинид?). При этом надо учитывать влияние яркости, повышающей T на 150° на 1 зв. вел. Для ориентировки приведем следующую табличку влияния яркости и скорости на цвет метеора (ашхабадские данные)

Скорость, *км/сек*	2,5	5	10	20	30	40	50	60	70
+3 зв. вел.	—	ТК	К	О	Ж	Б	БГ	Г	ГЗ
0 » »	ТК	К	О	Ж	Б	БГ	Г	Г	З
−3 » »	К	О	Ж	Б	БГ	БГ	Г	Г	З

Здесь ТК означает темно-красный, О — оранжевый, Ж — желтый, Б — белый, Г — голубой, З — зеленый. Нет данных об окрашенных метеорах — фиолетовых, розовых и т. п. Независимым подтверждением роста температуры с яркостью служит появление ионного следа.

Пользуясь таблицей, можно находить v односторонним путем; в 1933 г. в Сталинабаде так было определено, что у Драконид $v<35$ *км/сек* [318]. Еще из наблюдений 1925 г. по 1594 метеорам автор нашел, что быстрее всех движутся метеоры голубые и белые (33° в секунду), потом желтые (24° *сек*$^{-1}$) и, наконец, оранжевые и красные (17° *сек*$^{-1}$). Соответственные продолжительности полета 0,25 *сек.* для первых, 0,39 *сек.* для вторых и 0,72 *сек.* для последних. Х. Д. Гульмедов рассмотрел зависимость цвета от угловой скорости 1043 метеоров ашхабадского ряда, 135 из них находились ниже порога цветовосприятия и отмечены «серыми». Прочие дали следующее процентное распределение по цвету:

Балл l_ω	7	6	5	4	3	2	1	0	n
Г, БГ, З	55	9	9	9	9	9	—	—	11
Б	6	32	31	17	8	5	1	—	401
ЖБ, Ж	3	14	24	26	18	8	6	1	414
О, К	1	6	19	17	17	27	11	2	82
Метеоров	57	222	273	223	132	87	39	10	908

По модальным значениям (жирный шрифт) видно, как по мере убывания скорости происходит переход цвета от голубого к красному в соответствии со шкалой охлаждения. Между баллом цвета метеора

по шкале Остгоффа и баллом i_ω по вычислению В. Ф. Милованова (1951 г. [525]) по 882 метеорам второго полугодия 1942 г. коэффициент корреляции оказался $-0{,}43\pm0{,}04$, т. е. с увеличением скорости метеоры белели.

§ 214. Распределение метеоров по цвету. Как нашел Г. А. Шайн еще в 1913 г. [530], чем слабее метеор, тем труднее различать его окраску и поэтому, начиная с 3 величины, возрастает число беловатых метеоров. Напротив, процент цветных метеоров (желтых, красных) по мере увеличения яркости растет. Чтобы показать, что это есть влияние порога цветовосприятия, обратимся к данным телескопических наблюдений: оказывается, что слабые метеоры дают то же распределение, какое наблюдается для метеоров ярче 3 вел. Сравнив данные о ярких метеорах и болидах, мы увидим то же соотношение:

Цвет (баллы)	-1^c-+2^c	3^c-5^c	$>6^c$	n
Телеметеоры до 9 вел.	51%	34%	15%	134
Метеоры от 0 до +2 вел. . . .	50	36	14	1929
Яркие метеоры <0 вел.	55	35	10	216

Телеметеоры наблюдались автором в 1930—1933 гг., обычные метеоры — в 1942 г., яркие — в 1942—1943 гг. Таким образом, на диапазоне от −5 до +9 вел. соотношение цветов постоянно. Но среди ярких появляется больше оттенков, например, соотношение З : Г : Б у метеоров последней строки равно 2 : 7 : 91, а у 59 болидов, обработанных М. Ю. Гизлер в 1951 г., равнялось уже 32 : 44 : 24. Если зеленый и голубой оттенки вызываются магнием и кальцием, отсутствующими в железных метеоритах, то такие «окрашенные» метеориты являются по составу «каменными». Иногда встречаются комбинированные цвета: ядро, голова, хвост и искры бывают разного цвета.

Цветовая шкала отдельных наблюдателей может несколько отличаться от вышеприведенной шкалы, основанной на цвете звезд. Еще в 1920 г. в Ташкенте цвет персеид был найден Э. К. Эпиком соответствующим α Персея (тип F5 или $T=6300°$ К). Для сравнения приведем следующие данные для звезд-гигантов.

Цвет	Балл c	Спектр. тип	Показатель цвета m	T °К	Цвет	Балл c	Спектр. тип	Показатель цвета m	T °К
—	—	O5	−0,40	50 000°	Ж	4	G0	+0,67	5 300
ГС	−2	B0	−0,33	21 000	ЖО	5	G5	0,92	4 500
Г	−1	B5	−0,18	14 000	О	6	K0	1,12	4 000
Б	0	A0	0,00	10 600	КО	7	K5	1,57	3 200
—	+1	A5	+0,20	8 200	К	8	M0	1,73	3 000
ЖБ	2	F0	0,33	7 100	—	—	M2	2,0	2 800
—	3	F5	0,47	6 300	—	—	M8	—	2 000

§ 215. Изменение цвета в полете наблюдается часто. Мы имеем в виду не влияние атмосферного поглощения, дыма или пыли городов, а изменения цвета самого метеора. На это давно обратили

внимание, а Вегенер в 1912 г. для всякого болида считал обязательным переход от желто-белого к зеленому и даже красному, что он неверно объяснял различием состава воздуха на разных высотах. Для болида 17 августа 1921 г. Гофмейстер доказал, что потеря скорости связана с цветом: $\frac{\Delta v}{\Delta L}$ для красного, желтого и голубовато-зеленого цвета равно 0,004, 0,083 и 0,300 соответственно. При полете сверхъяркого болида 20 августа 1943 г. над Кара-Кумами нами найдено было следующее:

Скорость, v . . .	66	51	40	40	22	0 *км/сек*
Цвет	Г	Г	Б	Ж	ОК	ОК

Переход цветов у Чулак-Курганского болида 25 января 1929 г. был от фиолетово-синего к желтому, потом к огненно-красному и далее к красному. При вспышках из-за явления Пуркинье метеор вообще кажется белее, но спектрограммы указывают на падение температуры на несколько десятков градусов [500]. Например, метеор 16 ноября 1932 г. при вспышке силой $6 \cdot 10^6$ *м. св* имел $T = 2920°$ К, а тотчас после нее — 3020° К. У спорадического метеора 26 мая 1932 г. между $H = 80$ и 55 *км* отношение интенсивностей линий железа λ 540/440 росло от 0,40 до 1,05 и λ 540/390 от 0,20 до 1,25, т. е. метеор постепенно краснел, теряя скорость. В 1954 г. в Ашхабаде А. Х. Ханбердыев на материале ряда наблюдений 1942—1945 гг. обнаружил, что чем ярче метеоры, тем лучше видно изменение их цвета; 65% ярких метеоров были медленные и красноватые, причем большинство их (57%) наблюдалось до полуночи, хотя вообще метеоров к утру становится вдвое больше. Причинами изменения цвета оказываются: 1) повышение яркости до порога цветовосприятия, 2) превращение метеора в конце пути в туманную серую полоску, 3) торможение к концу и покраснение в связи с этим и 4) достижение быстрым метеором максимума яркости с появлением голубой окраски. Число случаев соответственно 6, 17, 13 и 26 (всего 62).

§ 216. Изменение цвета с высотой происходит в связи с уменьшением скорости, а также и с тем, что более глубоко проникают медленные красноватые метеоры. Уже в 1926 г. А. Ф. Субботин и П. А. Савицкий (Ташкент) обнаружили уменьшение высот и укорачивание длин путей при переходе от голубых и белых к желтым и красным метеорам. А. М. Бахарев из наблюдений телеметеоров 1942 г. нашел [517] между относительной высотой $H_1 : H_2$ и цветом коэффициент корреляции 0,83; приняв $H_1 = 90$ *км*, он нашел по 573 метеорам:

Цвет, c	−1,5	0	+1	2,5	4	5	6	7
$H_1 : H_2$	1,39	1,41	1,41	1,43	1,45	1,49	1,49	1,66

§ 217. Азимутальная вариация цвета. Поскольку метеоры из восточных радиантов имеют бо́льшую скорость, чем из западных, можно ожидать встретить явление азимутальной вариации. Для проверки этого С. Язлиев [531] в 1952 г. отобрал 204 зенитных метеора (видимое направление которых совпадает с истинным), наблюдавшихся автором в октябре-декабре 1943 г. в Ашхабаде: 26% белых прошло с северо-востока (азимуты $a = 240$—$300°$), 53% желтых с запада ($a = 0$—$120°$). Таким образом, эта вариация подтверждается.

§ 218. Суточная вариация цвета вызвана изменением средней скорости метеоров в течение ночи. В 1951 г. В. Богданова [518] обработала наблюдения 1259 метеоров ашхабадского ряда (1942 г.) и обнаружила монотонное возрастание процента белых метеоров в течение ночи; к утру оно увеличивается в полтора раза. Число желтых метеоров уменьшается незначительно, число красных и оранжевых убывает в 1,5 раза. Эта вариация видна даже из наблюдений за один месяц. Тогда Х. Д. Гульмедов [520] использовал наблюдения этого же ряда за 28 месяцев через получасовые интервалы (всего 5231 метеор), которые полностью подтвердили эти выводы, в частности, показали наличие своеобразного скачка около местной полуночи («полуночный эффект»). Из 5231 метеора оказалось белых 2711 (52%), желтых 1849 (35%) и оранжевых с красными 671 (13%). Вот сводка Гульмедова:

Часы местного времени	Б, %	Ж, %	О+К, %	n	Часы местного времени	Б, %	Ж, %	О+К, %	n
19 —19,5	44	26	30	34	0,5—1	51	34	15	416
19,5—20	45	37	18	51	1 —1,5	58	33	9	458
20 —20,5	49	26	25	115	1,5—2	52	38	10	366
20,5—21	43	33	24	135	2 —2,5	55	37	8	408
21 —21,5	42	39	19	226	2,5—3	59	32	9	315
21,5—22	41	44	15	185	3 —3,5	55	35	10	359
22 —22,5	42	42	18	255	3,5—4	59	29	12	271
22,5—23	46	38	16	247	4 —4,5	65	29	6	205
23 —23,5	42	41	17	314	4,5—5	59	33	8	107
23,5—24	44	38	18	297	5 —5,5	65	28	7	123
0 —0,5	57	31	12	327	5,5—6	(41	53)	6	17

§ 219. Годичная вариация цвета также имеет место, с одной стороны, из-за влияния больших потоков, а с другой, из-за вариации скоростей. Метеоры радиантов, более близких к апексу — более белые, а близких к антиапексу — красные. Поэтому в весеннем и осеннем полугодиях суточная вариация неодинакова. Приводим данные ашхабадских наблюдений 1942—1944 гг. (в процентах):

Часы местн. вр.		19—21	21—23	23—1	1—3	3—5	5—7	Среднее	Число метеоров	
I полугодие	Б	(59)	48	48	49	50	57	49%	887	1812
	Ж	28	39	40	43	41	38	40	728	
	О, К	13	13	12	8	9	5	11	197	
II полугодие	Б	42	40	50	59	64	64	53%	1824	3436
	Ж	28	41	34	31	26	28	33	1121	
	О, К	30	19	16	10	10	10	14	491	

Белые ориониды в октябре и красноватые тауриды в ноябре сказываются на годовом ходе цветности, как и оранжевые дельта-аквариды в августе и белые гемииды в декабре:

Месяц (1942 г.)	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее	n
Белых	37	40	52	46	53	48%	586
Желтых	39	44	32	30	32	24	423
Оранжевых и красных	24	16	16	24	14	18	222
					Всего . . .	100%	1232

§ 220. Зависимость продолжительности полета от цвета метеора исследовалась неоднократно: она наибольшая у красных метеоров, меньше — у оранжевых, еще меньше у желтых. У белых метеоров она наименьшая. Зеленые метеоры более крупных размеров и поэтому имеют более значительную продолжительность полета.

§ 221. Излучение метеора обнаруживается на значительном спектральном диапазоне. Его ультрафиолетовая и, возможно, мягкая рентгеновская радиация возбуждают фиолетовый ореол и, может быть, голубые следы метеоров; видимая радиация дает свет метеора, а излучение в радиодиапазоне зарегистрировано инструментально. Остается промежуточный инфракрасный участок. Излучает ли метеор *тепловые* лучи и можно ли заметить их действие? Тепловое действие прямых солнечных лучей общеизвестно; мы можем ощущать тепло от костра, топящейся печи, ночного пожара и т. д., температура которых гораздо ниже солнечной и максимум излучения которых лежит в области инфракрасных волн близ $\lambda = 1{,}5—2\mu$. Пусть ночью появится болид с тем же спектральным распределением излучения. Путем опыта можно найти, какой должна быть его видимая звездная величина, чтобы можно было ощутить излучаемое им тепло, Если бы удалось измерить полный поток излучения E болида, то мы нашли бы его эффективную температуру $T = \sqrt[4]{E/\sigma}$ и *болометрическую* звездную величину m_b. Практически измеряется поток излучения, приходящийся на единицу поверхности, называемый *энергетической освещенностью* w.

Ныне звездными радиометрами измеряются энергетические освещенности до $0{,}04 \cdot 10^{-12}$ *кал · мин*$^{-1}$ *· см*$^{-2}$ или $2{,}8 \cdot 10^{-8}$ *эрг · см*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$. Звезда α Ориона в зените создает $w = 5{,}4 \cdot 10^{-5}$ *эрг · см*$^{-2}$ *· сек*$^{-1}$, Солнце $—1{,}34 \cdot 10^{6}$ *эрг · см*$^{-2}$ *· сек*$^{-1}$ или 0,032 *кал · см*$^{-2}$ *· сек*$^{-1}$. Однако существующие приборы, воспринимающие полный поток излучения (например, радиометры), для метеорных наблюдений малопригодны, поэтому пока приходится обратиться к самим наблюдателям, игравшим роль «приемника излучения».

§ 222. Метеоротермический эффект. Тепловое излучение болидов впервые обнаружено в 1933 г. [514] по сообщениям очевидцев

полета Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г., который был «ярче Солнца»: в Вановаре в нескольких десятках километров от пролетающего болида П. Косолапов описал, как «что-то как бы сильно обожгло уши», а С. Семенов отметил: «получился такой жар, что невозможно было сидеть, чуть не загорелась на мне рубашка» [523]. П. Л. Драверт [177, 521], собирая в Тарской области (Западная Сибирь) наблюдения болида 1 марта 1929 г., пролетевшего ночью в 61 *км* от д. Секменевой, получил сообщение О. Десятовой, что она ощутила на своем лице лучистую теплоту болида («ее лицо обдало жаром, какой ощущается у близ топящейся печки»). Путь этого болида определен более чем по сотне наблюдений и принадлежит к числу лучших: видимая яркость болида в д. Секменевой была от —20 до —21 зв. вел. Такое же явление было отмечено в «Летописи Сибирской» (библиотека Тобольского музея, по П. Л. Драверту): под 7191 годом (т. е. 1683 г.) записано: «Месяца ноября 4 дня воздушное явление в Тобольску ж: на западе на воздусе внезапну аки пещь великая затопилась, и светлость и теплота яко от Солнца зрящим людем лицо грели»; возможно, что это был леонид 14 ноября 1683 г. (н. ст.) яркостью «яко Солнце», т. е. —26 зв. вел. Далее, 9(22) мая 1904 г. на Алтае в д. Комаровой, Бийского уезда мощный болид «во много раз больше Луны» в конце полета рассыпался на искры, «такие, что обожгло лицо» [524], наблюдались звуки, охватившие весь Алтайский округ, произошло падение метеорита Телеутское Озеро (см. рис. 256, стр. 537). Краеведом Н. А. Абрамовым описан [510] еще один случай, 4 сентября 1849 г., в Березове, Тобольской губ. «Вдруг ... с ЮЗ на СВ мгновенно пролетела необыкновенная звезда ... близ Прокиона ... Лучезарный свет звезды, мало уступающий солнечному, осветил пролетаемое пространство ... При полете метеора в атмосфере сделалась чувствительная оттепель». Здесь яркость болида была также сравнима с солнечной. При падении метеоритов близ Устюга Великого 25 июня 1290 г. «среди ясного дня ... возник зной велик зело», появилось темное облако и «грому убо многу и страшну бывшу зело»; по масштабу явление соответствует падению Сихоте-Алинского метеорита. Далее, при полете сверхболида 15(25) августа 1663 г. в дополуденное время над Робозером, Белозерского уезда, по показаниям крестьянина Л. Федорова, «от того де огня пламенем опаляло, близ не подпустило»; болид освещал дно озера на глубину 8 *м*, испугал рыбу и дал «ржавец» на поверхности озера («Акты Исторические», т. 4, § 170).

Метеоротермический эффект, как мы для краткости будем называть это явление, отмечен также и в зарубежной литературе. Например, «термический болид», возможно, также потока Леонид, отмечен 12 ноября 1799 г. в 6 час. утра в Англии; Иван Мухин, «Российской Академии наук элев по химии» (т. е. аспирант), сообщает [4], что при полете болида 5 апреля 1800 г. в Батон-Руж (Сев. Америка) «видевшие сей метеор чувствовали сильный жар».

Вреде [538] пишет, что 22 октября 1804 г. он со спутником заметили яркий быстрый метеор (орионид?) и оба ощутили на своих лицах его теплоту. «Значительный жар» отмечен от болида в Гессене (Германия) 27 апреля 1817 г. О таком же явлении сообщает венский академик Вейсс [413], изучавший условия полета крупного болида 3 октября 1905 г. Можно привести и другие наблюдения, вплоть до сомнительных [534]. Во всех достоверных случаях оказывается, что видимая яркость болида была от —20 до —22 зв. вел. и выше. Для Тарского болида 1 марта 1929 г. общий сферический поток теплового излучения был (при энергетической освещенности $w = 0{,}5\%$ солнечной) $E = 4\pi r^2 w = 7 \cdot 10^8$ *квт* или порядка механической мощности энергии торможения. Поэтому приходится думать, что ощущение тепла возможно и при освещенности $w < 3 \cdot 10^{-3}$ *кал* $\cdot$ *см*$^{-2}$ $\cdot$ сек$^{-1}$ (создаваемой болидом —22 вел.). Таким образом, метеоротермический эффект начинает быть ощутимым человеком примерно при видимой яркости болидов около —20 зв. вел.

ГЛАВА 19

РАЗМЕРЫ И ФОРМА МЕТЕОРОВ

§ 223. Форма метеора. Представим на момент, что метеор застыл в своем движении, как если бы сделали с него снимок с такой краткой выдержкой, что смещение его было бы незаметным. Какой объем пространства был бы занят метеором, как в нем были бы расположены его основные структурные элементы, какую протяженность они занимали бы в линейной мере?

Форма метеора отмечалась еще в Древнем Китае (некоторые болиды описаны как шар или яйцо, летящее тупым концом вперед). Хладни приводит позднейшие описания болидов круглой, каплевидной, кометоподобной и других форм. Менье в 1883 г. привел рисунок, где относительно небольшое метеорное тело имеет громадную газовую оболочку грушевидной формы с острым хвостовым окончанием. Тогда же в 1885 г. Шафарик в Праге из телескопических наблюдений нашел, что одни метеоры — резко очерченные, звездоподобные, круглые с расширяющимися кометовидными хвостами, другие — с заметными дисками в несколько минут поперечником, размытые, лишь иногда резкие, круглые или овальные; третьи дискообразные, ощутимых размеров, к краям более яркие и резкие; к четвертому классу он относит слабые размытые массы неправильных очертаний, значительных размеров и разного цвета; 50—100 таких объектов он отметил за 6 часов 30 августа 1880 г. в 175-миллиметровый рефлектор. Можно было заключить, что разные части метеоров, а также болидов, светят с разной силой, например, передняя — сильнее всего, тыльная — слабее прочих.

В 1916 г. Н. М. Штауде [542] заподозрила «эффект фазы», т. е. неодинаковость излучения метеора вперед и в стороны. Она пишет: «Если принять факт, отмеченный наблюдателями, что видимая яркость метеора вообще увеличивается по мере удаления точки загорания от радианта, то его можно объяснить только в предположении, что продольные размеры метеора значительно превосходят поперечные»; Н. М. Штауде в первом приближении форму приняла цилиндрической. Тогда при неизменном расстоянии видимая яркость будет зависеть от угла между направлением его оси и луча зрения, т. е. элонгации ψ. Предположение об излучающей поверхности эквивалентно

тому, что метеор в своем объеме непрозрачен (практически это может случиться в газе при температурах лишь выше 10 000° К). В 1920 г. из обработки ташкентских наблюдений персеид Эпик [545] заключил об изотропности излучения метеоров.

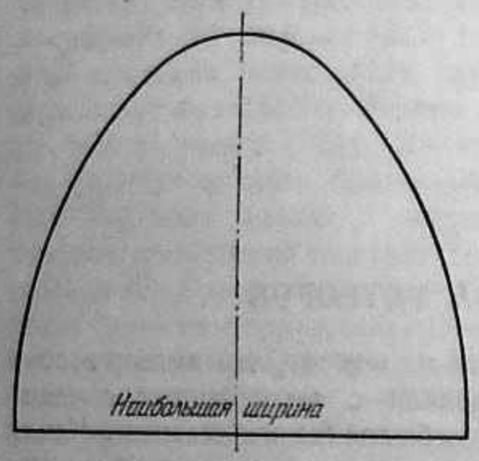


Рис. 155. Форма головы болида (среднее из измерения 124 рисунков наблюдателей).

Обычно форму метеоров, особенно болидов (где она лучше видна из-за бóльшего размера), описывают круглой, кометовидной, параболической, каплевидной, грушеобразной, вообще «обтекаемой», но здесь велико влияние иррадиации. В 1929 г. нами были промерены рисунки 124 болидов разных наблюдателей. Приняв за единицу поперечник самой широкой части головы, находим длины параллельных ему хорд, проходящих от вершины на расстояниях 0,0, 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8, равными 0,00, 0,61, 0,85 и 0,96 (рис. 155). Чтобы исправить их за ракурс, по теореме Клейбера их надо умножить на $4:\pi$. Отметим, что отношение длины l' головы метеора к ее ширине d', измеренное по многим рисункам одного болида, довольно стабильно, например, у громадного Тарского болида (Западная Сибирь, 1 марта 1929 г.) $l':d'=1{,}36\pm0{,}15$ по 20 наблюдениям. Е. Л. Кринов для болида 12 июня 1949 г. (Урал) нашел $l':d'=1{,}34$, что также близко к среднему из упомянутых 124 болидов. Иногда при полете это отношение растет. В 1935 г. была сделана попытка [539] найти это соотношение из хода изменения яркости метеоров с элонгацией в предположении непрозрачного цилиндрического метеора с полусферической передней частью и неизменной светимостью поверхности. Теория дает тогда выражение

$$\frac{l'}{d'}=\frac{\pi}{2}\operatorname{cosec}\psi\left(1+\cos\psi-2\cdot 2{,}512^{\Delta m}\right). \qquad (100)$$

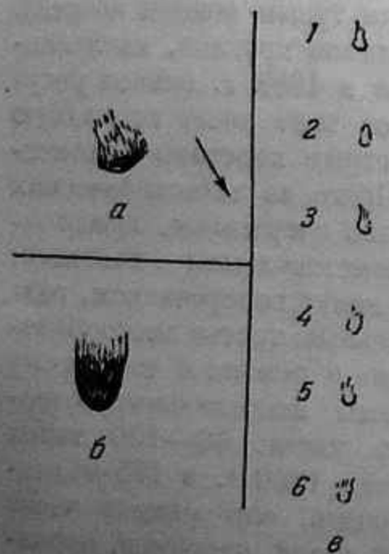


Рис. 156. Форма головы телескопических метеоров (по наблюдениям в бинокль):

а — метеор 6,5 вел. шириной 140″, напоминает падающий кусок горящей пакли, без следа; *б* — метеор 5,5 вел. диаметром 120″, тусклая поверхность, резкий лимб; *в* — изменения вида метеора 5,5 вел., имевшего вид мерцающего огненного комка шириной 30—45″.

Были взяты наблюдения 83 персеид, находившихся на одном альмукантарате, произведенные 11/12 августа 1932 г. в экспедиционных условиях на р. Витим. В среднем оказалось $l':d'=4{,}7$. Для того же потока обработка наблюдений Н. Н. Сытинской (Ташкент) дала 3—5, дракониды 9 октября 1933 г. по Г. А. Ланге (Одесса) показали $l':d'=2-3$. Когда имеется возможность уследить глазом за полетом метеора, то обычно это отношение равно 2—4 (рис. 156, 157),

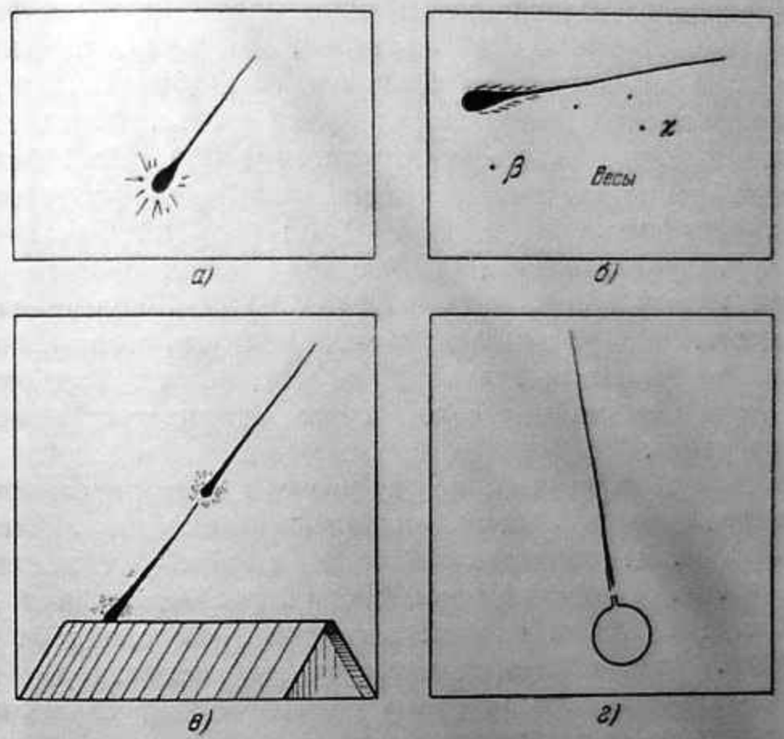


Рис. 157. Очертания некоторых болидов:

а — болид 21 сентября 1925 г. — 5,5 вел., кажущийся диаметр $d=3'$ (Л. П. Гармашев, Николаев); *б* — яркий болид 1 мая 1915 г. (н. ст.) (В. С. Лазаревский, Н.-Новгород); *в* — болид 30 октября 1923 г. — 7 вел., с искрами, $d=10'$, после вспышки скорость первой меньше (И. С. Астапович, Николаев); *г* — болид 1 июня 1926 г., $d=3-4'$ (Д. Сойфер, Николаев).

кроме самых медленных метеоров, к концу пути принимающих шаровидную форму ($l':d'=1$). Хвост у некоторых метеоров, длиной до 0°,1—0°,2 и более, может мешать оценке, наиболее уверенной у ярких и медленных красных метеоров. Быстрые белые и голубые метеоры имеют другой вид: точечное звездоподобное ядро без ощутимых размеров окружено круглым туманным ореолом, как сиянием.

§ 224. Инструментальные данные. Телескопические наблюдения помогают рассмотреть форму метеора только в том случае, когда глаз следит за метеором, иначе оптические хвосты испортят все дело. В некоторых случаях можно успеть двигать бинокль или кометоискатель вслед за метеором; например, 18 октября 1863 г. Ю. Шмидт в Афинах наблюдал полет болида в течение 13 секунд. Он

оказался состоящим из роя каплевидных красных метеоров. Вереницу таких же метеоров видел С. М. Селиванов 16 апреля 1930 г. также в кометоискатель; в течение 4 секунд автор следил в бинокль за метеором —4 вел. 24 июня 1943 г.; он был слегка вытянут, позади мерцали и как бы отрывались красноватые короткие огненные язычки. По данным таких инструментальных наблюдений $l' : d' > 1$.

Вариационное исчисление дает возможность вычислить форму тела вращения с наименьшим сопротивлением, например, для квадратичного закона, но она получается с разрывом в лобовой части, поэтому аэродинамика отыскивает эту форму путем опыта. В редких случаях на фотографии можно видеть форму метеора при достаточно короткой выдержке и медленном движении, как, например, на снимке (рис. 158), полученном 12 июля 1953 г.; голубой болид — 6 величины по журналу визуальных наблюдений имел форму «дыньки» и таким же вышел при выдержке $\Delta\tau = 0{,}01$ *сек*. Применяя обтюратор, мы постепенно уменьшаем световой поток, проходящий через объектив и потому на негативе можно видеть, что наиболее яркой является осевая часть метеора, а по асимметрии относительно миделя — передняя.

Действительно, изучение ориентированных метеоритов показывает, что их лобовая часть больше оплавлена и окислена, имеет более тонкую кору, т. е. подвергалась более высокой температуре, чем остальные части. Таким образом, индикатриса излучения в полете не сферична, а вытянута вперед: метеор как бы сам себе освещает путь впереди. Для небольших метеоров разница «вперед и назад» может не быть очень большой, но у болидов с их густыми пылевыми следами, сквозь которые порой не просвечивает даже Солнце, она должна быть велика. Таким образом, заключаем, что наиболее яркой является передняя часть метеора, т. е. область лобовых соударений воздушной подушки. В последнем случае область исходящей от нее ударной волны будет также светиться, но в меньшей степени. Этим определится форма метеора; из-за иррадиации она искажается — передняя часть кажется расширенной против истины.

До образования подушки и головной волны метеорное тело разбрасывает встречные частицы воздуха упругим ударом; для сферического тела был бы справедлив «закон косинуса» и метеорное тело могло бы рассматриваться как источник частиц воздуха, разбрасываемых с одинаковой относительно него скоростью v по всем направлениям, преимущественно вперед. При малых размерах тела форма области, охваченной разлетающимися частицами, как, например, при взрыве, — близка к сфере с метеорным телом в центре. По отношению же к неподвижному воздуху она вытянута вперед, так как метеор движется и при упругом соударении в направлении движения относительно воздуха скорость частиц будет $2v$, а не v. Таким образом, кажущаяся форма метеора не соответствует его действительной форме. Если эта сфера прозрачна, как и фронт ударной волны, то никакого эффекта фазы не будет. Если же они не прозрачны, то видимая яркость будет зависеть только от площади проекции их контура на небесную сферу, но не от формы, следовательно, эффект фазы появится.

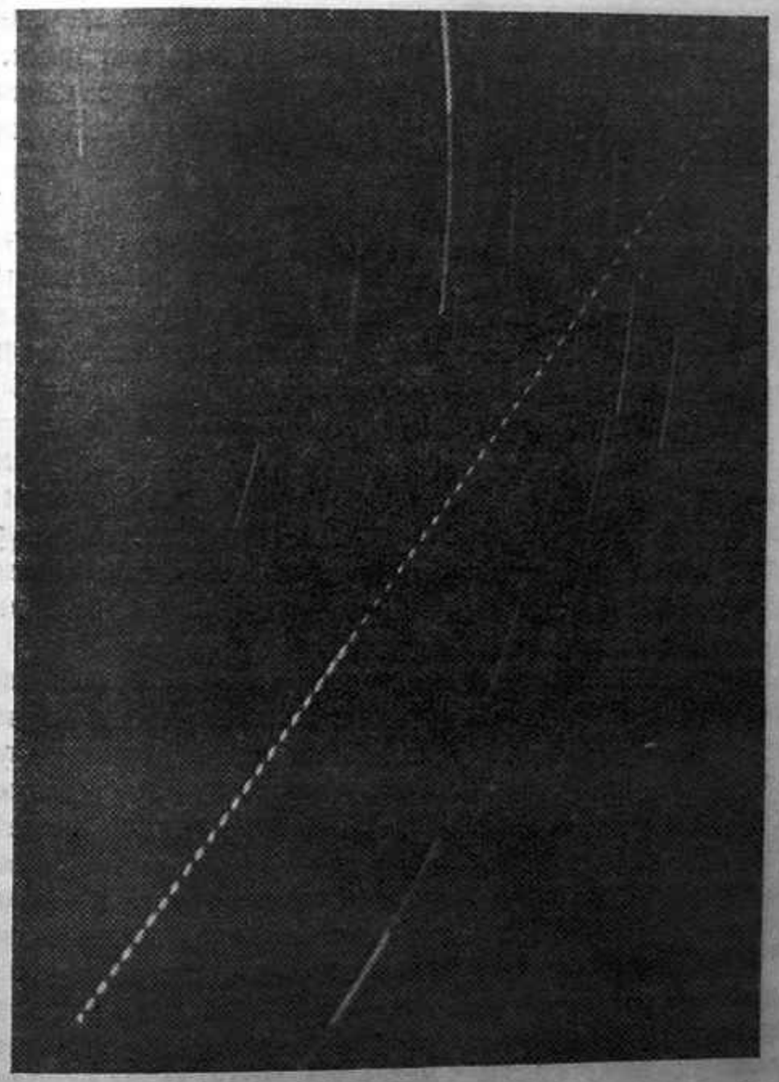


Рис. 158. Фотография болида 12 июля 1953 г. — 6 вел. с 60 перерывами. Визуально и фотографически отмечена форма «дыни» (фото ААЛ).

Если метеор прозрачен и имеет коэффициент поглощения $\chi = f(\lambda)$, то энергия E_ν, им излучаемая, будет зависеть от длины волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$, светимости R_ν и размеров; например, для шара диаметром D по А. М. Титову, Шаку и Нуссельту

$$E_\nu = \pi R_\nu \left[1 - \frac{2}{\chi^2 D^2} + \frac{2}{\chi D} e^{-\chi D} + \frac{2}{\chi^2 D^2} e^{-\chi D}\right]. \qquad (101)$$

Если χ неодинаково в разных направлениях, то уже это одно создаст эффект фазы. Фотографии ультрапуль с выдержками 0,0002 *сек* показывают, что наиболее ярки их лобовые части и что излучение в стороны несимметрично. Рассматривание фотографий метеора, полученных длиннофокусными камерами из разных пунктов, удаленных на десятки километров, показывает, что хотя общее изменение яркости метеора наблюдается одинаковым, но мелкие вспышки, затяжки, зазубринки и т. д. указывают, что в одних направлениях метеор излучает не совсем так, как в других. Следовательно, форма метеора уклоняется от симметрии.

§ 225. Линейные размеры метеоров. Если d' есть видимый с расстояния r *угловой поперечник* метеора, то *истинный* или *линейный* поперечник $D = r \operatorname{arc} d'$. Выражая d' в минутах, а r в километрах, получим $D = 0{,}291\ rd'$, следовательно, минимальная протяженность D при наблюдении невооруженным глазом при $d' = 1'$ и $r = 50$ и 200 *км* должна составлять 15—58 *м*. Сравнивая Венеру и метеор той же видимой яркости (—4 вел.), мы замечаем, что диск Венеры увидеть нельзя, тогда как у метеоров подобной яркости видимые угловые размеры отмечаются довольно часто, притом с указанием вполне определенной формы (диск, капля и т. п.); более далекие очевидцы уже не видят этих подробностей, более близким метеор кажется еще бóльшей протяженности.

При одинаковой видимой яркости m (в зв. вел.) красный и белый метеоры должны иметь разные размеры излучающей поверхности, так как интенсивность излучения (светимость R) в первом случае ниже и для получения такой же видимой яркости m площадь светящейся поверхности должна быть больше. Таким образом, более вероятен шанс увидеть угловой поперечник у красных метеоров, затем у желтых, меньше у белых и еще меньше у голубых. Наблюдения это действительно подтверждают: из 16 761 метеора ашхабадского ряда только 484 или 2,9% имели заметный диск; среди этих 484 метеоров голубых и белых было 10%, желтых 10%, оранжево-красных 80%. Кроме того, был обнаружен круглый голубой или сине-фиолетовый ореол у ярких, даже красных метеоров. Это явление особенно отчетливо проявлялось в высокогорных условиях Копет-Дага (г. Душак, 2700 *м*) и получило название «фиолетового ореола» (рассматриваемого в § 285, 291). Метеор находится в центре такого ореола, имеющего 3—4° диаметром или $D \approx 5$ *км*, и движется вместе с ним. Иногда фиолетовый ореол появлялся при вспышке метеора и тогда его удавалось сфотографировать (см. рис. 215). Его не следует смешивать с фотографическим ореолом (рис. 159, 160). Он может возникать под действием коротковолнового излучения метеора (резонансное возбуждение) и здесь мы его не рассматриваем. В других случаях заметные диски имели слабые «серые» метеоры — они либо представляли расплывающийся в облачко метеор в конце полета, либо рой мельчайших метеоров (см. гл. 28). Таких «расплывшихся» метеоров и компактных роев оказалось (с $d' = 10' - 60'$) всего 77 (0,5%). Мода распределения d' для 0, 2 и 4 вел. падает на 3′, 4′ и 6′ соответственно по 26, 111 и 63 метеорам (с $d' = 1' - 9'$), чему при $r = 100$ *км* соответствовало бы $D = 175$, 116 и 87 *м*. Для желтых и белых метеоров D меньше в несколько раз.

Рис. 159. Фотографический ореол вокруг болида 13 августа 1928 г. (фото Керолира, От-Прованс, Франция).

Косвенным подтверждением того, что метеоры имеют диски бóльших угловых размеров, чем звезды, служит отсутствие мерцания метеоров, на что в Ашхабаде обращалось специальное внимание. Звезды и планеты, в отличие от метеоров такой же видимой яркости, видимых дисков, как известно, не имеют. Мерцающие метеоры, упоминавшиеся ранее, как указывалось, мерцают сами (физически), а не из-за колебаний воздуха. Далее, можно видеть разные степени резкости очертаний метеоров (хотя бы сам диск при этом резко не выступал); самый этот факт уже указывает на то, что здесь метеор имеет протяженность. Фотографии длиннофокусными камерами, где влияние фотографического ореола относительно ослаблено, относятся к ярким метеорам и указывают ширину d' порядка десятков секунд. Изучение отражений радиоволн от метеорных траекторий показывает, что диаметр электронных следов менее метра; ионные следы много толще. Третью инструментальную проверку дают телескопические наблюдения. Можно видеть, что если метеор оставляет ионный след, то в первые мгновения ширина этого следа равна ширине головы, которая вычерчивает его как бы рейсфедером. Сравнивая эту ширину с расстояниями известных двойных звезд или диаметрами дисков планет, можно найти ширину головы метеора. Из наблюдений 1925—1930 гг. в Николаеве автор нашел, что у метеоров +12 вел. диски вообще неощутимы, метеоры 8 и 5 величины иногда могут иметь $d' = 40'' - 60''$,

т. е. эта величина является продолжением d' обычных метеоров. В 1928 г. ряд опрошенных нами известных наблюдателей переменных звезд подтвердил, что иногда телеметеоры имеют поперечники, заметно превосходящие видимые размеры звезд того же блеска. Из

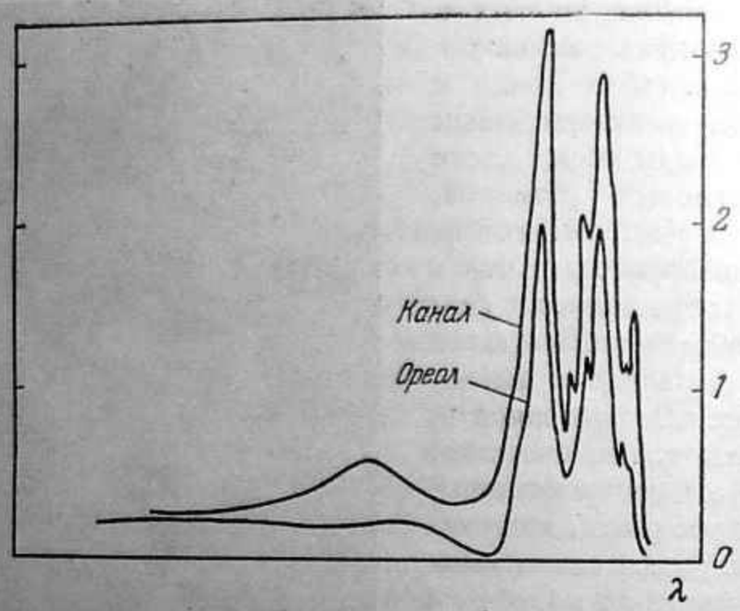


Рис. 160. Изменения яркости болида 28 ноября 1938 г. (в относительных единицах) отдельно для середины (канала) и ореола (по фотографии Сталинабадской обсерватории).

пятидесяти пяти наблюдений 1932 г. в бинокль и 1933 г. в 152-миллиметровый рефрактор оказалась такая зависимость d' от звездной величины [173]:

Зв. вел.	1—2	3—4	5—6	7—8	9—10
d'	3′,1	1′,2	0′,9	1′,0	0′,24

Еще в 1839 г. Месон нашел для телеметеоров $d' = 15''$—$20''$, Ю. Шмидт в 1863 г. —$50''$ у ярких компонентов описанного уже болида, Г. А. Морозов видел 3 февраля 1930 г. метеор —1 вел. из нескольких частей размерами по $10''$—$15''$. В 1932—1933 гг. в Сталинабаде автор нашел такие d':

Инструмент	Бинокль, 6×	Бинокль, 8×	Кометоискатель, 21×	Рефрактор 59—172×
Ср. d' (звезды)	15″	22″	5″	2″
Ср. d' (метеоры)	92″	⩽82″	28″	⩽12″
Ср. зв. вел. m	5,8	5,5	6,5	8,3

Кажущиеся субъективные поперечники звезд были 1′,5—1′,8, а метеоров 9′—11′, т. е. заметно больше. Сглаженная кривая d' в зависимости от цвета и видимой яркости по ашхабадским определениям дает для обычных метеоров следующее:

	Зв. вел.	+6	4	+2	0	−2	−4	−6	−8
Метеоры	красные	⩽1′	1′	2′	3′	4′	5′	7′	10′
	желтые	⩽1	⩽1	1	2	3	4	5	7
	белые	⩽1	⩽1	⩽1	1	2	2	3	5

Таким образом, как для обычных, так и телескопических метеоров, d' растет с ростом видимой яркости. Поскольку в том же направлении действует и иррадиация, то потребовалось исследовать ее влияние. Еще Лоуренс Смит 70 лет назад нашел из опытов, что ее влияние очень велико. В ноябре 1944 г. мы проектировали блестящие стальные шарики, укрепленные на темных стержнях, на фон звездного неба. Шарики имели диаметры 5, 13 и 18 *мм* и освещались закрытым фонарем так, что казались яркими звездами и сравнивались простым глазом с Сириусом, Сатурном и Луной (в разных ее фазах). Блеск шариков менялся от +6 до —13 вел. Начиная от +1 вел., в глазу возникает ореол тонких светлых лучей, имеющий наибольший размер при —8 вел.; при дальнейшем увеличении блеска шарика до —10, —11 вел. возникает «иррадиационный диск», с $d' = 7'$—$8'$, физически отсутствующий, причем ореол исчезает. Из-за этого поперечник полной Луны кажется имеющим $d' = 1°{,}0$ вместо $0°{,}5$. В следующей табличке сопоставлены: звездная величина m, истинный и видимый угловые диаметры отражения d и d', диаметр δ ореола лучей и увеличение Δ диаметра светила с диском (Луна) из-за иррадиации:

m	+6	+4	+2	1	+0	−1	−2	−3	−4	−5	−6	−8	−10	−12	−14
d	0′,0	0′,0	0′,1	0′,1	0′,2	0′,2	0′,2	0′,2	0′,3	0′,3	0′,3	0′,3	0′,4	0′,4	0′,7
d'	1,0	1,0	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,8	3,3	3,8	4,7	5,5	6,5	7,5
δ	0	0	0	3	9	14	20	23	26	29	31	34	33	12	(1)
Δ	0	0	0	0	0	0	2	4	7	11	14	19	22	25	28

Сравнивая эту табличку с предыдущей, мы видим, что белые метеоры соответствующих видимых яркостей имеют как раз такие диаметры, какие вызывает иррадиация, но что у желтых и красных они несколько больше. Вычтя действие иррадиации, получим *истинные угловые* диаметры d, которые сравним с данными 47 телескопических определений, где влияние иррадиации составляет по предыдущему лишь несколько секунд, и, наконец, дадим усредненные d и соответствующие им линейные D при расстоянии $r = 100$ *км*:

Зв. вел. . . .	+10	8	6	4	+2	0	−2	−4	−6	−8
Исправленное d:										
Белые	0′	0′	0′	0′	0′	0′	0′	0′	0′	0′
Желтые . . .	0	0	0	0	0	0,6	1,0	1,2	1,2	2,3
Красные . . .	0	0	0	0	1	1,6	2,0	2,2	3,2	5,3
Среднее d . . (телескопич.)	0,05	0,5	0,7	1,1	1,1	—	1,1	(5,0)	—	—
Усредненное d_m	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	3,0
D, *км*	3	9	15	23	32	41	49	58	79	87

Таким образом, даже болиды имеют D всего в несколько десятков метров, а не километры, как получали ранее без учета иррадиации. Контролем этого вывода являются определения D какого-либо одного болида, наблюдавшегося на большом диапазоне расстояний r. Построив график $D=f(r)$, мы увидим, что при $r\to 0$ D стремится к значению, меньшему 0,1 *км* (рис. 161). Поперечники

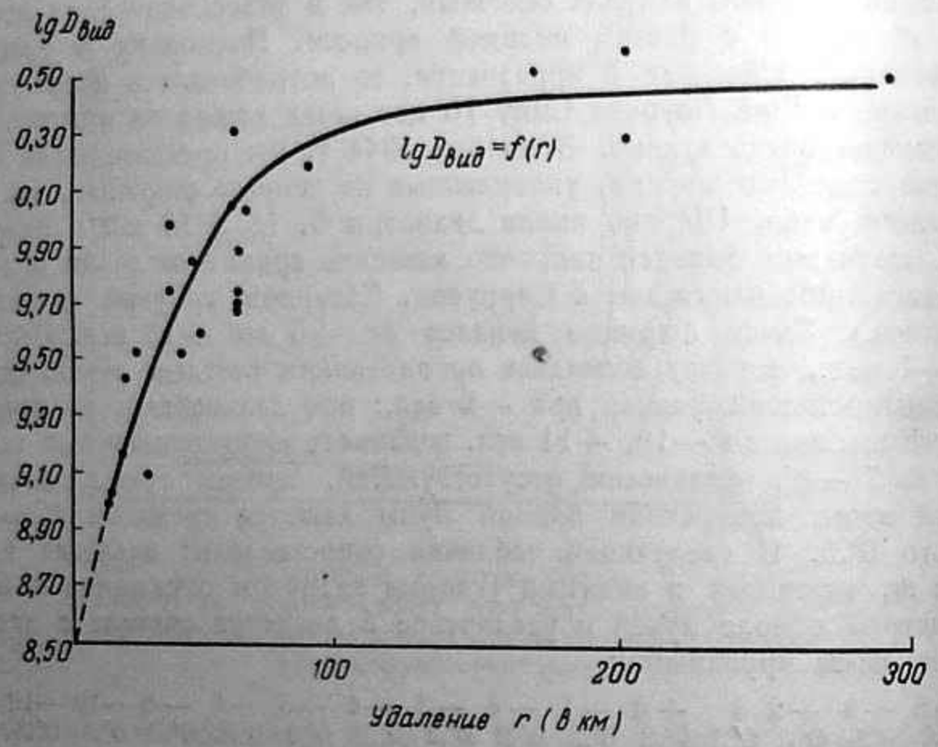


Рис. 161. Вычисленный видимый диаметр болида ($D_{вид}$) в зависимости от расстояния r от наблюдателя. Из-за иррадиации $D_{вид}$ получается гораздо больше истинного, соответствующего $r=0$.

красных метеоров $+4$ и -4 вел. составляют 30 и 78 *м*, а желтых — около 15 и 40 *м*; голубые и белые метеоры даже при -8 вел. будут иметь $D=30$ *м* или ниже. Площадь поверхности красного метеора будет вчетверо больше, чем у желтого, что при равенстве видимых яркостей и сплошном спектре соответствовало бы температуре, в $\sqrt[4]{4}\approx 1{,}4$ раза меньшей.

Чем вызван такой значительный линейный размер метеора? По опытам в Оклахомском университете (1953 г.) и др. при прохождении ударной волны происходит термическая ионизация воздуха; последующая рекомбинация ионов производит позади нее «высвечивание» ионов, т. е. самосвечение этого воздуха. Однако спектр метеорной оболочки отдельно нам неизвестен, а в метеоре светят также пары и газы метеорного тела. Заметим, что при метеорных скоростях

до образования подушки длина свободного пробега отброшенных частиц в воздухе также порядка нескольких метров, но, кроме того на бóльшее расстояние может распространяться интенсивная коротковолновая радиация. Эти процессы мы наблюдаем на безопасном расстоянии.

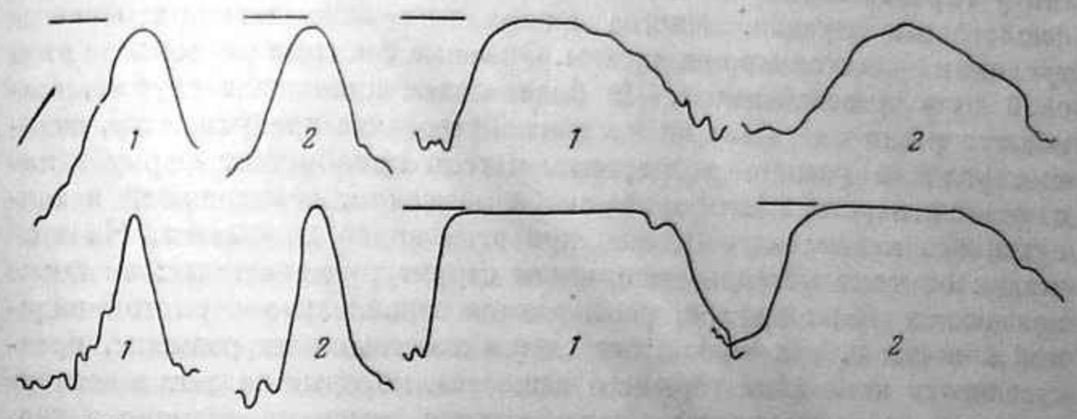


Рис. 162. Фотометрические разрезы поперек траекторий метеоров (*1*) и звезд (*2*) с одинаковой интенсивностью на негативе показывают их полную тождественность (по Н. Н. Сытинской).

На фотографиях с короткофокусными камерами ширина пути метеора обычно равна ширине траектории звезды при равенстве фотографических плотностей (рис. 162).

§ 226. Структура метеора не является постоянной на протяжении полета и, кроме того, она, видимо, различна для метеоров разных классов. Даже наблюдая метеоры в телескоп с эквивалентного расстояния в несколько сотен метров, из-за мимолетности явления мы не можем рассмотреть его строение достаточно подробно. Обобщая известные нам наблюдательные данные, можно прийти к следующему. Появляется метеор в виде едва заметной точки и благодаря движению кажется постепенно расширяющейся иглой. В равной степени это относится к появлению и телеметеора, и болида, таким же получается он и на фотографии. Затем явление усложняется, по-разному для быстрых и медленных метеоров. В первом случае видно, что яркая точка, которую мы назовем *ядром* метеора, во все стороны фонтаном разбрасывает прямолинейные светящиеся серебристо-белые струи, называемые нами «стратами». При наблюдении близ радианта страты разбегаются радиально, т. е. перпендикулярно к траектории. У метеоров слабее 4—5 величины это явление сильно ослаблено, страты прозрачны, а у телеметеоров никогда не видны. У ярких метеоров страты фотографировались неоднократно и видны особенно хорошо, если при печати проектировать их наклонно, чтобы они вытягивались перпендикулярно к траектории. Несколько десятых долей секунды спустя страты теряют

лучистость структуры, напоминающей солнечную корону, сливаются вместе в однородную сплошную массу и образуют метеорный *след*, остающийся на месте, пока метеор пролетает дальше. В зените длина страт до 0,5—1°, т. е. при $H > 80$ *км* (до образования подушки) линейно — сотни метров. Так как у метеоров той же видимой яркости у горизонта они не видны, то можно думать, что страты богаты фиолетовыми лучами. Иногда сквозь них ядро метеора кажется туманным — настолько они плотны. Обычные быстрые метеоры на этом свой путь и заканчивают. Но более яркие проникают глубже, становятся резко очерченными и стратообразование прекращается, видимые угловые размеры возрастают, метеор приобретает форму капли с резкой передней стороной лимба *оболочки*, переходящей в волнующийся *хвост*; ядро обычно при этом видно не бывает. На этой стадии быстрые метеоры напоминают структуру медленных: те также появляются тонкой иглой, расширяются параллельно с ростом видимой яркости и, как только становятся заметными их размеры, представляются комочками горящего вещества, которые падают в воздухе со вспышками, мерцанием, перемежаются язычками пламени в хвостовой части, но резко очерчены спереди. У более слабых метеоров полет на этом оканчивается, более яркие увеличиваются в размере до 3′—4′ и более. Вещество метеора переходит из головы в хвост, достигающий нескольких километров длины. Части хвоста как бы развеваются, составляющие его струйки переплетаются, удлиняясь, укорачиваясь и сменяя друг друга, иногда напоминая хвосты ракет. В последней трети пути у ярких метеоров от головы вбок и назад иногда отлетают «искры». Искрообразование начинается на $H \approx 50$ *км*; по-видимому, это кусочки метеорного тела, сбрасываемые при взрыве перегретых, более легкоплавких включений, в некоторых случаях, возможно, крупных жидких капель.

Следовательно, можно различать следующие структурные элементы метеора: *ядро*, соответствующее метеорному телу, и прилегающая к нему *подушка* сжатого воздуха, от которой расходится светящаяся головная волна, вместе составляющие *голову* метеора, и отбрасываемые назад продукты возгонки, пульверизации, распыления и испарения метеорного тела, образующие *хвост*. После полета на месте остается цилиндр ионизованного воздуха — *метеорный след*, а при полете метеора концентрически вместе с ним движется *фиолетовый ореол*, а на более ранней стадии — *страты*. Некоторые элементы могут отсутствовать, например, слабые леониды имеют ядро, страты, дают след, но не имеют хвоста и головы; апрельские геркулиды имеют головы без хвостов и похожи на куски пакли, охваченные пламенем; обычные метеоры не имеют заметного фиолетового ореола, страт и следов, но часто имеют голову и хвост и т. д. В 1936 г. Эпиком в Тарту для крупных болидов была предложена теоретическая структура: метеорное тело, окруженное «комой», в которой происходит перераспределение энергий соударяющихся молекул, и хвост. Близкую к этой теоретическую схему в 1955 г. предложил Хоппе. Реальная структура оказывается значительно более сложной и еще недостаточно изученной.

§ 227. Структура следа. Электроны и ионы, разбрасываемые метеором в магнитном поле Земли, навиваются на его силовые линии и их пути искривляются. Электроны, как более легкие, имеют меньший радиус кривизны траектории — порядка дециметров, а тяжелые ионы — нескольких десятков метров. Следовательно, электроны концентрируются ближе к траектории и образуемый ими цилиндр имеет небольшой диаметр (несколько дециметров), как и показывают радионаблюдения (поскольку в отражении радиоволн основную роль играют электроны). Напротив, наблюдая визуально, мы воспринимаем высвечивание ионов, разбросанных на гораздо большие расстояния (десятки метров) и потому визуальная ширина следов на два порядка выше. Подтверждением сказанного также служит непомерно малый коэффициент рекомбинации стойких следов (из-за того, что ионы и электроны отделены друг от друга). Расчеты подтверждают вышесказанное; этим же объясняется появление на оси следа темной полости («трубка Траубриджа»), где рекомбинация уже закончилась и потому высвечивания нет. Подробнее о следах будет рассказано в гл. 27.

ГЛАВА 20

ВРАЩЕНИЕ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

§ 228. Введение. Вращаются ли метеорные тела при движении в атмосфере и вне ее? С точки зрения механики всякое движение может быть сведено к так называемому кинематическому винту: движению поступательному и вращательному. Всякое метеорное тело может иметь вращательное движение вокруг оси, проходящей через центр его массы, и поступательное движение этого центра массы (по закону инерции). Наблюдения за небесными телами показывают наличие вращения звезд, Солнца, планет, их спутников, астероидов, комет, т. е. практически у всех небесных тел и даже их систем (например, звездных скоплений и галактик). Поэтому вероятно, что метеорные тела тоже обладают некоторым вращательным моментом. Около четверти века назад Эпик в Тарту рассмотрел вопрос подробно. Оказалось, что чем меньше масса метеорного тела, тем быстрее должно быть его вращение.

§ 229. Данные наблюдений. Какие существуют опытные доказательства вращения метеоров? Естественно, что если оно существует, то легче всего его обнаружить у болидов. И действительно, еще Хладни [5] в 1819 г. приводил примеры вращения пяти болидов. Затем описано [548] вращение вокруг оси болида 12 февраля 1836 г. над Шербуром. Очевидцы полета болида 18 (30) августа 1887 г. (Урал) сообщают о его вращении; подтверждением, возможно, являются косые струйки на поверхности метеорита Оханск, который из него выпал [546]. И. А. Клейбер в Детском Селе 11 августа 1883 г. видел метеор (не-персеид), который за 2 секунды около 20 раз появлялся и исчезал, пройдя дугу 35°. «Самое простое и, кажется, единственное возможное объяснение этого явления заключается во вращательном движении метеора», добавляет он [11]. В августе 1907 г. над Полтавщиной прошел крупный красный болид; вращаясь вокруг горизонтальной оси, он как бы катился по небу вперед. Правильные периодические пульсации, видимые на фотографиях метеоров (рис. 163), некоторыми авторами приписываются также вращению метеорных тел. Частота этих пульсаций может

достигать сотен герц *). Однако опытных данных о вращении обычных метеоров мало. Вместе с тем следует отметить, что влияние вращения является второстепенным. Даже в баллистике оно рассматривается как некоторая поправка к поступательному движению снаряда. Возьмем пример: пусть метеорное тело имеет минимальную скорость $v = 10$ *км/сек* и вращение 10^3 *об/сек*. При радиусе $r = 5$ *мм* и плотности 3 *г/см*^{3} оно имеет массу $m = 0{,}4$ *г* и энергию

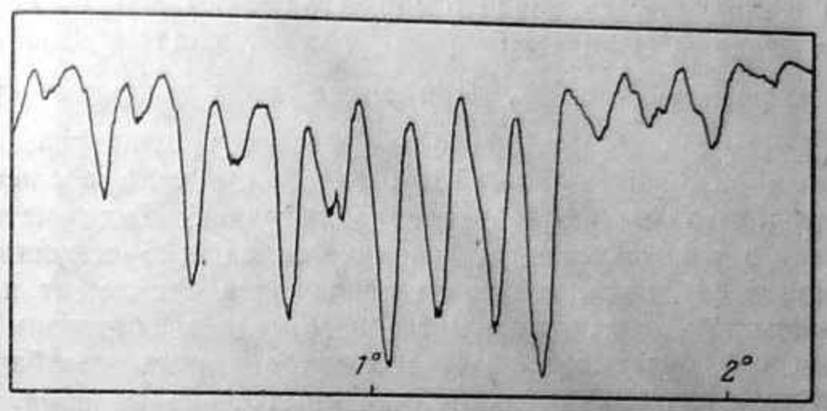


Рис. 163. Периодические колебания яркости метеора 2 марта 1939 г. (по Гофмейстеру).

вращения $E_1 = \frac{4\pi^2 r^2 m}{5T^2} = 7{,}90\,\frac{mr^2}{T^2} = 7{,}9 \cdot 10^5$ *г · см*^{2} *· сек*$^{-2}$, тогда как энергия поступательного движения $E_2 = \frac{mv^2}{2} = 2 \cdot 10^{11}$ *г · см*^{2} *· сек*$^{-2}$ или в $2{,}5 \cdot 10^5$ раз больше. Следовательно, энергетически роль вращения в движении метеора ничтожна.

Если метеорное тело имело вращение до проникновения в атмосферу, то может статься, что сопротивление воздуха затормозит это вращение, особенно, если форма тела была неправильной. Баллистика дает также примеры обратного явления, когда вращение возникает в полете. Коллинсон (Англия) 30 октября 1937 г. получил фотографию метеора камерой 1 : 4, $f = 125$ *мм*, где метеор пять раз на протяжении градуса правильно пульсирует в начале пути. Напротив, Аризонская метеорная экспедиция получила 26 мая 1932 г. фото спектра метеора, где в конце пути каждая линия (Fe) пульсирует 200 раз в секунду. Кубокава (Кобе, филиал обсерватории Токио) 7 ноября 1934 г. сфотографировал болид —4 величины, состоявший из двух частей равной яркости на расстоянии 0°,2 одна от другой; одна из них ритмично мерцала каждые 0°,06 близ середины пути. Яркий геминид 14 декабря 1933 г. пульсировал каждые 200 метров также близ середины пути (Гарвардская обсерватория).

*) Современная техника позволяет получать в комбинированных переменных полях частоты вращения стальных шариков до 10^6 *гц*.

Следовательно, явление может иметь место во всякой точке траектории. Если оно вызвано вращением, то приходится допустить, что это вращение может возникать при полете в атмосфере. Объяснить это можно неправильной формой метеорного тела, взрывом отдельных перегретых включений, реакцией испарения.

Пусть точка приложения равнодействующей приложенных к метеорному телу сил лежит в п е р е д и его центра массы. Тогда метеорное тело «опрокинется». Если плечо этой силы P есть l, то, поворачивая тело с моментом J на угол φ, сила P сообщит ему энергию вращения $\frac{J\omega^2}{2} = Pl\varphi$. При массе m в несколько граммов, $l = 0{,}01$ *см* и давлении в несколько десятков атмосфер, сила P в состоянии опрокинуть ($\varphi = 180°$) метеорное тело за несколько миллисекунд, что не противоречит наблюдению. Даже метеорит в одну тонну в тех же условиях опрокинется за 0,25 секунды.

Но может случиться, что точка приложения сил лежит п о з а д и центра массы. Тогда движение метеорного тела в некотором смысле устойчиво: оно будет совершать маятникообразные колебания, что имеет место в движении ракеты или «рысканьи» корабля. Период таких колебаний находим как период физического маятника приведенной длины x с массой m и моментом инерции K. Он равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{K}{mjl}}, \text{ где } mj = P.$$

Возможно, что в это состояние приходят некоторые метеориты в конце своего полета (известно, что половина метеоритов «ориентирована», т. е. имеет ясно выраженную переднюю и тыльную стороны). В этом случае вращение возможно вокруг оси, близкой к касательной к траектории. Действительно, не раз наблюдались метеориты, быстро вращавшиеся при падении на почву. Обладая особой формой, они могли приобрести это вращение в полете, если даже до попадания в атмосферу его не имели.

Как оказывается, даже для гладких тел торможение вращения в воздухе очень заметно. Приведем пример из курса баллистики: снаряд диаметром $D = 40{,}6$ *см*, выпущенный со скоростью $v = 600$ *м/сек* и угловой скоростью $\omega = 5{,}59$ *радиан/сек*, уже через 20 *сек* в вершине траектории на высоте $H = 9690$ *м* имеет $v = 271$ *м/сек* и $\omega = 0{,}28$, т. е. в 20 раз меньше. Даже пуля с $D = 7{,}6$ *мм* и $\omega = 434$ *радиан/сек*, пролетев 3 *км*, в точке падения имеет $\omega = 4{,}6$, т. е. в 95 раз меньше; v при этом убывает с 875 до 115 *м/сек* или почти в восемь раз.

§ 230. Явление Магнуса. Известно, что при наличии вращательного момента возникают новые явления. Прежде всего, это явление Магнуса, вызывающее уклонение траектории от плоскости начального движения из-за несимметричного распределения сил. Если

смотреть вдоль траектории летящего тела, вращающегося по часовой стрелке, то это уклонение (*девиация*) будет происходить вправо (ось вращения при этом близка к касательной). Однако явление Магнуса

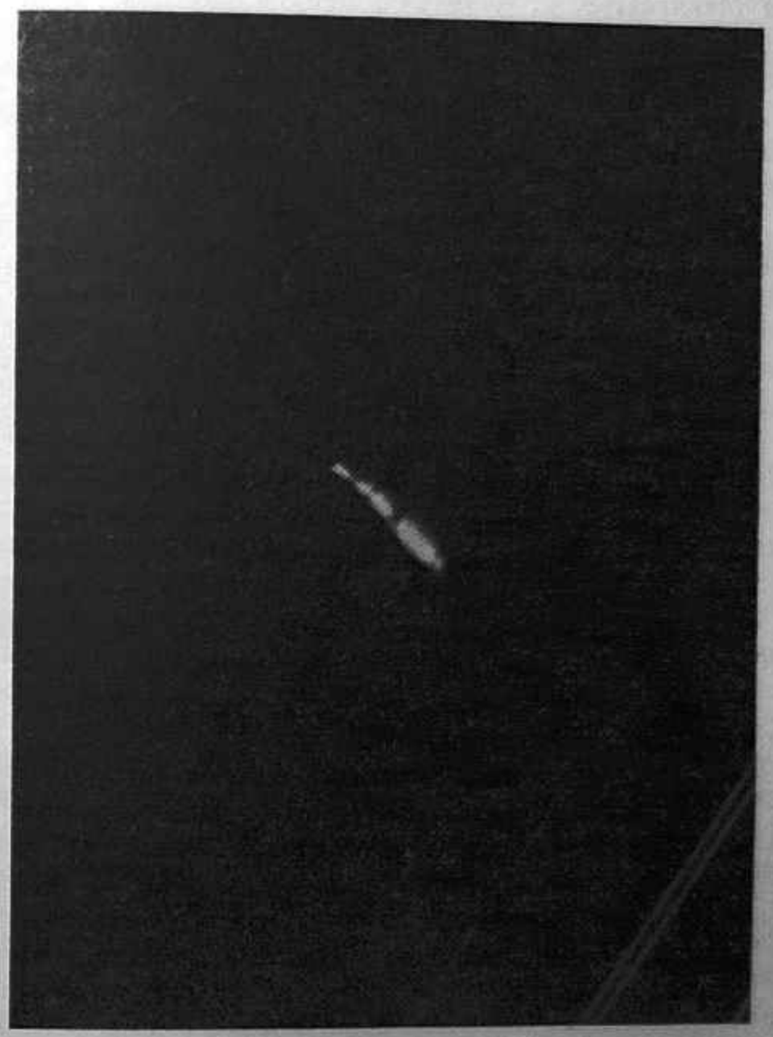


Рис. 164. Искривление траектории метеора 8 августа 1950 г., летевшего под небольшим углом к лучу зрения (длина на негативе 0,7 *мм*). Перерывы от обтюратора слились (фото В. Д. Давыдова, экспедиция МОВАГО в Ашхабаде).

заметно при медленном поступательном движении быстро вращающихся крупных тел. Для метеоров оно мало заметно. На уникальной фотографии метеора, летящего по лучу зрения (рис. 164), видно, что его траектория приняла форму кривой двоякой кривизны, что может возникнуть под влиянием девиации.

§ 231. Прецессия и нутация оси вращения. Другие явления, возникающие при вращении — это прецессия и нутация оси. Если написать уравнения движения тела в воздухе под действием полной

системы сил, то при некоторых добавочных условиях можно получить, что движение центра массы складывается из двух движений — непериодического и периодического. Первое из них — результат действия силы Магнуса, т. е. девиация; второе состоит из двух круговых движений: одно из них медленное с большим радиусом R; это — *прецессия*. Второе движение, наоборот, быстрое, но с малым радиусом r; это — *нутация*. Под их влиянием ось вращения медленно описывает поверхность конуса большого раствора, причем, кроме того, испытывает мелкую вибрацию (малые нутационные конусы).

Будем смотреть вслед летящему метеорному телу. Проведем плоскость, перпендикулярную к его траектории в начальный момент и движущуюся вместе с ним. Пусть ось вращения метеорного тела близка к направлению касательной, образуя с ней небольшой угол δ. По мере полета метеорное тело все более и более будет отклоняться от первоначальной плоскости движения. Это есть девиация, достигающая максимума в конце пути. Из-за прецессии метеорное тело будет в той же плоскости описывать большие петли радиуса R, на которые наложены маленькие петельки нутации радиуса r. Таким образом, истинная траектория вращающегося метеорного тела в атмосфере будет представлять собой винтообразную кривую, обвивающую почти прямолинейную линию полета, постепенно уклоняющуюся от первоначального направления движения, как это и видно на рис. 164.

Поскольку из-за сопротивления воздуха вращение постепенно замедляется, то оба круговых движения затухают, превращаясь в спиральные (из-за убывания радиусов R и r). Поэтому конец оси вращения описывает сначала удлиненную псевдоциклоиду, которая затем переходит в укороченную. Однако при этом отношение $R:r$ возрастает, особенно сильно к концу пути, когда нутация становится практически незаметной. Абсолютные значения R и r невелики; если a и b будут величины, зависящие от сил сопротивления, Ω и ω — угловые скорости прецессии и нутации, углы φ_1 и φ_2 зависят от начальных данных, то тогда девиация дается во внешней баллистике в виде

$$\operatorname{tg}\gamma=\frac{1}{2}\frac{R}{\Omega}\sqrt{a^2+b^2}\sqrt{1+\left(\frac{r}{R}\right)^2\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2+2\frac{r}{R}\frac{\Omega}{\omega}\cos(\varphi_1-\varphi_2)}. \quad (102)$$

При растворе конуса прецессии 10°, радиусе $R=0{,}1$, $\operatorname{tg}\gamma=0{,}0025$ или $\gamma=9'$, что можно найти фотографически. Линейный радиус винтовой линии траектории в первом приближении дается выражением $\rho=2v\sqrt{a^2+b^2}\,\frac{R}{\Omega^2}$. Например, для того же снаряда с $D=40{,}6$ *см* оказывается $\rho<7{,}0$ *см*, значит, винтовая линия не выходит из пределов самого снаряда. При $v=60$ *км/сек* правая часть возрастает в 100 раз, a и b практически не изменятся, поэтому ρ

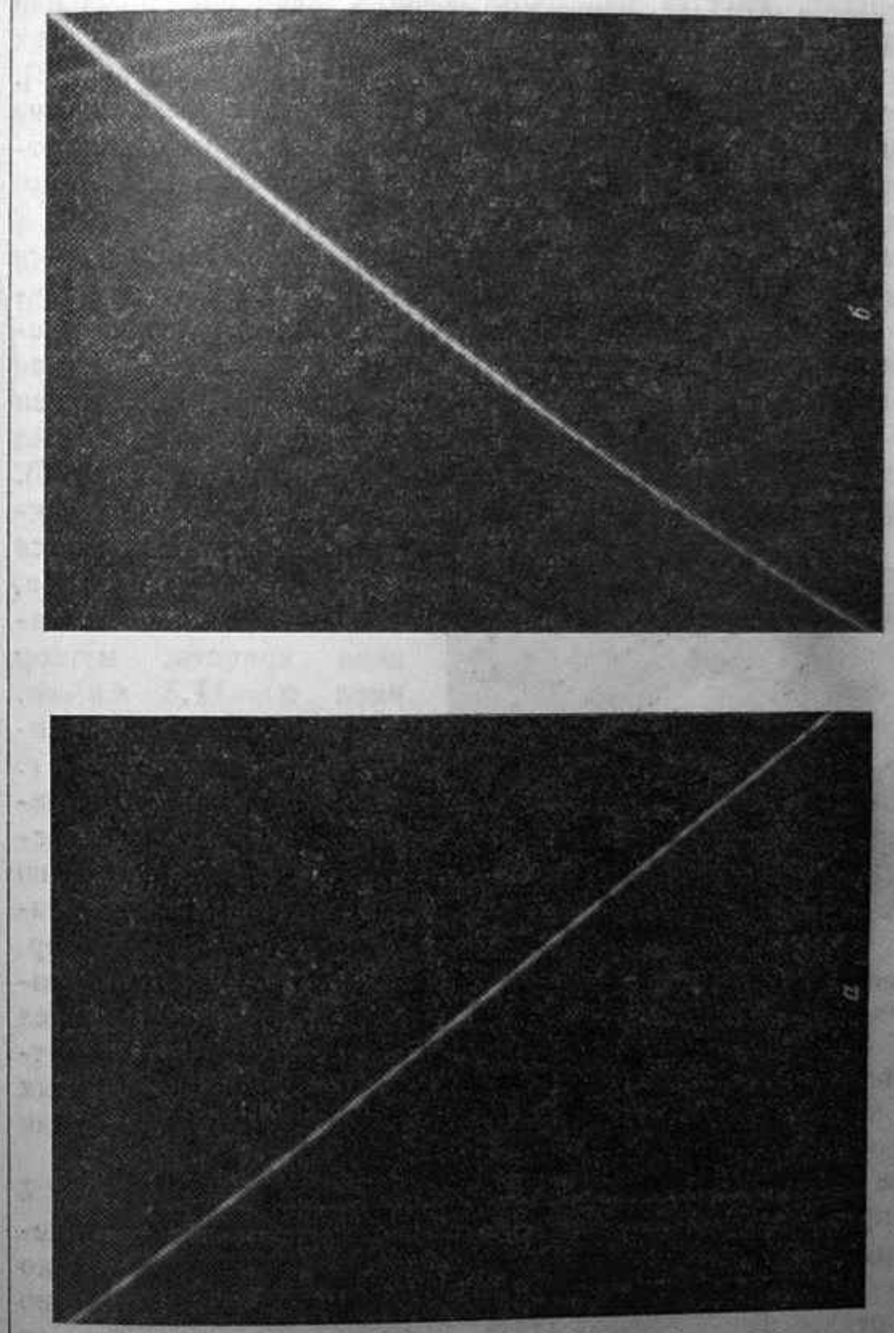


Рис. 165. *а* — Пульсации яркости метеора 12 декабря 1934 г. (фото Гарвардской обсерватории); *б* — вращение в полете фейерверочной ракеты — к концу полета (внизу) скорость вращения падает (фото И. С. Астаповича).

составит около 7 *м*, а у обычных метеоров много меньше даже при большой скорости v. Следовательно, заметная «змеевидность» траектории может быть обнаружена только в конце полета крупных медленных метеоров.

Тем не менее, имеется ряд фотографий с явно волнистой или змеевидной траекторией (рис. 165). Как оказывается, почти во всех случаях их период совпадал с периодом вибрации либо камеры [253], либо обтюратора [370]. Лишь в некоторых случаях искривления реальны, как об этом свидетельствуют визуальные наблюдения отдельных метеоров, массовые показания очевидцев полета некоторых болидов и отдельные фотографии.

Полет медленных красных метеоров иногда сопровождается в конце загибом траектории; более часто это происходит в тех случаях, когда происходит выпадение метеорита. Например, при падении метеорита Старое Песьяное 2 октября 1933 г. (Курганская область) болид в конце пути «вильнул»; метеорит Прамбакирхен (Австрия, 5 ноября 1932 г.) в конце полета, еще светясь, описал полупетлю в 240°, радиусом в несколько километров (см. гл. 30). На фотографии метеора 3 января 1935 г. (Англия) извилины траектории сопровождаются возникновением узелков, т. е. синхронным изменением яркости; метеор имел $v = 11{,}3$ *км/сек*, т. е. был крайне медленный. Уэстленд в 1911 г. получил фотографию метеора, которую он рассматривал как проекцию винтового движения. Стивенсон наблюдал метеор, оставивший винтообразно закрученный след (рис. 166), что было отчетливо видно в телескоп [160]. При полете некоторых дневных болидов их пылевой след располагался геликоидально *), как если бы он был образован вращающимся в полете телом.

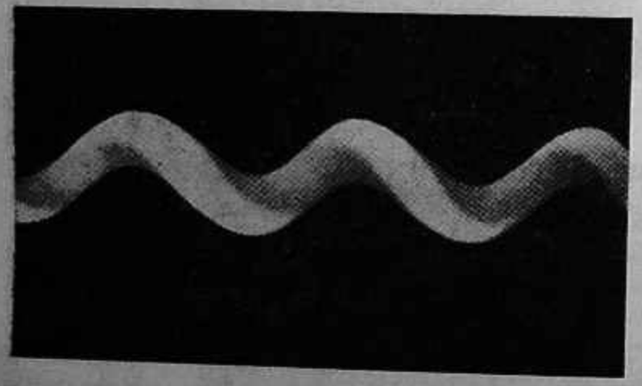


Рис. 166. Спиральное строение газового метеорного следа (рис. Стивенсона).

Движение метеорного тела может быть устойчивым, если угол δ мал. Устойчивость здесь надо понимать в том смысле, что изменения δ не выходят за некоторые пределы. При больших δ тело неустойчиво и начинает кувыркаться; ныне это хорошо известно при полете стратосферных ракет [113]. В баллистике прецессия оси снаряда используется, как известно, для того, чтобы заставить ось

*) Геликоид — поверхность, описываемая прямой линией, совершающей постоянное винтовое движение вокруг неподвижной оси.

снаряда описать половину конуса прецессии: тогда снаряд в конце полета падает вниз вершиной, а не тыльной частью. Мы знаем, что явление прецессии носит общий характер: им обладает и детский волчок, и небесное тело. Благодаря современным успехам теоретиков ныне известны условия движения тел при больших углах δ. Легко доказать аналитически, что после потери скорости v и ω в атмосфере положение оси вращения, т. е. угол δ, может быть произвольным.

В итоге мы должны считать, что во многих случаях метеорные тела обладают вращением, хотя обычно влияние его мало заметно. Но, как увидим далее, прецессионные явления важны в вопросах акустики метеорных тел, падающих на Землю в виде метеоритов (гл. 31).

ГЛАВА 21

ДРОБЛЕНИЕ МЕТЕОРОВ И МЕТЕОРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

§ 232. Введение. Наблюдения показывают, что иногда метеоры одного радианта появляются одновременно по два-три, либо один после другого через несколько секунд, иногда группой в течение полминуты-минуты (рис. 167). В других случаях они пролетают

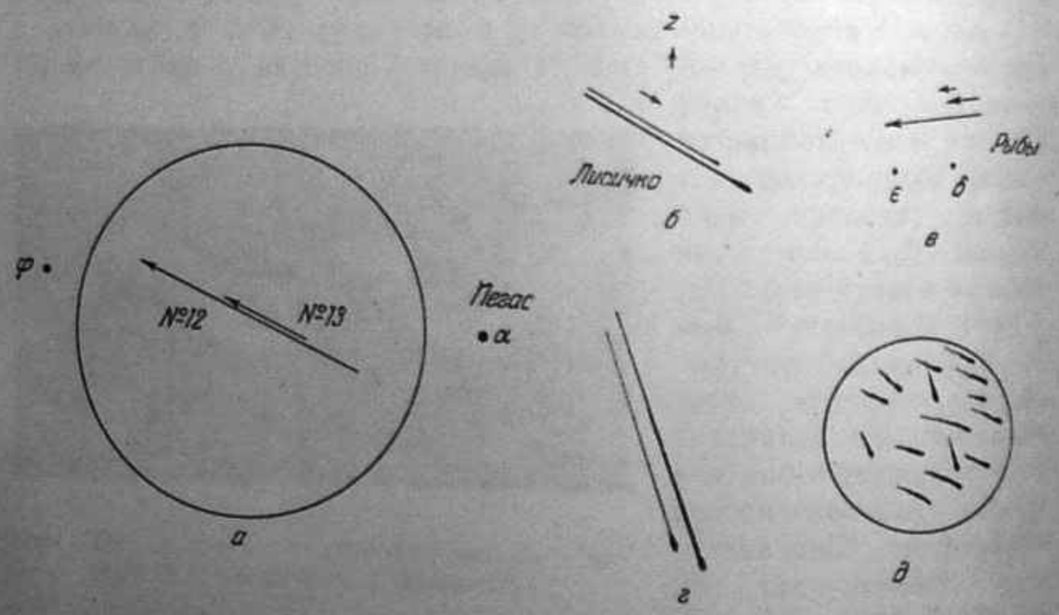


Рис. 167. Метеорные «близнецы»:

а — телескопические «близнецы», прошедшие в поле зрения бинокля с интервалом 1 *мин.* (γ-Аквариды, 5 мая 1933 г., набл. И. С. Астаповича); *б* — двойной телеметеор 6 и 7 вел. 25 августа 1932 г., расстояние 2′,7; *в* — телеметеоры, прошедшие поле зрения бинокля за 2 *мин.* (ε-Пегасиды, 28 августа 1932 г.); *г* — двойной метеор 29 декабря 1886 г. (по Деннингу); *д* — рой телеметеоров 28 ноября 1883 г. (по Бруксу).

рядом (рис. 168), иногда так близко, что раздельно увидеть их можно только на фотографии длиннофокусной камерой (рис. 169) или в телескоп. Радионаблюдения изредка также свидетельствуют о кратности некоторых метеоров (см. рис. 85). Подобные более или менее компактные группы метеоров, родственных по происхождению, условимся называть *метеорными комплексами*. Как оказывается, они являются неслучайным явлением и связаны с процессами эволюции

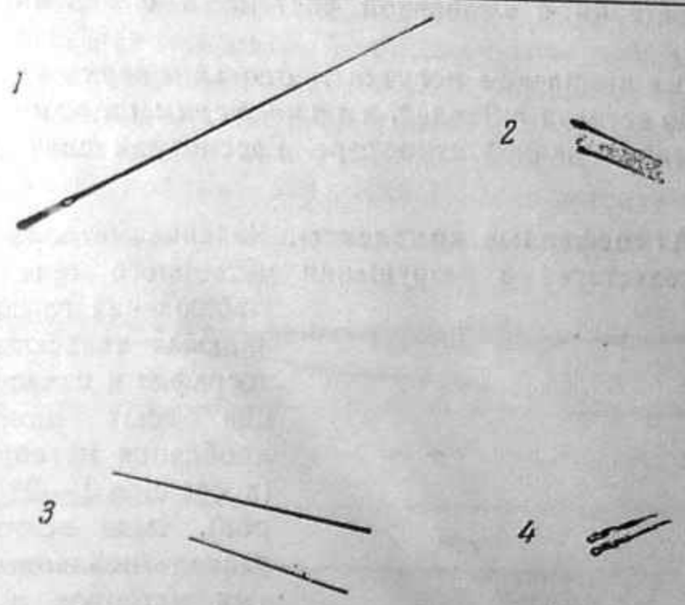


Рис. 168. Двойные метеоры:

1 — метеор 7 сентября 1925 г., очень медленный, разделился на две части, причем задняя к концу полета нагнала переднюю; *2* — двойной метеор 25 августа 1925 г. — 3,5 вел., расстояние 0°,1; *3* — одновременный полет 2 метеоров 3 вел., 21 сентября 1925 г. на расстоянии от 2° (в начале) до 3° (в конце); *4* — метеор 12 августа 1928 г. — 0,8 вел., τ=3,9 *сек.*, в конце пути разделился на два параллельных.

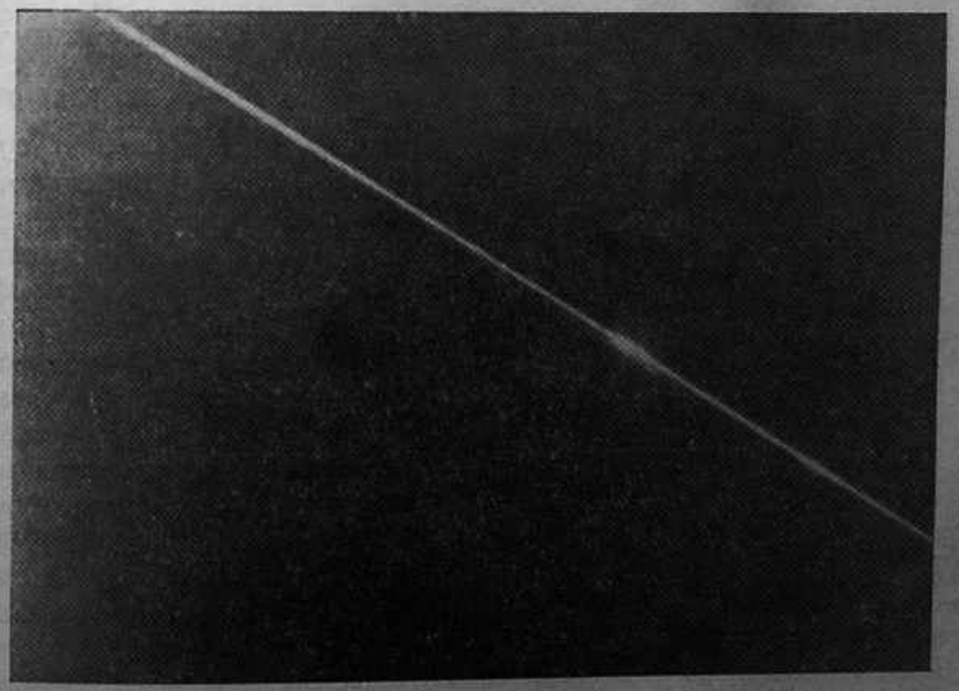


Рис. 169. Яркий метеор со слабым спутником (фото Гарвардской обсерватории).

метеорной материи в солнечной системе и с явлениями в земной атмосфере.

Метеорные комплексы могут быть *доатмосферными*, т. е. существовавшими до встречи с Землей, и *атмосферными*, возникшими в процессе дробления в земной атмосфере. Рассмотрим сначала последние.

§ 233. Атмосферные комплексы. Явление метеора уже само по себе свидетельствует о разрушении метеорного тела в атмосфере. Наблюдения глазом (рис. 170), включая телескопические, фотография и отчасти радиолокация дают много примеров дробления метеоров в полете (в среднем 1—2% всех метеоров). Чаще всего происходит распад медленных красноватых метеоров в конце пути. В более редких случаях отделяется маленький «спутник», «осколок» или «искра», быстро угасающие с резким торможением. Для двух сферических тел радиусами R и r поперечная нагрузка будет $\frac{M_1}{4\pi R^2} = \frac{c_x \rho v^2}{j_1}$ и $\frac{M_2}{4\pi r^2} = \frac{c_x \rho v^2}{j_2}$, откуда отношение торможений $j_1 : j_2 = R : r$, т. е. обратно пропорционально размерам тел. Поэтому при движении метеорного комплекса в атмосфере всегда более крупные компоненты уходят вперед, а мелкие — отстают. Это также хорошо видно на расположении упавших метеоритов («эллипс рассеяния»). Более мелкие метеорные тела быстрее прогреваются и, вероятно, иногда превращаются в жидкие капли, очень сильно тормозящиеся.

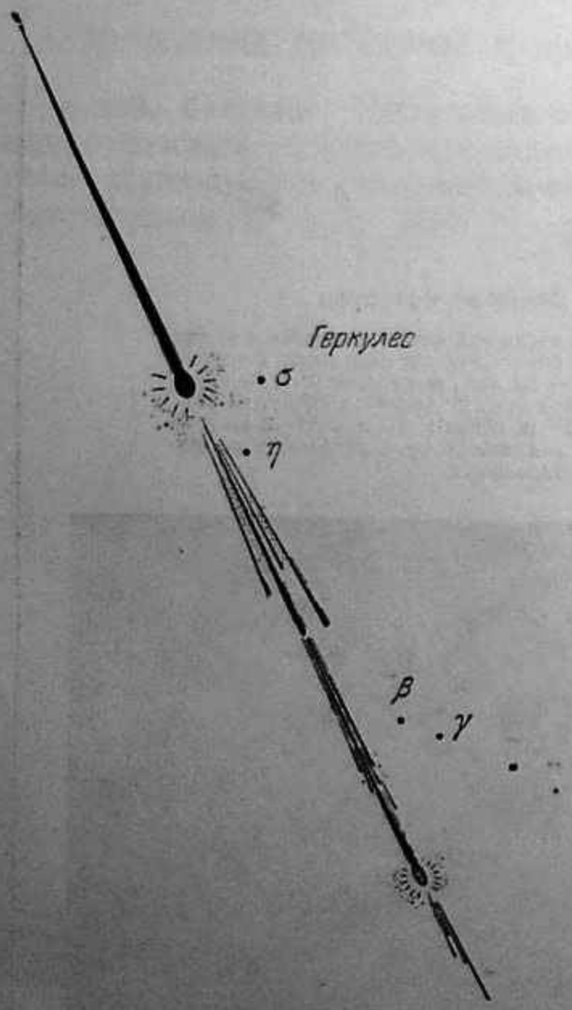


Рис. 170. Общая картина дробления яркого болида по наблюдениям простым глазом (болид 8 августа 1926 г., набл. И. С. Астаповича, Николаев).

Эти визуальные данные недавно были подтверждены фотографиями метеоров +3 вел., полученными камерами «Супершмидт» в США [586]. В некоторых случаях торможение этих метеоров было

в сотни раз больше, чем обычных, как если бы они распадались на множество капель или осколков. Телескопические наблюдения показывают, что иногда здесь возникает легкое облачко. Имеется ряд фотографий, где видно расщепление траектории метеора на две или больше; точка расщепления может быть взрывом, вспышкой или быть ничем не примечательной (рис. 171). Иногда, если метеор был быстрым,

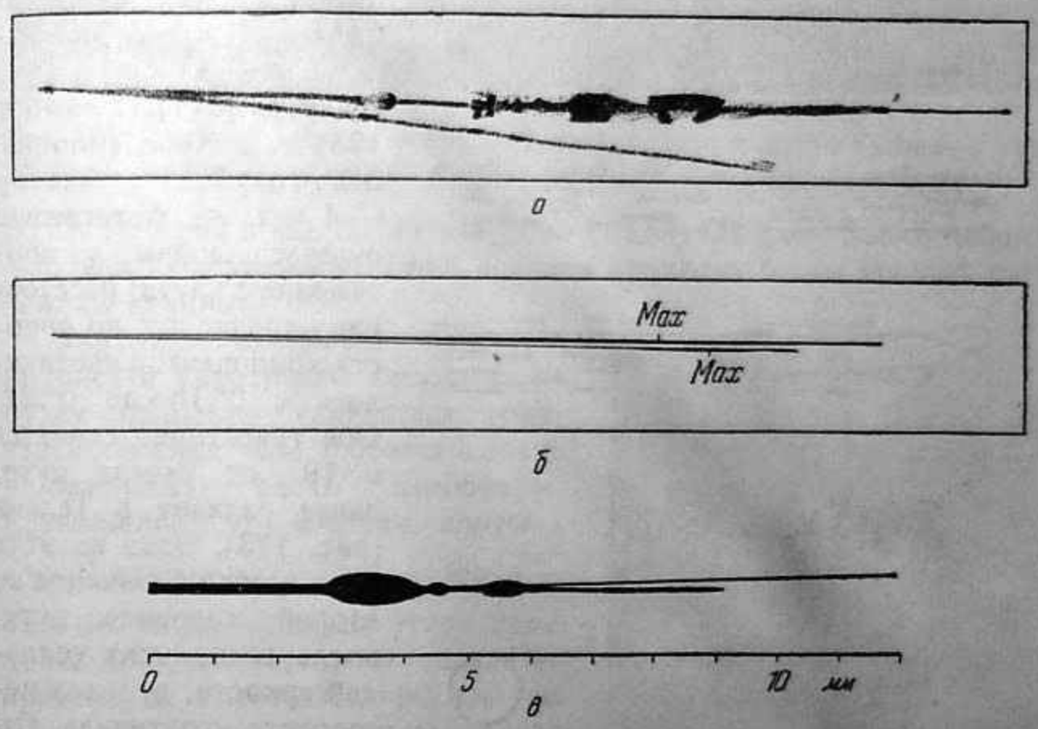


Рис. 171. Расщепляющиеся метеоры (рисунки с фотографий):

а — метеор 19 ноября 1938 г., 1 вел. (фото Циммермана и Хаммонда, обсерватория Маунт-Вильсон (США); *б* — метеор со спутником 11 августа 1936 г. — 1 вел. (фото К. П. Станюковича, экспедиция МОВАГО на Апшеронский полуостров); максимумы яркости метеоров не совпадают, спутник в конце отклонился; *в* — метеор 27 октября 1951 г. (фото З. Цеплеха, Меживрaты, Чехословакия); угол расхождения 1°33′, высота расщепления 62,5 *км*, концов — 60,6 и 59,5 *км*.

каждая часть после дробления оставляет метеорный след, что позволяет лучше восстановить картину дробления. В телескоп дробление наблюдается у 1—2% всех метеоров, у болидов оно чаще (> 10%), а у метеоритов должно считаться скорее правилом (> 50—60%). Если падение происходит ночью, то часто виден распад болида на сноп «искр» в конце пути (рис. 172); в проверенных случаях число этих «искр» соответствует числу упавших метеоритов. Такие же искры, на высотах $H = 10$—40 *км* и более, соответствуют гораздо более мелким частицам; по телескопическим наблюдениям они могут быть даже 6—9 вел. Визуально и фотографически отмечены случаи, когда после взрыва метеор не виден на протяжении нескольких градусов, а затем появляется вновь и достигает той же яркости. Это значит, что метеорное тело сбросило при взрыве поверхностный слой

и воздушную подушку, которые потом возникают вновь. Радиус разброса частиц достигает километра и более. Сикора нашел, что вещество выбрасывается вбок и назад. Батлер в 1895 г. получил фотографию, где в конце пути метеора частицы разлетаются радиально, а направление главной частицы отклонилось от начального на несколько градусов [571]. 7 ноября 1934 г. в Кобе (Япония) бело-голубой метеор —4 вел. на фотографии оказался двойным на протяжении 8° пути; расстояние одинаковых по яркости компонентов увеличилось с 0°,15 до 0°,22. Обе траектории сходятся в 19° от начала пути, давая радиант в Тельце (рис. 173). Один из этих *метеорных близнецов* во второй половине пути, после нескольких усилений яркости, отделил метеорного «спутника», который прошел 2° и исчез на расстоянии 0°,02 от него, описав извилистый путь. 14 декабря 1933 г. яркий геминид был снят трижды — в Кэмбридже (США) и за 37 *км* — в Ок-Ридже. Свой путь длиной 48°,8 или 91 *км* метеор прошел от $H_1 = 80{,}1$ до $H_2 = 50{,}8$ *км* и на $H = 57{,}6$ *км* расщепился; более крупный осколок отклонился на 2′39″, более слабый на 4′42″. Сравнение базисных снимков указало на неоднородность их излучения. Цеплеха [572] описал по базисным снимкам 27 октября 1951 г. расщепление при взрыве южного таурида — 7,8 вел. на $H = 62{,}5$ *км* (рис. 171, *в*); осколок отклонился на 1°33′ и со скоростью $> 0{,}72$ *км/сек* прошел

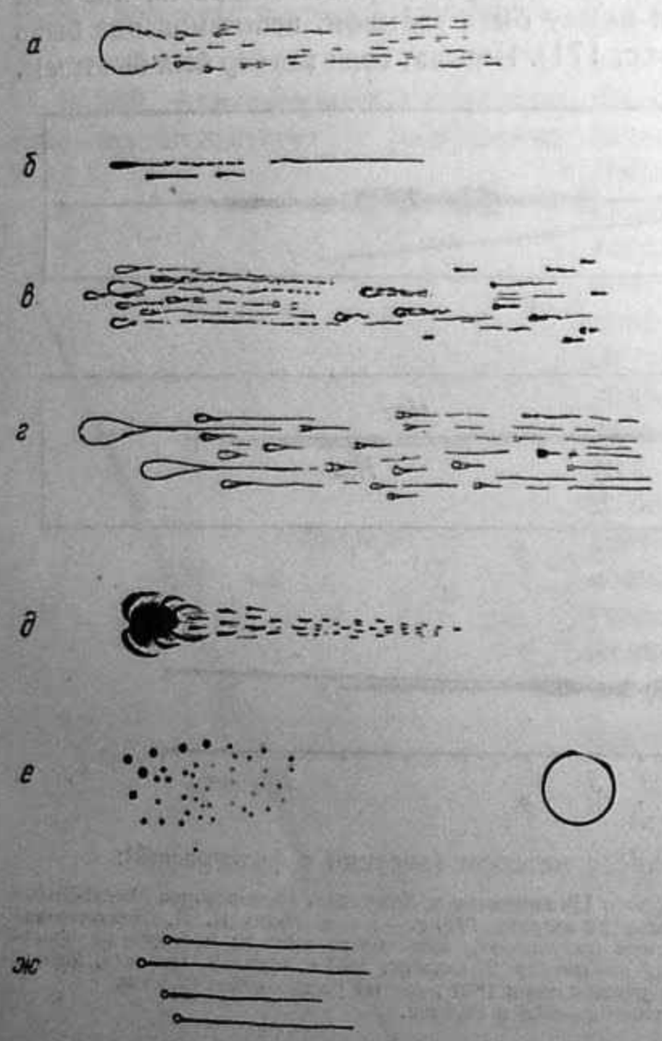


Рис. 172. Кратные метеоры:

а — болид 1 сентября 1925 г., белый, спутники красноватые (Г. К. Циммерман); *б* — метеор 23 апреля 1930 г., 5 вел., в 175-миллиметровый рефрактор (С. М. Селиванов); *в* — сложный болид, сентябрь 1924 г., Германия; *г* — болид 19 октября 1863 г., наблюдавшийся в кометоискатель 14 *сек*, ширина 15′, зеленые метеоры с красными хвостами (по Ю. Шмидту); *д* — болид 7 июня 1878 г. (Деннинг); *е* — рой метеоров 6 октября 1952 г. (С. Н. Григорьева), справа для сравнения диск Луны; *жс* — болид 27 июля 1874 г. (Таккини).

до $H = 59$ *км*, тогда как более крупная часть угасла на $H = 60{,}6$ *км*. Массы их оказались 2,5 и 0,014 *г*, энергия выброса $> 3{,}6 \cdot 10^7$ *эрг*.

Рис. 173. Тройной метеор — 4 вел. 7 ноября 1934 г. (фото Кубокава, Кобе, Япония). Длина 8°. Нижний метеор имеет на оригинале слабого спутника.

В. П. Цесевич в Одессе 11 мая 1955 г. получил фотографию либрида —5 вел., где также меньший осколок проходит более длинный путь, нежели крупный.

Учитывая сказанное ранее о хрупкости метеорного вещества, не будем особенно удивляться тому, что метеорные тела дробятся в очень разреженных слоях атмосферы. Естественно, что в более плотных слоях аэродинамический напор $\rho \frac{v^2}{2}$ больше, и разрушаться будут даже более прочные метеорные тела. Например, на высоте $H = 50$ *км* при скорости $v = 10$ *км/сек* аэродинамическое давление составит десятки атмосфер, что достаточно для разрушения некоторых каменных метеоритов. Некоторые метеориты дробятся даже ниже области задержки [561], т. е. после того, как прекращается свечение.

Рис. 174. Сложение расколовшихся в полете кусков каменного метеорита Жовтневый Хутор показывает, что в результате эрозии после раскола потерян слой толщиной в несколько миллиметров (по Е. Л. Кринову).

§ 234. Дробление метеоритов. Упавшие на Землю метеориты в некоторых случаях могут быть сложены в одно целое [561]. Как оказывается, осколки покрыты снаружи *первичной* корой, а по поверхности разлома — *вторичной* корой плавления, более тонкой. Дефект массы при этом может достигать слоя в несколько миллиметров (рис. 174). Все это указывает на дробление метеорита в атмосфере, причем в равной степени это относится как к железным, так

и к каменным метеоритам. Дробление при этом происходит по линиям спайности, параллельно граням кристаллических структурных элементов, т. е. по линиям наименьшего сопротивления. Железные метеориты благодаря большой прочности дробятся реже (каменных метеоритов массой более тонны нет ни одного, а железных свыше 20), однако даже такие гиганты, как Сихотэ-Алинский метеорит, с начальной массой в сотни тонн, могут разрушаться на сотни кусков. Быстрые встречные метеориты из области апекса вообще не достигают поверхности Земли, разрушаясь нацело; они наблюдаются в форме очень ярких болидов. Лишь в редких случаях при этом на Землю выпадает рой очень мелких (доли грамма) метеоритов (например, Телеутское Озеро, 11 мая 1904 г., Пасамонте, 24 марта 1933 г.). Чем больше скорость тела, тем больше выпадет мелких осколков, тем они будут мельче и тем компактнее они расположатся. Напротив, очень медленные метеорные тела дают лишь несколько (даже один) крупных метеоритов, выпадающих на проекции траектории на большом расстоянии друг от друга. Практика вполне подтверждает сказанное [562], при этом состав вещества метеоритов роли, по-видимому, не играет.

§ 235. Доатмосферные комплексы существуют до встречи с Землей составляющих их метеорных тел — *компонентов* комплекса. Геометрическим критерием того, что они проникли роем извне, а не образовались путем дробления в атмосфере, служит точка пересечения обратно продолженных их видимых путей. Если она попадает в радиант, значит, комплекс — доатмосферный, в противном случае она указывает ту точку траектории, где в атмосфере произошло дробление. Два метеора одного радианта, появившиеся в разных участках неба одновременно, мы называем парными; в очень редких случаях наблюдаются тройственные метеоры. Метеор, состоящий из двух близких компонентов, мы называем двойным (рис. 168). Они могут лететь рядом, либо один сзади другого, либо один сбоку и позади другого. Более слабый мы называем *спутником*, более яркий — *главным метеором*. Русскими наблюдателями уже давно было замечено, как иногда по пути яркого метеора или болида несколько десятков секунд спустя проскальзывает более слабый — «попутчик». Реже видны тройные и четверные метеоры, ныне имеются их фотографии, вплоть до пятикратного метеора. Линейные расстояния компонентов парных метеоров — десятки и сотни километров, двойных визуальных — от нескольких километров до десятых долей километра, телескопических двойных — менее 0,1 *км*.

Из 4000 визуальных метеоров, зарегистрированных автором в Николаеве в августе 1928 г., двойным был один (два ядра 2,5 вел. под общей оболочкой, летевшие рядом и параллельно на расстоянии 10′). Среди 186 метеоров, наблюдавшихся в бинокль и кометоискатель в 1933—1933 гг., двойных было пять. В 1934 г. в Мил-

воки (Канада) за 270 часов в 10-дюймовый рефрактор отмечено 86 телеметеоров, из них интервал Δt менее 1 секунды был между появлениями 7 раз. Это были парные телеметеоры.

§ 236. Метеорные близнецы. Скиапарелли в «Письмах к Секки» ставил задачу об устойчивости роя метеорных тел в поле тяготения Солнца. При достаточно малом расстоянии двух частиц с массами M_1 и M_2 приливная сила Солнца не в состоянии их разъединить. Но в начале XX в. Пойнтинг, а затем Робертсон показали, что имеется еще один фактор — динамический эффект радиации, заключающийся в том, что при движении вокруг Солнца частица вследствие аберрации получает радиацию от Солнца больше на переднюю половину, чем на противоположную, переизлучает же ее изотропно. Вследствие этого возникает возмущение, заставляющее частицу двигаться по спирали вокруг Солнца и в конце концов падать на него. Впервые на значение этого для метеорных частиц было указано автором в 1941 г. [553]. Плавец [582] в 1952 г. вычислил, что разность Δa изменений больших осей орбит двух частиц плотности ρ и с радиусами r_1 и r_2, вначале двигавшихся вместе, за один оборот составит

$$\Delta a = -\frac{2\pi a h (2+3e^2)(r_1 - r_2)}{r_1 r_2 \rho k \sqrt{p}(1-e^2)}. \qquad (103)$$

Здесь k — постоянная тяготения, $h = 732 \cdot 10^{-11}$ (коэффициент пропорциональности). Таким образом, «метеорные близнецы» со временем начинают расходиться, тем быстрее, чем больше разница их размеров, чем они мельче и чем больше эксцентриситет орбиты. Под влиянием приливного действия Солнца более близкий к Солнцу близнец уйдет вперед, независимо от массы; в случае эффекта радиации вперед уйдет меньший близнец и тем дальше, чем он меньше. По подсчету Плавеца, за год в потоке Леонид такие близнецы разойдутся на 130 *км*, в Лиридах — на 920 *км*, в Драконидах — на 38 *км*.

В. В. Радзиевский [566] полагает, что имеют значение другие явления, как, например, влияние массы, теряемой Солнцем в форме потока корпускул, за счет чего эффект увеличивается в 10^3 и более раз, и что распад поэтому происходит гораздо быстрее. Но раз двойные и парные метеоры нами наблюдаются (рис. 175), то приходится допустить, что либо составляющие их компоненты одинаковы по размерам, либо они возникли совсем недавно. Видимо, имеют место оба факта: доатмосферные двойные и вообще кратные метеоры, как парные и тройственные, почти всегда одинаковой яркости, на что не раз обращали внимание наблюдатели. Мало того: особенно поразительно сходство основной массы метеоров во время метеорных дождей; они как бы «нарочно подобраны» по яркости один к другому. Теперь мы видим, что эта сортировка — влияние указанного эффекта; чем старше поток, тем она совершеннее, например, в Драко-

нидах телеметеоров много рядом с болидами, в Персеидах их почти нет, Андромедиды 1885 г. были все 4 величины и т. д.

Причиной возникновения метеорных близнецов может быть неравномерное нагревание крупных метеорных тел Солнцем; вспомним, что в пустынях скалы, охлаждаясь после захода Солнца, трескаются со звуком пушечного выстрела и отбрасывают куски на несколько метров в сторону. По-видимому, поверхность и даже более глубокие слои старых каменных метеорных тел подобны рыхлой и пылеобразной поверхности Луны. Это следствие «космической эрозии». В этом случае большая «парусность» метеоров некоторых старых потоков станет понятной: метеорные тела, имеющие низкую плотность, будут подобны снежинкам, имея большую поверхность при малой массе. Естественно, что дробление и разрушение таких частиц происходит легко [552]. Напротив, метеорные тела молодых потоков более компактны и имеют большую плотность.

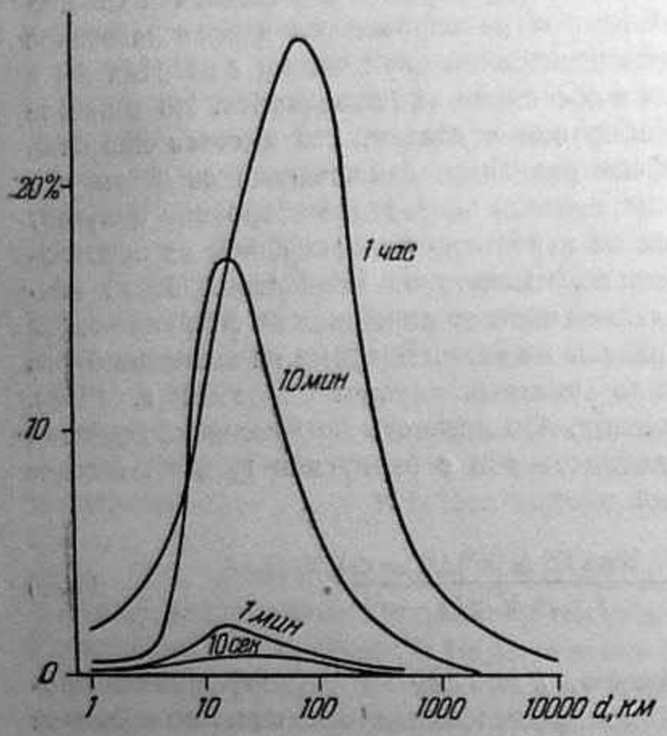


Рис. 175. Процент двойных метеоров общего происхождения в зависимости от расстояния d обоих компонентов, наблюдающихся с различными интервалами времени (Д. Хоффлейт, 1937 г.).

§ 237. Болиды как рои метеоров. Во многих случаях метеор, представляющийся глазу обычным, оказывается двойным на фотографии или в телескоп (рис. 172). В уже описанном наблюдении болид 18 октября 1863 г. состоял более чем из десятка отдельных метеоров; простым глазом он казался одиночным с диаметром 10—15′. Н. Н. Евдокимов в 1898 г. в Харькове в бинокль видел болид, состоявший из четырех частей. В таком случае объяснимы болиды «прямоугольных», «неровных» и вообще неправильных очертаний, как, например, наблюдавшийся 19 августа 1926 г. близ Киева Э. Рутгером «угловатый» болид, или болиды до 2—5° поперечником. В некоторых случаях, действительно, такие болиды потом «расползаются» на части, как, например, болид 16 ноября 1927 г. в США, оказавшийся состоящим из дюжины меньших.

§ 238. Туманные метеоры. Представим теперь, что у нас тесная группа слабых метеоров; увидеть их порознь мы не сможем, но вся масса покажется в виде слабого туманного сгустка. В литературе есть много упоминаний о таких туманных метеорах; по Шмидту они всегда слабее 3 величины и даже иногда проходят по Млечному Пути в виде темных (!) масс; Скиапарелли сравнивал их с маленькими кометками, которые затем распадаются на множество мельчайших метеоров. К 1901 г. Борниц (Германия) собрал каталог 87 таких метеоров за все историческое время, но некоторые из них, вероятно, относятся к метеорным следам (слабые леониды оставляют след более яркий, чем сам метеор). К сожалению, каталог Борница не был опубликован, а затем затерялся.

Подобные туманные метеоры, диаметром до 1°, встречаются редко: примерно один на тысячу обычных. Шмидт приводит 14 случаев за много лет. 26 августа 1928 г. в Николаеве был отмечен такой метеор 3 величины диаметром 20′. Он был быстрым и за $^1/_4$ *сек*, не меняя направления и скорости, в конце распался на сноп 20—25 отдельных крохотных метеоров 5—6 вел., очень резко очерченных. Здесь нужна осторожность: опубликованная полвека назад в «Astronomische Nachrichten» фотография «метеорного роя» оказалась рефлексом капельки воды, как, впрочем, и другая фотография там же «извилистого метеора», оказавшаяся световым бликом через щель камеры (!). 26 мая 1915 г. на острове св. Маврикия наблюдался туманный шар, диаметром 0°,5, распавшийся на рой мелких метеоров. Деннинг и Гейс наблюдали такие шары неоднократно. Из семи метеоров диаметром 0°,5—1°,0 (из 16 736 в ашхабадском ряде) один имел яркость —1 вел., по одному 1 и 2 вел., три 3 вел. и один 4 вел., однако некоторые из них «расплылись» в облачко пара или пыли. За 1909—1913 гг. Гофмейстер приводит четыре подобных случая, считая, что туманные метеоры вызываются сгустком космической пыли (Staubmeteore).

§ 239. Метеорные рои. В. В. Ястребцев [570] 8 (21) апреля 1912 г. отметил «легкий прозрачный рой мелких искорок-звезд, погасших затем почти одновременно». Другой рой, похожий на Плеяды, видел М. Х. Кадыров в Ашхабаде в 1946 г. Там же С. Н. Григорьева отметила в сумерках 6 октября 1952 г. полет в течение 3 секунд подобного же компактного роя диаметром 1°,5, числом в несколько десятков беловатых метеоров 3 вел.; более яркие были круглыми (рис. 172, *е*). К. Трэйл (Донго, Онтарио) описала 1 мая 1835 г. «замечательное метеорное явление» — скопление метеоров, «следовавших один за другим в живой последовательности», как цепочка звезд. В. Касьянов (Ашхабад) видел рой из шести метеоров 12 мая 1942 г., самый яркий был 2 величины; они были быстрые, со следами. Падению каменного дождя в Хайрпуре 23 сентября 1873 г. предшествовал полет роя болидов. Как общее правило, при этом в рое более

крупные метеоры идут впереди: из-за указанной роли поперечной нагрузки мелкие тела отстают. Можно привести только из литературы свыше сотни примеров. Из-за разницы торможений рой растягивается, превращается в вереницу метеоров, возглавляемую самым ярким. Обычно это имеет место в атмосферном рое, возникшем при полете. Так как более мелкие члены процессии угасают раньше, то ее завершают наиболее крупные. Это видно как простым глазом, так и в бинокль и телескоп; фотография, к сожалению, здесь пока бесполезна. Кроме уже описанных наблюдений Шмидта, Селиванова, Евдокимова, Морозова и др., в телескопы наблюдались рои не только ярких метеоров, но и слабых, притом в большем числе (А. М. Бахарев в Сталинабаде, Поултер в Литтл-Америке (Антарктида) в 1934 г.). 28 ноября 1883 г. Брукс в 10-дюймовый рефлектор видел «удивительный поток телескопических метеоров»; поле зрения в 1°,5 диаметром в течение 1—2 *сек* заполнили телеметеоры, оставлявшие слабые следы. Он пишет, что обычно телеметеоров много, двойные очень редки, а этот рой — непревзойденный (рис. 167, *д*). Деннинг из 1067 телеметеоров за 1866—1930 гг. лишь однажды отметил телеметеор из нескольких частей (разной яркости) на расстоянии до 120″.

§ 240. Рои болидов наблюдаются в редких случаях, поскольку даже один болид — редкое явление. Однако благодаря яркости они привлекают больше внимания. Не касаясь исторических описаний, приведенных во введении, отметим кратковременный полет 40 болидов над Прусской Саксонией 12/13 декабря 1830 г. (геминиды?), рой из нескольких десятков болидов над Скандинавией 9 февраля 1931 г. и наиболее грандиозный 9 февраля 1913 г. (в ту же дату, но из другого радианта): в течение 10 минут три большие группы из сотни болидов прошли по линии Канада — Бермудские острова — экватор путь в 8400 *км*; с суши и с кораблей имеется 144 наблюдения; группы шли на разной высоте, наиболее близкая к Земле прошла над Онтарио на высоте 42 *км* со звуками, более высокие прошли дальше над Атлантикой со скоростью 14 *км/сек*.

§ 241. Метеоритные дожди, как каменные, так и железные, известны на протяжении последних трех тысячелетий. В Намалэнде (Африка, $\varphi = 25°$ ю. ш., $\lambda = 18°$ в. д.) имеется более 50 крупных железных метеоритов тождественного состава, рассеянных на большой площади и упавших тысячи лет назад, общим весом свыше 15,5 тонн. Несколько железных дождей найдено в пустынях Южной и Центральной Америки. Лучше всего исследовано железное Сихотэ-Алинское падение 12 февраля 1947 г. (сотни обломков). В ряде случаев количество выпавших метеоритов измерялось тысячами. Вообще одиночные падения более редки, чем кратные, и чаще встречаются у железных метеоритов. Иногда число болидов соответствует числу найденных

метеоритов (26 мая 1751 г. в Хорватии, 23 июля 1872 г. во Франции), но обычно дождь метеоритов есть результат атмосферного дробления в более плотных нижних частях атмосферы, пока еще значительна космическая скорость метеорных тел. Именно здесь, в области задержки, как мы знаем, торможение наибольшее и, следовательно, разрывающие усилия максимальны. При падении метеорита близ Пултуска (Польша) 30 января 1868 г., по некоторым сведениям упал метеорит того же состава в Носи-Бе (Мадагаскар) и в Леричи (Италия). Расстояния между траекториями превышают тысячу километров. Из-за действия поперечной нагрузки упавшие на землю метеориты располагаются на эллиптической *площади рассеяния* (рис. 176), притом

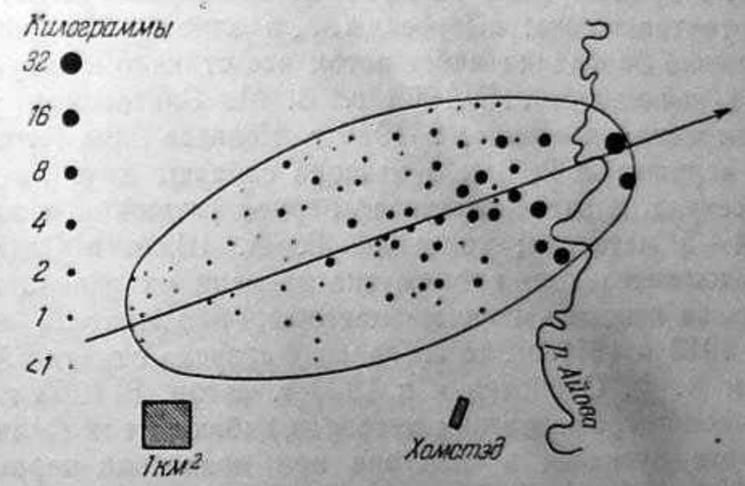


Рис. 176. Эллипс рассеяния каменного метеоритного дождя Айова 12 февраля 1875 г. (по Фаррингтону). Мелкие метеориты — в тыловой части эллипса.

более крупные в ее передней части, более мелкие — в тыльной. Протяженность большой оси составляет до 140 *км* (Саратов, 6 октября 1918 г.). Бер в 1928 г. даже полагал, что правильные вереницы мелких кратеров на Луне, например, в окрестностях Коперника, образованы подобными роями метеоритов, очевидно, доатмосферными комплексами. Принципиально это возможно, но вряд ли в отношении тех кратеров, какие имел в виду Бер. Кроме того, метеоритные дожди в основном возникают как атмосферные комплексы; если бы они были только доатмосферными, то их число измерялось бы единицами.

§ 242. Метеорные сгущения. На примере болидов мы ознакомились с комплексами, растянутыми в пространстве на расстояние, сравнимое с диаметром нашей планеты, и наблюдаемыми на протяжении до 10 минут. Заменив мысленно болиды обычными метеорами, получаем *сгущения*, дающие кратковременные метеорные дожди, вроде загадочного дождя 2 января 1878 г. из спорадического радианта

$\alpha = 105°$, $\delta = -27°$, или наблюдавшегося 20 ноября 1925 г., когда из спорадического радианта $\alpha = 97°{,}5$, $\delta = +85°$ за 10—15 минут вылетели сотни метеоров, отмеченных в Николаеве (УССР) и в Виргинии (США). Подобные сгущения встречаются и в периодических потоках, например, в Лиридах, продолжаясь час-полтора; в 1741 г. Крафт в Петербурге и в 1798 г. Брандес и Бенценберг в Геттингене отметили обилие Андромедид, действовавших тогда около 6 декабря.

§ 243. Метеорные облака. В 1902 г. В. К. Цераский обнаружил, что в таком большом потоке, как Персеиды, падение метеоров не происходит равномерно: они «падают больше в одном, потом в другом созвездии... с промежутками по два и по три зараз». Д. О. Святский в 1902 г. отметил то же: «Персеиды... в одном каком-либо направлении учащенно бороздили небо, потом все стихало и вдруг в другом месте снова начиналось». В 1909 г. В. М. Златинский упоминает о падении персеид «пачками», в 1910 г. Кениссе близ Парижа поразился, что «группы в 2, 3 и 4 метеора следуют друг за другом за несколько секунд, а затем наступает период затишья» и затем новая группа в 4—5 метеоров; тогда же Г. А. Шайн в Одессе писал: «После продолжительного промежутка времени их падало несколько сразу»; начиная наносить первые метеоры, наблюдатель терял всю «пачку». В 1913 и 1915 гг. то же явление «пачек» отметил А. А. Аленич, а затем А. Ф. Субботин и в 1926 г. автор. В 1953 г. в Ашхабаде при кинематографировании метеоров наблюдатели были наготове и киноаппарат пускался в действие при появлении первых членов пачки. В 1928 г. А. Ф. Субботин в Ташкенте провел счет Персеид силами 6 наблюдателей. Поток был очень богат, за час было отмечено 2920 не-общих метеоров в серии пачек (рис. 177). В 1939 г.

Рис. 177. Метеорные пачки в потоке Персеид 1926 г. (по А. Ф. Субботину).

Мохаммед-Хан в Индии отметил «квантованное» падение персеид. Для уточнения вопроса Ашхабадская астрофизическая лаборатория обратилась к обсерваториям Сталинабада, Абастумани, Одессы, Львова и другим с просьбой производить счет персеид одновременно. Наблюдения на огромной дуге в 4000 *км* проводились в 1950, 1951 и 1953 гг.; причиной появления пачек оказалось клочковатое строение потока [564] из-за метеорных облаков.

Метеорные облака оказались разных размеров: одни из них проходят за десяток секунд и состоят из нескольких метеоров на расстоянии в несколько сотен километров (рис. 178). Они являются

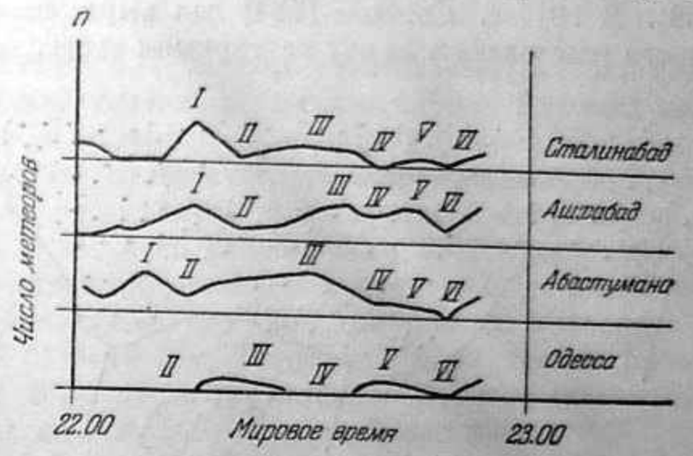


Рис. 178. Одновременные наблюдения метеоров на базисе 4000 *км* указывают последовательность прохождения метеорных облаков (*I*, *III* и *V*) и лакун (*II*, *IV* и *VI*) через пункты наблюдений (по А. П. Саврухину, ААЛ).

тогда «местной пачкой». Другие, более крупные, состоят из сотен и тысяч компонентов, имеют ширину в несколько тысяч километров, продолжаются 2—3 минуты и наблюдаются одновременно в точках, удаленных на 1000 *км* одна от другой. Наконец, имеются мощные метеорные облака, во много раз превышающие размеры Земли, проходящей сквозь такое облако за 10—15 *мин*, т. е. путь 20—30 тыс. *км* (рис. 179). Число метеорных тел в таком облаке составляет сотни тысяч и миллионы с общей массой в десятки килограммов. Они дают пачку, видимую на всем полушарии Земли, обращенном к радианту. Между метеорными облаками могут быть «лакуны», почти лишенные метеорных тел, что вызывает «затишья» на 10—15 минут даже в ночи максимума потока, как, например, 11 августа 1948 г. Облака вытянуты вдоль орбиты на расстояние, в 5—10 раз превосходящее их ширину; среднее расстояние между ними в 2—4 раза больше их протяженности. Учитывая кривизну Земли и сопоставляя моменты вступления пачки, можно даже находить грубые очертания контуров «фронта» метеорного облака. 12 и 13 декабря 1953 г. нами кинематографировались пачки геминид на экране радиолокатора. Получались (при зондировании наклонным пучком) как непосредственные отражения от геминид, так и двукратные отражения радиоволны от Земли и от ионосферы, позволявшие наблюдать метеоры почти на

трехкратном расстоянии (свыше 1000 *км*). Хорошо было видно появление метеорного фронта сначала на дальнем расстоянии, через несколько секунд — на близком, либо наоборот. В целом, однако, у этого потока пачки менее резки.

Клочковатая структура может быть и у некоторых более слабых потоков. В 1953 г. Возарова и Кресак клочковатости Персеид не нашли [559]. В 1917 г. Свобода [584] дал выражение для нахождения линейного расстояния n между метеорными частицами в потоке,

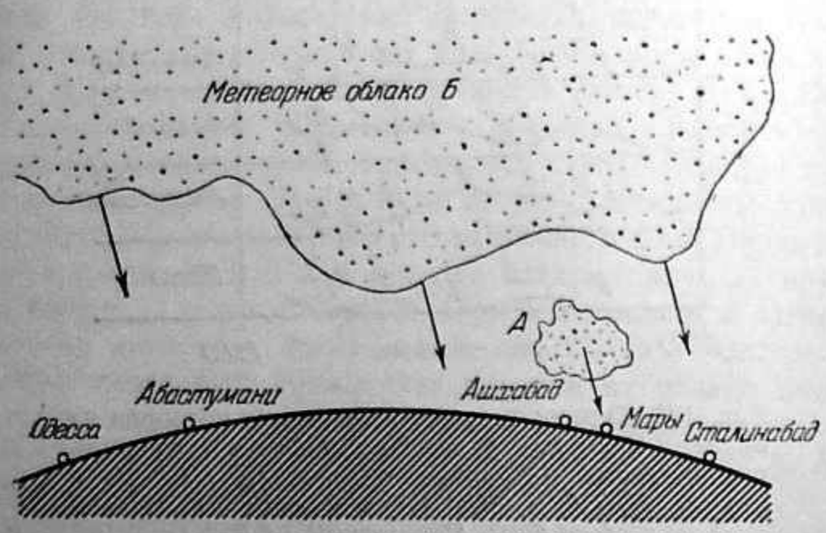


Рис. 179. Небольшое метеорное облако (A) наблюдается в виде пачки метеоров на одной или нескольких близких станциях. Протяженное облако ($Б$) захватывает удаленные станции, хотя и не одновременно из-за неправильной формы фронта облака.

если известно часовое число, среднее значение косинуса зенитного расстояния радианта и высота H метеоров:

$$r = \sqrt[3]{\frac{C v_g \overline{\cos z_R}}{n_h}}; \qquad C = 3600 \cdot 0{,}232 \sqrt{2\pi}\,(2\rho + H). \quad (104)$$

Например, ориониды 1900—1909 гг. при $n_h = 20$ дали $r = 3426 \pm 44$ *км*. Даже в наиболее густых частях метеорных роев, производящих дожди ранга 3, $r = 30$—40 *км*. В очень бедных потоках с $n_h = 0{,}2$ расстояние соседних частиц может доходить до 10^8 *км* (!) и все же, однако, может быть доказана их общность.

§ 244. Статистика падений метеоров показывает, что падения парами или группами происходят действительно чаще, чем должно быть по теории вероятностей. В 1951 г. А. С. Агаджанова [550] использовала функцию Пуассона распределения вероятностей: если

N — число вероятных случаев, когда за интервал времени Δt упадет n метеоров (в частности, $n = 2, 3, \ldots$), m — число таких интервалов за время наблюдений, а n_0 — среднее число метеоров в интервал Δt, выведенное за все время наблюдений $m\,\Delta t$, то

$$N = m \frac{n_0^n}{n!} e^{-n_0}.$$

Она обработала 421 метеор, отмеченный А. П. Саврухиным за 382 минуты наблюдения 11 августа 1950 г. Для всех метеоров вычисленное число метеоров в минуту близко к наблюденному, а для персеид заметно отличается, т. е. распределение персеид действительно не является случайным: критерий согласованности в первом случае был 0,95, а во втором лишь 0,07. Наибольшее расхождение получилось для трех метеоров в минуту, т. е. для пачек. В 1934 г. Хоффлейт применила тот же критерий к метеорам, пролетевшим в интервале $\Delta t = 10$ *сек*. Теоретически их должно быть 3%, наблюдения дают 6%, т. е. у метеоров имеется тенденция к кучности. Телеметеоры для $\Delta t = 1$ *сек* дали 7 пар вместо 0,005 при случайном появлении. Наблюдения обычных метеоров велись в 1934—1935 гг. в Ок-Ридже с применением хронографа и диктофона.

Та же тенденция появляться парами видна даже на спорадическом материале. Мухтарова получила следующее распределение 2411 метеоров ашхабадского ряда за август-декабрь 1942 г.:

$\Delta t =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$n =$	493	433	334	228	169	154	72	83	73	61	45	34	32	35	26

Так как среднее $n_h = 14$, то наиболее часто должны были бы встречаться метеоры на $\Delta t = 4$, тогда как наблюдения дают моду на $\Delta t = 0$.

ГЛАВА 22

ТОРМОЖЕНИЕ МЕТЕОРОВ В АТМОСФЕРЕ

§ 245. Введение. С того времени как Хладни доказал внеатмосферное происхождение метеоров и было найдено, что их скорости являются космическими, стало ясным, какую огромную защитную роль играет земная атмосфера, гася скорости метеоров. Еще И. Ньютон вывел формулу квадратичного закона торможения:

$$Mj = -\Gamma\rho v^2 S, \tag{105}$$

где Γ — коэффициент пропорциональности, а j — торможение. Хотя в баллистике это выражение известно давно, как и огромная роль сопротивления воздуха при больших скоростях, но Скиапарелли только столетие назад использовал данные практики для расчета торможения метеора. Деннинг находил, что скорости известных потоков получаются ниже, если радиант их был у горизонта и метеоры проходили длинный путь в атмосфере. Ниссль из обработки наблюдений болидов в их начальной и конечной стадии полета также нашел большую разницу в скоростях.

Считая, что встречные и догоняющие метеоры теряют одинаковый процент скорости, Вегенер [603] статистически искал торможение болидов (1927 г.), а В. А. Мальцев [423] метеоров (1933 г.). В 1934 г. сводку по этому вопросу напечатал И. С. Астапович [417], предложивший [588, 590] два других метода определения j. В 1938 г. Уиппл [279] показал, как, зная j и M метеора, можно найти плотность воздуха на высоте его полета, пользуясь теорией Хоппе и формулой Ньютона. Еще Элькин фотографически находил [277] величину торможения j, но первые точные данные получили В. В. Федынский и К. П. Станюкович в Москве в 1935 г. [95] по велограмме яркого кассиопеида 14 августа 1932 г. (рис. 180). К 1943 г. Уиппл обработал 36 велограмм [593].

В 1946 г. впервые были получены радиоскорости Драконид, которые оказались по Хею 22,9 против теоретических 23,7 *км/сек*; разница в 0,8 *км/сек* приписывается также торможению. Методом трех станций Мак-Кинли и Миллман в отдельных случаях, начиная с 1948 г., находили торможение радиометеоров. Применяя обтюратор с очень большим числом перерывов в секунду ($n = 72$), чехословацкие астрономы показали, что крайне резкое нарастание j имеет место в самом конце пути метеора, как это давали визуальные наблюдения еще раньше [591], и что предлагавшиеся апроксимационные формулы для $L = f(v, j)$ неудовлетворительны. Но следует

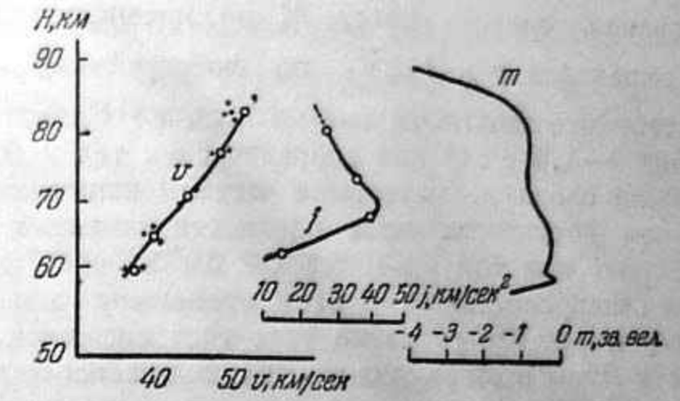


Рис. 180. Изменение скорости v, торможения j и звездной величины m метеора 14 августа 1932 г. (по К. П. Станюковичу и В. В. Федынскому).

отметить, что точное определение торможения метеора все еще продолжает оставаться трудной проблемой.

§ 246. Уравнение торможения. В уравнении (105) примем метеорное тело сферическим и выразим площадь миделя S через массу M и плотность ρ_m метеорного тела:

$$\left.\begin{aligned} M &= \frac{4}{3}\pi r^3\rho_m = 4S\cdot\frac{1}{3}r\rho_m; \\ r &= \sqrt[3]{\frac{3M}{4\rho_m\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}}\sqrt[3]{\frac{M}{\rho_m}}; \\ S &= \frac{3M}{4r\rho_m} = \sqrt[3]{\frac{9\pi}{16}}\frac{M^{\frac{2}{3}}}{\rho_m^{\frac{2}{3}}} = A_0 M^{\frac{2}{3}}\rho_m^{-\frac{2}{3}}. \end{aligned}\right\} \tag{106}$$

Поэтому уравнение торможения в баллистической форме напишется так:

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma A_0\rho_m^{-\frac{2}{3}}M^{-\frac{1}{3}}\rho v^2. \tag{107}$$

Для сферы $\Gamma = 1$, $A_0 = 1{,}21$. Опыты с телами неправильной и оболочной формы на диапазоне астробаллистических скоростей [508] дают $\Gamma = 0{,}42$ и $A_0 = 1{,}70$, откуда эмпирически найденный коэффициент $\Gamma A_0 = 0{,}71$, тогда как для сферы $\Gamma A_0 = 1{,}21$. Таким образом,

можно считать, что произведение ΓA_0 заключено в этих пределах. Отметим благоприятное обстоятельство, что трудно определяемые величины ρ_m и M входят в дробной степени и влияние их неточности уменьшается.

Если теперь взять значения плотности воздуха ρ по данным ракетного зондирования, оценить массу M по интенсивности свечения метеора, то, определив v и $j=\frac{dv}{dt}$ по фотографиям, можно найти плотность метеорного тела. Она оказывается, по Уипплу [587], неожиданно малой — 1,5 $г/см^3$ для спорадических тел и 0,6 $г/см^3$ для поточных. Иными словами, метеорные частицы испытывают бóльшее торможение, чем соответствующее плотности каменных и железных тел. Они обладают при той же массе как бы большей поверхностью сопротивления («парусностью»). В этом отношении они напоминают пылевые комочки, рыхлые губчатые тела типа снежинок. Вспомним, что поверхность Луны и Меркурия также принимается рыхлой и пылевидной. Таким образом, для средней плотности небольших метеорных тел приходится принимать $\rho_m=0{,}6$ $г/см^3$ и даже меньше, до 0,05 $г/см^3$.

Заметим, что произведение $\rho_m^{-\frac{2}{3}} M^{-\frac{1}{3}}$ обратно пропорционально поперечной нагрузке $\frac{M}{S}$, от величины которой зависит быстрота потери скорости. Чтобы уменьшить последнюю, в баллистике $\frac{M}{S}$ увеличивают, делая снаряды продолговатыми при том же миделе S. Для метеорных тел поперечная нагрузка по ашхабадским данным порядка 0,5—2,0 $г/см^2$.

§ 247. Методы определения торможения могут быть *индивидуальными* и *массовыми* (*статистическими*), причем торможение можно определять *относительное* и *абсолютное*.

1. Нахождение относительного линейного торможения по угловому торможению. Взяв выражение (50) $v=r\omega\operatorname{cosec}\psi$ и продифференцировав его по времени, после сокращений получим $j:v=\gamma:\omega$, т. е. относительное линейное торможение равно относительному угловому торможению; последнее же может быть найдено из односторонних наблюдений. Если радиант известен, то изменение скорости от v_1 до v_2 может быть найдено по изменению угловой скорости в этих точках, т. е.

$$\frac{v_2}{v_1}=\frac{\omega_2}{\omega_1}\frac{\sin^2\psi_1}{\sin^2\psi_2}. \qquad (108)$$

По нашим данным только 4,4% обычных метеоров дают заметное на глаз торможение: это красноватые, полого летящие медленные метеоры. Будем, согласно [391], оценивать отношение $k=\frac{\omega_2}{\omega_1}$ конечной угловой скорости к начальной. Обычно $k=1$, случаи $k=0{,}9$ и 0,8 трудно уловимы, а метеоры с $k<0{,}5$ редки, поэтому мода падает на $k=0{,}7$. Пусть λ_1 — длина того участка пути, на протяжении которого торможение еще незаметно, а $\lambda_2=\lambda-\lambda_1$ — длина участка, где средняя скорость есть ω_2. Тогда $\omega_1=\omega+\frac{\lambda_2}{\tau}\left(\frac{1}{k}-1\right)$, где $\omega=\frac{\lambda}{\tau}$. Отложим на чертеже (рис. 181) по осям координат отрезки λ_1, ω_1 и построим на них прямоугольник S_1 и по λ_2, ω_2 также построим прямоугольник S_2. Поскольку скорость убывает монотонно,

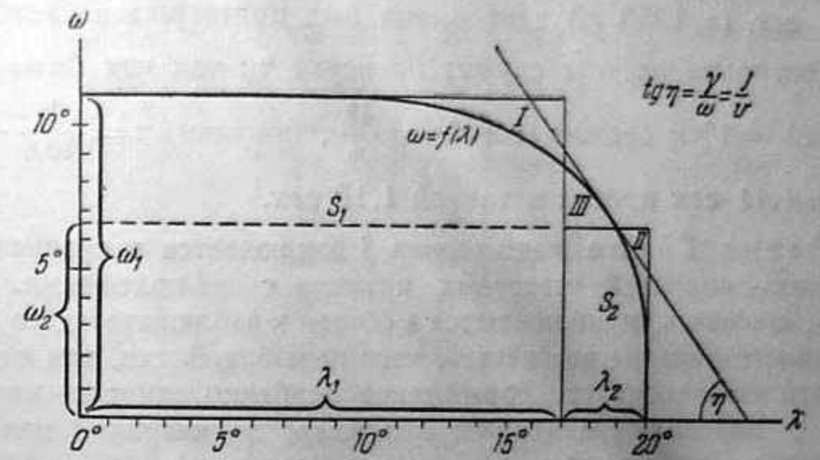


Рис. 181. Нахождение торможения метеора.

то существует кривая $\omega=f(\lambda)$, которая должна от S_1 и S_2 соответственно отсекать участки *I* и *II*, равновеликие участку *III*. Вообще эта задача неопределенная, так как таких кривых можно провести сколько угодно, но на практике неопределенность ограничена и соответствует точности метода. Тогда для любой точки оси λ можно найти мгновенную угловую скорость ω и по тангенсу угла касательной — величину $\gamma:\omega=\operatorname{tg}\eta=j:v$.

По наблюдениям 1942—1945 гг. в Ашхабаде из 17 000 метеоров только для 692 можно было оценить k. В среднем оказалось $\lambda_1=8°{,}5$, $\lambda_2=4°{,}5$, $\lambda=13°{,}0$, $\tau_1=0{,}63$, $\tau_2=0{,}47$, $\tau=1{,}10$ *сек*, $\omega_1=13°{,}6$, $\omega_2=9°{,}6$, $\omega=11°{,}8$ $сек^{-1}$. Произведя построение и проверив планиметром условие $I+II=III$, находим η и γ, которое переводим в линейное торможение j, взяв $H=90$ *км*, $\lambda_2=20°{,}16$, $L=32{,}0$ *км*, что при $\tau=1{,}10$ *сек* дает $v=29{,}1$ *км/сек*, $v_1=33{,}5$, $v_2=23{,}4$ *км/сек*. Тогда получаем ход торможения:

λ	0°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
$\operatorname{tg}\eta$	0,00	0,00	—0,03	—0,12	—0,20	—0,50	—0,97	—1,67	—3,00	$(-\infty)$
ω	13,6	13,6	13,6	13,5	13,4	13,1	12,4	11,1	8,25	0°,00 $сек^{-1}$
γ	0,0	0,0	—0,5	—1,6	—2,7	—6,6	—12,0	—18,6	—25	$(-\infty)$
v	33,5	33,5	33,4	33,3	33,0	32,2	30,6	27,4	20,3	0,00 *км/сек*
L	0,0	12,3	14,7	17,2	19,6	22,1	24,5	27,0	29,5	34,0 *км*
j	0,0	0,0	—1,0	—4,0	—6,6	—16,1	—30	—46	—61	$(-\infty)$ $км/сек^2$

Таким образом, метеоры этой группы в течение первых 0,36 *сек* полета торможения практически не испытывают ($H = 100—90$ *км*); пройдя 11 *км*, за последующие 0,39 *сек* они почти за равные интервалы времени теряют 0,3; 0,45; 0,75; 2,3; 4,9 и 9,6%, а всего 18,3% начальной скорости. Только за 0,1 *сек* затем потеря составит еще 21%, а остаток скорости — 61% — теряется за 0,18 *сек* на конечном участке длиной 7,5 *км* на высоте около 80 *км*. Отсюда видно, что абсолютное значение торможения составляет десятки *км/сек*^{2} и в тысячи раз превосходит ускорение силы тяжести [591]. Через несколько лет (в 1953 г.) этот вывод был подтвержден фотографией [598]. Контролем расчета служит проверка τ_0: так как $\Delta\tau = \frac{\Delta\lambda}{\omega}$, то, приняв $\Delta\lambda = 1°$ и сложив все $\Delta\tau = \frac{1°}{\omega}$, получим $\tau = \frac{1}{13{,}6} + \ldots + \frac{1}{5{,}4} = 1{,}11$ *сек* против истинной 1,10 *сек*.

2. Метод Галле нахождения j заключается в сравнении теоретических скоростей известных потоков с наблюденными. Так как метеоры, снижаясь, приближаются в общем к наблюдателю, то их видимые скорости должны возрастать, чего не наблюдается, так как торможение это компенсирует. Торможение особенно заметно, как указывалось, у пологих траекторий; например, γ-акварид 3 мая 1900 г. по Деннингу вместо $v_g = 68$ *км/сек* имел только $v_g = 44$ *км/сек*, леонид 16 ноября 1931 г. по Кингу путь длиной 177 *км* прошел со средней скоростью 35,4 *км/сек* вместо 72 *км/сек* и т. д. Еще Элькин [431] в 1899 г. обнаружил потерю скорости Δv фотографически; приведем его табличку, заменив теоретические v_g современными значениями; атмосферная скорость v здесь дана средняя.

Дата 1899 г.	Радиант 1875,0 α	δ	Метеор	Высоты *км*	v_g теор. *км/сек*	v набл. *км/сек*	Δv *км/сек*
Июль 31	29°50′	+57°40′	Персеид	88—75	60,9	50,4	—10,9
Август 7	289 44	+27 58	Спорадич.	50—45	27,1	12,2	—14,9
Август 8	45 12	+56 35	Персеид	101—94	60,9	50,3	—10,6
Ноябрь 24	23 52	+39 46	Андромедид	93—90	19,6	20,2	+0,6
Декабрь 12	112 22	+33 02	Геминид	96—90	36,0	36,5	+0,5

Якжиа (1952 г.) считает, что метеор должен потерять $\Delta v \cong -1{,}3$ *км/сек*, чтобы достигнуть яркости, необходимой для фотографирования. Как упоминалось, радиоскорости Драконид оказались заниженными на $\Delta v = -0{,}8$ *км/сек* уже в первую ночь применения метода гиперболического эха 9 октября 1946 г. В целом торможение получается усредненным и составляет

$$-j = \frac{v_g - v}{L} v, \qquad (109)$$

численно доходя до десятка *км/сек*^{2}.

3. Метод Ниссля [601] использует многосторонние наблюдения (болидов) и основывается на том, что начало полета замечается

Таблица 7

Потеря скорости болидов в атмосфере по визуальным данным

№	Дата	Наклон пути z_R	Пределы высот $H_1 - H_2$, *км*	Отрезок пути, *км*	Средняя скорость v, *км/сек*	n	Примечания
1	1876 IV 9	66°	81—32	118	31,8	4	Звуковой, яркостью равен Луне. По Нисслю
			72—32	96	27,4		
			69—32	89	5,2		
2	1879 I 12	62	67—15	200	40	6	Средняя $v = 27{,}4$ *км/сек*. Орбита эллипс. По Нисслю
			44—15	111	44		
			44—15	111	37		
			38—15	78	16		
			26—15	44	15		
			24—15	37	12,6		
3	1889 X 23	61	112—37	155	48,2	5	Яркостью 1/4 Луны. По Нисслю
			64—37	55	25,5		
			53—37	32	17,8		
4	1891 IV 2	63	177—37	263	38,8	28	Болид яркостью 1/2 Луны. По Нисслю
			37—27	—	11,8		
5	1905 I 17	90	488—21	480	12,0	31	Звуковой, гораздо ярче Луны. Падение метеорита Леоновка. По Тихову
			17—21	240	8,0		
6	1905 III 14	70	87—37	145	36,6	8	1/4 Луны. По Нисслю
			63—37	70	21,1		
			54—37	51	14,6		
7	1910 XI 23	77	118—23	378	75,6	13	Звуковой, равен Луне. По Нисслю
			—23	конец	16,0		
8	1916 IX 3	67	147—46	239	55,6	4	По Гофмейстеру
			117—46	169	49,9		
			98—46	123	41,5		
9	1921 VIII 17	78	91—34	218	27,1	~20	То же
			56—34	85	13,7		
			39—34	18	8,8		

Продолжение табл. 7

№	Дата	Наклон пути z_R	Пределы высот $H_1 - H_2$, км	Отрезок пути, км	Средняя скорость v, км/сек	n	Примечания
10	1943 VIII 17	77	90	160	66	12	Над Центральной пустыней Кара-Кумов. Набл. Астапович. Длина пути дана от начала; скорость — мгновенная, торможение от —10 до —34 км/сек²
			84	187	51		
			72	242	40		
			66	269	40		
			57	310	22		
			52	333	0		

неодновременно, но конец виден всеми наблюдателями. Если для каждого наблюдателя написать $v_1 = \frac{L_1}{\tau_1}$, $v_2 = \frac{L_2}{\tau_2}$ и т. п., то при отсутствии торможения и ошибок было бы $v_1 = v_2 = \ldots$ В действительности всегда v меньше к концу полета (см., например, табл. 7).

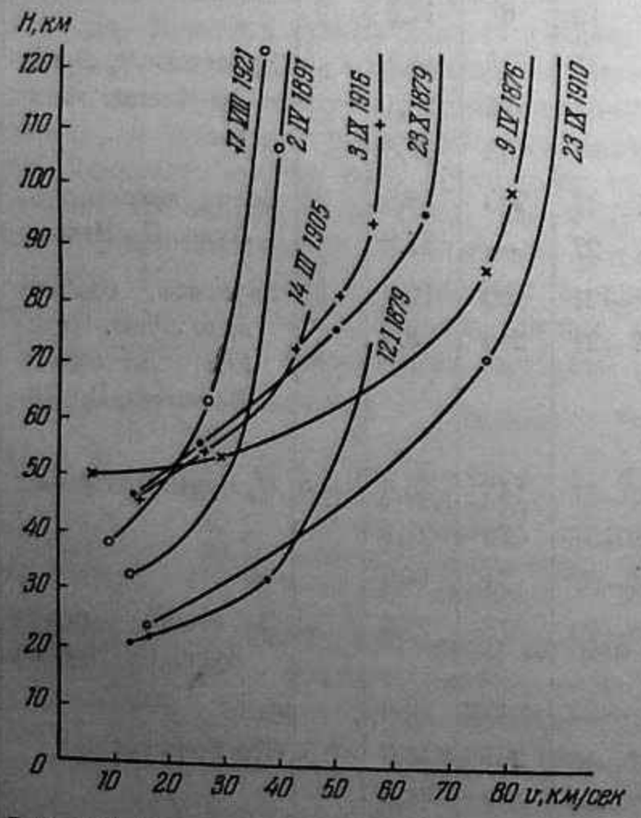


Рис. 182. Потеря скорости болидов в атмосфере по визуальным данным делается заметной с высот $H = 90$—100 км.

У болидов потеря скорости гораздо заметнее, чем у метеоров (рис. 182), а в случае падения метеорита она вообще превосходит 90%. По обработке Галлея болид 19 марта 1719 г. имел $v = 8$ км/сек; для болида 4 декабря 1807 г. $v = 4{,}5$ км/сек (падение метеорита Уэстон, Коннектикут). Яркий метеор в Николаеве 4 августа 1928 г. первую часть пути в 6° прошел за 0,3 сек, после перерыва в 1° последние 3°,1 он прошел за 0,2 сек, что дало на высотах 96, 82 и 71 км торможение 47, 42 и 36 км/сек соответственно. Если ряд наблюдений произведен в одном пункте, то, откладывая ω и λ по осям координат, находим $\omega = f(\lambda)$ и торможение $\gamma : \omega$ для любой точки, используя таким образом этот частный случай.

4. Графический метод, предложенный И. С. Астаповичем [590] в 1930 г., имеет целью получение доатмосферной скорости из многих наблюдений. Возьмем L и τ, как в предыдущем способе, и, отложив их на осях координат, проведем кривую $L = f(t)$, касательная к которой даст значение мгновенной скорости в точке касания, а асимптота — значение доатмосферной скорости $v_0 = \operatorname{tg} \eta_0$ (рис. 183). Построив подобным образом график $v = f(t)$, можно найти торможение. Ныне этим методом обрабатываются некоторые велограммы.

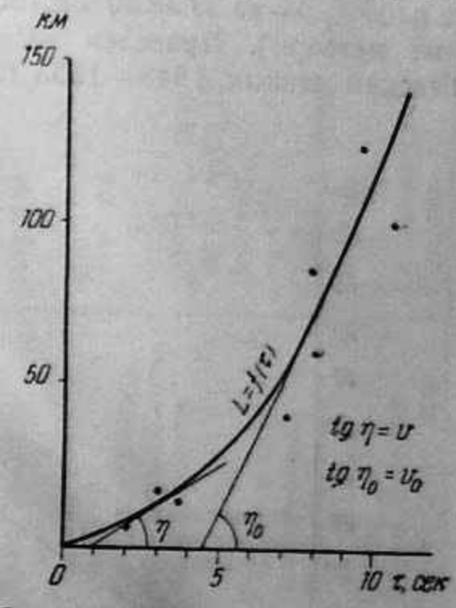


Рис. 183. Метод определения торможения болидов в атмосфере и получения начальной (доатмосферной) геоцентрической скорости v_0.

5. Метод обтюратора (см. гл. 9 и 14) дает возможность получить скорость v на каждом отрезке ΔL пути метеора и отсюда найти $j = \frac{\Delta v}{\Delta \tau} = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2\Delta L}$. Уже первые велограммы Элькина [432] показали наличие торможения. В 1911 г. в Англии Линдеманом и Добсоном была получена первая (и пока последняя) велограмма, до сих пор необработанная. Первая велограмма в СССР [95], полученная 14 августа 1932 г. (рис. 180), показала следующее торможение:

$H =$	84,2	82,5	77,8	76,3	71,9	70,6	66,6	61,7	61,0 км
$v =$	54,3	51,0	50,0	48,1	45,3	44,5	40,2	38,7	36,7 км/сек

В последующие годы в СССР было получено свыше ста велограмм (Л. А. Катасев в Сталинабаде, Н. И. Гришин, А. П. Саврухин и др. в Ашхабаде, К. А. Любарский и В. В. Мартыненко в Симферополе). За рубежом Уиппл в 1950 г. опубликовал 46 велограмм, из которых видно, что, по мере уменьшения высоты v убывает, а j нарастает, например:

Дата	H, км	v, км/сек	j, км/сек²	Дата	H, км	v, км/сек	j, км/сек²
1936 X 21,30	82,4	30,6	2,3	1941 III 23,08	67,2	22,6	2,8
	77,4	29,8	8,4		62,8	21,6	5,0
					58,7	19,8	10,1
1937 XI 5,36	79,0	30,4	1,9	1945 II 6,30	78,1	28,1	1,2
	69,1	28,5	7,1		64,9	26,9	3,7
	63,6	25,4	14,1		57,1	24,6	9,8

Из этих же данных оказывается, что среднее j порядка нескольких *км/сек*² и выше, как и по данным Элькина; на одной и той же высоте более быстрые метеоры испытывают более сильное торможение (рис. 184); в 30% случаев j становится заметным на $H=91$ *км* и в 55% — на $H=80$ *км* (последняя группа — гораздо более крупные метеоры). Приведем несколько значений торможения по ашхабадским данным 1948—1953 гг.; радианты даны кажущиеся, высоты

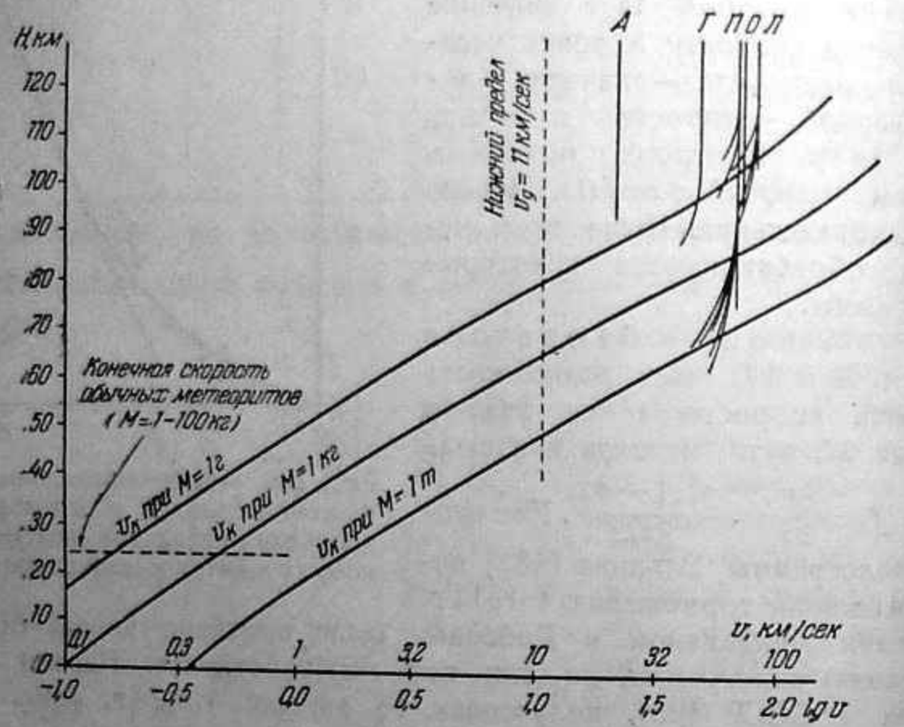


Рис. 184. Торможение метеоров по фотографическим данным 1894—1936 гг. и кривые предельной скорости v_k для разных масс M на данной высоте. Скорости метеоров асимптотически приближаются к кривым v_k (снизу).

А — Андромедиды, *Г* — Геминиды, *П* — Персеиды, *О* — Ориониды, *Л* — Леониды.

расположены в порядке их убывания и относятся к тем же точкам, что и *мгновенные* v и j (табл. 8).

У шести метеоров j указано для двух разных точек, например в максимуме яркости или торможения. Видно общее увеличение j с уменьшением H, особенно резкое при взрывах. Для каждого метеора j индивидуальное, ибо оно зависит от массы, v, H и z. Выше 100 *км* j незаметно, ниже 80 *км* оно может достигать сотни *км/сек*² в конце пути. Упоминавшийся в гл. 14 «быстроходный» обтюратор в Ашхабаде, с 1956 г. кроющий четыре камеры 1 : 2, $f=125$ *мм* с частотой 135 *гц*, дает экспозиции длительностью 2,5 *мсек* каждые 0,0074 *сек*, поэтому число перерывов на снимке метеора

Таблица 8

Торможение метеоров по методу обтюратора (Ашхабад)

№	Дата и момент (мнр. вр.)	H	v	j	Точка пути	Радиант 1950,0	Наклон z_R
1	1950 VIII 11 19 ч. 00 м.	103 *км*	61,3	0,0	Конец	Персеид	56°,1
2	1948 VIII 11 20 24	103	61	1,6	Макс. яркости	»	53,7
3	1953 VIII 11 22 35	101	61,2	10	Начало тормож.	42°05′ + 57°47′	37,8
4	1950 VIII 11 17 44	99	52,5	4,8	» »	43 55 + 57 24	72,2
5	12 22 20	99	60	9	» »	γ-Драконид	55,9
6	11 19 41	99	27,6	16	Макс. в конце	χ-Цигнид	21,6
7	1953 VIII 11 22 45	98	62,5	5,0	Начало тормож.	47°25′ + 58°30′	36,7
8	1950 VIII 15 20 25	97	20,9	11	Середина	286 18 + 44 04	30,1
9	12 18 10	95	46	9	»	6 20 + 75 57	49,9
10	1952 X 20 23 59	95	65	9	Начало тормож.	96 24 + 16 36	22,5
11	1950 VIII 12 19 45	95	63	12	» »	25 12 + 46 49	50,6
12	1953 VIII 7 21 30	95	59,8	16	Макс. яркости	Персеид	49,9
13	1950 VIII 10 20	94	61	6,0	» »	42°03′ + 57°32′	51,3
14	10 20 04	94	26,4	7,8	Начало тормож.	286 34 + 41 49	16,9
15	1953 VIII 12 18 26	93	54,8	21	Макс. яркости	Персеид	69,4
7	11 22 45	93	60	48	» »	»	36,7
16	1953 VIII 13 17 30 ±	91	31	48	Область тормож.	χ-Цигнид	10,4
13	1950 VIII 10 20	88	60	20	Конец	Персеид	51,3
17	1953 VIII 11 20 37	87	53	10	Начало тормож.	»	53,6
18	13 20 40	86	61	14,7	Макс. ярк. и торм.	»	53,6
19	1950 VIII 15 18 11	85	29,5	2,4	Макс. яркости	251°15′ + 59°07′	37,0
20	11 23 08	85	68	20	» »	39 24 + 73 13	39,0
17	1953 VIII 11 20 37	85	61	42	» —	Персеид	53,6
7	1953 VIII 11 22 45	82	57	43	Макс. тормож.	»	36,7
21	1950 VIII 15 20 39	80	52	135	После взрыва	»	36,7
22	1953 VIII 10 19 30 ±	79	45,6	23	Макс. тормож.	296°34′ + 55°49′	29,5
19	1950 VIII 15 18 11	76	56	42	» »	Персеид	60
21	20 39	74	36,1	17	Конец	μ-Драконид	37,0
22	1953 VIII 10 19 30 ±	74	43	48	Взрыв в конце	Спорадический	29,5
			53	100	После макс. ярк.	Персеид	60

достигает 200—300 и торможение находится очень уверенно. Теоретически оно дается выражением

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Gamma h \rho \sec z_R}{\frac{M}{S}}, \qquad (110)$$

где Γ — коэффициент сопротивления, h — высота однородной атмосферы и M/S — поперечная нагрузка.

§ 248. Доатмосферная скорость. Цеплеха [597] в 1954 г. показал, как находить доатмосферную скорость v_0, зная торможение j и силу света I метеора:

$$v_0^2 - v_m^2 = \frac{6v_m^2}{K_m v_m^2 - 6}\left[\sqrt{\frac{2K_m v_m^2 + 3}{K_m v_m^2 + 9}} - 1\right] \approx \frac{3v_m^2}{9 + K_m v_m^2}, \qquad (111)$$

причем v_m означает скорость в точке максимальной яркости, а K_m определяется как

$$K_m = -\frac{I}{v j \int\limits_{t_0}^{t} I dt},$$

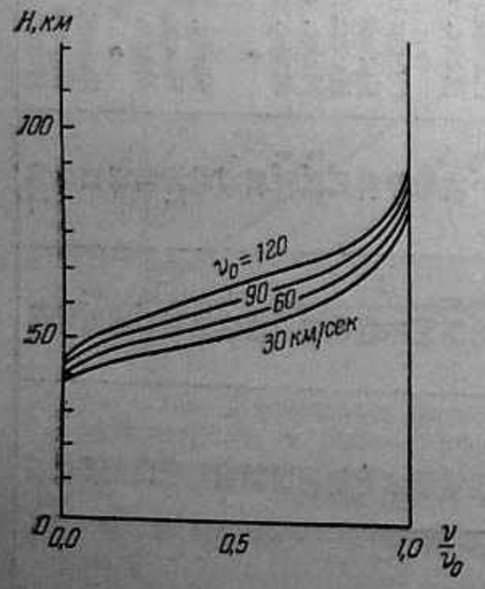


Рис. 185. Уменьшение скорости метеорного тела массой 1 г при различных начальных скоростях (по теории Хоппе, 1937 г.).

где $$I = -\tau_0 \frac{dm}{dt} v^3. \qquad (112)$$

Уиппл предлагал для той же цели следующие три выражения, в которых b есть градиент плотности воздуха:

$$v_0^2 - v^2 = \frac{6}{K_m} \lg\left(1 - \frac{K_m j}{3b \cos z_R}\right); \qquad (113)$$

$$\lg \frac{v_0}{v} = \frac{3}{K_m v^2} \lg\left(1 - \frac{K_m j}{3b \cos z_R}\right); \qquad (114)$$

$$v_0 = v\left(1 - \frac{j}{v^2 b \cos z_R}\right). \qquad (115)$$

Для $K_m = 10^{-12}$ и 10^{-11} при разных v_m имеем такие потери $\Delta v = v_0 - v_m$:

v_m, км/сек . . .	10	20	30	40	50	60	70
При $K_m = 10^{-12}$.	1,6	2,3	2,3	2,1	1,9	1,7	1,5
При $K_m = 10^{-11}$.	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,17

Теоретические расчеты Δv по Хоппе представлены на рис. 185.

§ 249. Статистические методы определения торможения. 1. Метод «розы скоростей». В 1927 г. Вегенер [603] использовал каталог 611 болидов для построения полярной диаграммы зависимости v_g от элонгации ε_A радианта от апекса. Он предположил, что относительная потеря скорости одинакова на всем диапазоне скоростей, составляя долю $\frac{1}{k} = \frac{\Delta v}{v_g}$. Проведя кривую через точки наблюдения, Вегенер нашел значение v_1 при $\varepsilon_A = 0°$ и v_2 при $\varepsilon_A = 180°$. Считая все гелиоцентрические скорости v_h одинаковыми, можно написать, что

$$v_1 = \left(1 - \frac{1}{k}\right)(v_h + v_t), \quad v_2 = \left(1 - \frac{1}{k}\right)(v_h - v_t)$$

и решить эти уравнения относительно $\frac{1}{k}$ и v_h. Оказалось, что $v_h = 58$ км/сек, $\frac{1}{k} = 0{,}26 \pm 0{,}06$, т. е. что болиды теряют 26% своей доатмосферной скорости. Значение v_h, как указывалось выше, сильно преувеличено. В 1931 г. В. А. Мальцев применил метод к гораздо более аккуратным английским наблюдениям метеоров 1—5 вел. и нашел $\frac{1}{k} = 0{,}04$; действительно, на протяжении бо́льшей части пути торможение обычных метеоров незаметно.

2. «Разностный метод» является развитием предыдущего [588]. В нем $\frac{1}{k}$ считается постоянным только для двух близких элонгаций ε_1 и ε_2. Так как $\Delta v = v_g - v$ и $\Delta v = \frac{1}{k} v_g$, то $v_1 = \frac{v}{1 - \frac{1}{k}}$. Из треугольника скоростей v_h, v_t и v_g имеем $v_h^2 = v_g^2 + v_t^2 - 2v_g v_t \cos \varepsilon_A$; заменим v_g через $v \Big/ \left(1 - \frac{1}{k}\right)$; тогда останутся неизвестными v_h и $\frac{1}{k}$. Для близких элонгаций v_h и $\frac{1}{k}$ будем считать теми же, а скорости v_1 и v_2 разными; тогда из двух уравнений исключим v_h и найдем

$$\frac{1}{k} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{v_1}{v_t}\right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_t}\right)^2}{\frac{v_1}{v_t} \cos \varepsilon_1 - \frac{v_2}{v_t} \cos \varepsilon_2}. \qquad (116)$$

Возьмем следующую пару элонгаций и скоростей, найдем новое $\frac{1}{k}$ и т. д. В результате на материале того же каталога получаем [588]:

ε	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
v	70	65	60	52	49	44	40	36	33	31	29	28	27
$\frac{1}{k}$	0,00	0,00	0,01	0,07	0,17	0,19	0,22	0,27	0,32	0,38	0,45	0,48	—
v_g	70	65	61	56	59	55	51	50	49	50	53	53	—
v_h	46	46	48	49	56	58	59	63	65	70	76	78	—

Среднее $\frac{1}{k}=0{,}23$, т. е. близко к значению Вегенера. Хотя v_h завышено, но уже в 1935 г. оказалось возможным правильно заключить, что «среди догоняющих болидов с прямым движением могут реально преобладать объекты с бóльшими гелиоцентрическими скоростями» и что «относительная потеря скорости быстрых метеоров и болидов меньше, чем медленных» [588, стр. 104]. Теперь оба эти положения доказаны инструментально.

3. Статистика высот и скоростей. Быстрые метеоры разрушаются раньше и поэтому имеют меньше шансов проникнуть глубже по сравнению с медленными телами. Кроме того, торможение сильнее в более плотных слоях воздуха. Поэтому средние скорости будут убывать с высотой. Это хорошо видно из данных табл. 6, по которым образуем среднюю скорость v (в *км/сек*):

№ болида	Высота H (*км*)						
	100	90	80	70	60	50	40
9	13	13	13	11	9	7½	6
2 и 8	27	26	25	24	19	14	9
3, 4, 5	57	57	57	48	30	18	9
1	70	70	70	50	23	15	8

Отсюда видно, что у ярких болидов уже на $H=40$ *км* разные геоцентрические скорости выравниваются торможением, хотя бы вначале они и разнились в несколько раз. Для обычных метеоров это происходит выше, для метеоритов — в силу их бóльшей массы — ниже. В 1907 г. Ниссль получил для болидов (включая звуковые) и ярких метеоров (две группы I и II) такие средние данные:

Болиды			Яркие метеоры (I)			Яркие метеоры (II)		
H_2	v	n	H_2	v	n	H_2	v	n
86,4	51,8	12	106,6	67,7	23	112,2	72,3	10
54,2	55,0	19	88,8	51,5	48	88,3	43,0	11
39,0	40,6	43	73,0	35,5	33	74,2	40,5	13
24,0	37,6	28	46,2	30,1	17	59,2	35,4	6
			28,8	23,2	2	33,9	27,4	13

Таким образом, статистика высот дает качественную характеристику как торможения, так и фильтрующего действия атмосферы, задерживающей на большей высоте более быстрые метеоры.

4. Метод «точки задержки». Из квадратичного закона сопротивления можно получить выражение $j=-Kv^2$. Пусть метеорное тело уменьшило скорость v_0 до значения v_1, тогда $K=\frac{\frac{1}{v_1}-\frac{1}{v_0}}{\tau}$,

откуда можно найти j. Выберем v_1 таким, при котором прекращается свечение метеора. Например, если $v_0=30$ *км/сек*, $v_1=2$ *км/сек*, $\tau_2=10$ *сек* (болид), то $K=0{,}047$ *км*$^{-1}$ и $j=-0{,}047\cdot v^2$, так что при $v=15$ *км/сек* сопротивление воздуха превысит силу тяжести в 10 600 раз. Неудивительно поэтому дробление метеоритов в полете. Расчет этот, конечно, чисто качественный, так как масса предположена неизменяющейся. «Точка задержки» для обычных метеоров будет совпадать с высотой $H_2\approx 80$—70 *км*; для болидов она порядка 50—40 *км*, для метеоритов около 20—25 *км*. У гигантских метеоритов $H<0$, т. е. лежит ниже земной поверхности, вследствие чего они достигают почвы с космической скоростью. Это приводит к кратерообразованию при ударе. Визуально торможение заметно лишь у медленных метеоров, контролем чего служит их цвет: из 188 метеоров с заметным торможением, отмеченных в Ашхабаде в 1943 и 1945 гг., голубых не оказалось ни одного, белых — 19%, желтых — 36, оранжевых — 25 и красных — 27%, прочих — 6% [592]. Длительность полета этих метеоров вдвое больше обычных (1,0 сек.).

§ 250. Радиометоды определения торможения метеоров. Эти методы удалось впервые применить для определения торможения в 1949 г. Мак-Кинли и Миллману [599]. Потребовалось обеспечить точность маркировки времени до 0,0001 *сек* на основной и двух базисных станциях в Оттаве, увеличить скорость движения пленки до 100 *мм/мин* для получения точности в определении скорости до 1—2%. Все же даже при работе станции в течение 72 часов в месяц оказывалось очень мало метеоров с точным значением v, и даже среди них торможение замечалось менее чем у 10% метеоров. Измеренные скорости откладывались на график в функции времени и графически определялось торможение j.

Приведем несколько примеров. Спорадический метеор 20 сентября 1949 г. прошел путь в 190 *км* за 10,0 *сек* в пределах $H=100$—30 *км*, уменьшив скорость с $v_0=21{,}5$ до 17,0 *км/сек* (по гиперболическому эхо). Измерения доплеровых колебаний на протяжении 0,60 *сек* дали атмосферную скорость $v=20{,}1\pm 0{,}4$ *км/сек*, а среднее торможение оказалось $j=-0{,}48\pm 0{,}05$ *км/сек*^{2}. Другой метеор — лирид 21 апреля 1949 г., при радианте на 3° под горизонтом, прошел на большой высоте путь $L=200$ *км* с «доплеровой» скоростью $v=45{,}8\pm 0{,}3$ *км/сек* при $v_0=49{,}0$, упавшей до 43,4 *км/сек*, что дало $j=-1{,}1\pm 0{,}4$ *км/сек*^{2}. Персеид 20 августа 1949 г. имел $H_1=121$, $H_2=91$, $L=90$ *км*, $v=58{,}3$, $v_0=61{,}0$, снизившееся до 58,5 *км/сек*, откуда $j=-1{,}5\pm 0{,}3$ *км/сек*^{2}; наклон траектории был $z_R=72°$, отражение от следа длилось 85 секунд. О торможении Драконид 9 октября 1946 г. по радионаблюдениям в Англии упомянуто выше.

Из сказанного видна защитная роль атмосферы в отношении «метеорной бомбардировки». Поверхности Меркурия и Луны, не имеющих плотных атмосфер, должны непрерывно подвергаться действию подобных ударов, в тысячи раз превышающих по интенсивности действие обычных пуль такой же массы. С другой стороны, именно благодаря торможению в воздухе до поверхности Земли могут дойти более или менее крупные неразрушенные остатки метеорных тел — метеориты. Сопротивление воздуха ныне широко использует техника, например, в авиации и, вероятно, будет использовано в будущем для торможения космических ракет.

ГЛАВА 23

ДВИЖЕНИЕ В СОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ

§ 251. Постановка задачи. В общем виде задача о движении метеорного тела в атмосфере может быть задана так: «Определить траекторию центра массы метеорного тела при заданном строении атмосферы (температура, плотность и средний молекулярный состав в функции высоты) при заданных начальных условиях (начальная скорость, угол наклона) для данного метеорного тела (масса, плотность, форма, состав)». Подобные задачи на диапазоне «земных» скоростей и более узко рассматривает внешняя баллистика. Аналитическим путем общее решение нашей задачи не может быть получено, пока неизвестны законы изменения ряда величин, связанных с положением и формой тела, и из-за возникновения физических явлений, не рассматриваемых динамикой (сжатие, нагрев, диссоциация и ионизация воздуха, плавление, дробление, испарение и распыление метеорного тела, переход энергии движения в излучение, звук и электромагнитные волны).

Чтобы приблизиться к практическому решению, приходится ограничивать задачу, рассматривая некоторые явления как второстепенные и определяя из опыта численные значения неизвестных функций. Применение численных методов расчета обычно дает практически удовлетворительные значения. Одной из ограниченных механических задач может явиться такая: «Найти уравнение траектории метеорного тела в атмосфере и скорость его движения при заданном законе изменения плотности $\rho(H)$ воздуха, начальной скорости v_0 сферического тела массы M, плотности тела ρ_m, угле наклона траектории z_R». Иногда требуется решить так называемую «обратную задачу внешней баллистики», т. е. найти величину сопротивления воздуха по наблюдаемому изменению скорости. На практике обычно приходится иметь дело именно с обратной задачей: зная из наблюдений траекторию движения, скорость и торможение, требуется найти функцию распределения плотности воздуха по высоте; если последняя известна из других данных, например ракетных, то можно поставить задачу найти плотность метеорного тела. Одна из специальных задач — движение реактивного снаряда, масса которого убывает, математически тождественна задаче о движении метеорного тела. Однако полное решение задачи

методами одной механики достигнуто быть не может: при вторжении метеорного тела в атмосферу происходит взаимодействие атомов и молекул воздуха и метеорного тела, которое должно рассматриваться квантовой механикой (теория столкновений); бомбардировка поверхности метеорного тела встречными частицами воздуха определяется законами кинетической теории газов, разрушение кристаллической решетки твердого метеорного тела — законами физической химии и химической кинетики; возникающие здесь физические явления касаются аэрофизики. Пока не взаимодействуют между собой частицы воздуха, справедливы выводы аэродинамики; как только такое взаимодействие началось, что происходит при дальнейшем движении метеорного тела, требуется учет сжимаемости воздуха на основе законов газовой динамики. Увеличение плотности вызывает явления внутреннего трения в газе, изучаемые сверхзвуковой аэродинамикой. Начинаются процессы теплопереноса, аэродинамического нагрева и излучения, диссоциации и ионизации, которые должны рассматриваться физической теорией метеоров. От воздушного уплотнения, возникшего перед метеорным телом, расходятся волны (рис. 186), рассматриваемые особой теорией *ударных* и *баллистических* волн. По мере ослабления эти волны переходят в звуковые колебания, изучаемые акустикой. Если метеорное тело испарилось, то метеорный газ должен подчиняться кинетической теории газов; в случае более крупных тел происходит также распыление, тогда пылинки будут двигаться, падая в воздухе по формуле Стокса. Если часть метеорного тела сохранилась, то после прекращения разрушения оно движется по законам внешней баллистики. Ввиду сложности явления единого рассмотрения его пока не имеется.

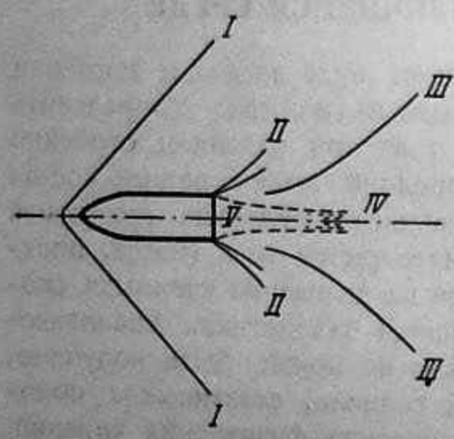


Рис. 186. Схема обтекания пуль при $v > a$.

I—I — головная ударная волна, сумма волн Маха, *II—II* — волны Маха, *III—III* — хвостовая ударная волна, *IV* — вихревой след (спутная струя), *V* — область пониженного давления.

§ 252. Развитие исследований сопротивления воздуха. Изучая движение в воздухе сферических тел, И. Ньютон [615] дал первую формулу сопротивления воздуха для случая невзаимодействующих частиц воздуха («пылевая атмосфера»). В современных обозначениях она имеет вид

$$F_1 = kS\rho v^2 \cos\alpha,$$

где k — коэффициент пропорциональности, S — площадь наибольшего сечения, перпендикулярного к потоку («мидель»), ρ — плотность воздуха, а α — угол потока с нормалью к поверхности. Формула выведена на основании закона сохранения количества движения до и после удара (выведенного Валлисом в 1668 г.). Таким образом, выходило, что *лобовое сопротивление* F_1 не зависит от формы тела. Лишь столетием позже, в 1785 г., Дюбюа указал на появление второй силы F_2 *«донного давления»* за счет разрежения воздуха позади тела. Л. Эйлер и Д. Бернулли вывели закон сохранения энергии для частиц газа, обтекающего тело.

Парадокс Эйлера — Даламбера, заключающийся в том, что при полном обтекании симметричного тела оно не будет испытывать давления, на рубеже XIX в. был разрешен открытием третьей силы F_3 — силы трения (вязкости), из-за чего в газе возникает срыв струй, на завихрение которых тратится энергия; потенциальность течения при этом нарушается (рис. 187). Чтобы уменьшить это *вихревое сопротивление*, как известно, телу придают «обтекаемую» форму, стремясь осуществить условия парадокса Эйлера. При том же S для каплевидного тела F уменьшается в 5—10 раз, а при обтекаемой форме — до 20—30 раз. Насколько велика при небольших v сила «подсасывания» F_2, видно из того, что 75% подъемной силы самолета идет за ее счет. В конце XIX в. были определены коэффициенты сопротивления c_x, зависящие от фигуры тела (коэффициенты формы). По Н. В. Маиевскому и Н. А. Забудскому, принимая для тонкого кружка $c_x = 1$, для шара получим $c_x = 0{,}42$, для конуса раствором $2\beta = 51°$, летящего вершиной вперед — 0,44; при $2\beta = 60°$ и $90°$ $c_x = 0{,}55$ и 0,70.

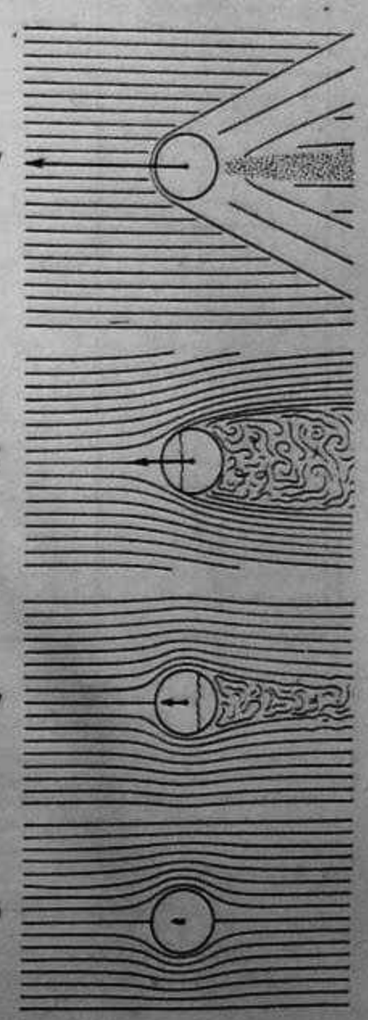


Рис. 187. Волновое поле шарообразного метеорита при движении в воздухе с убывающей скоростью v:

1) $v > a$; 2) $v < a$, срыв струй на передней половине; 3) то же, срыв струй на задней половине; 4) ламинарное обтекание при очень малой скорости.

С увеличением точности измерений выяснилось, что упомянутых трех сил недостаточно; вместе с тем в эмпирических формулах при скорости v стал появляться член, численно равный $\frac{1}{a}$, где $a \approx 330$ *м/сек* — скорость звука. Маиевский первым указал на важность учета скорости звука и отношения $\frac{v}{a}$, обозначаемого через Ма. Л. Мах и Э. Мах [628] обнаружили в 1875 г. волны сгущения,

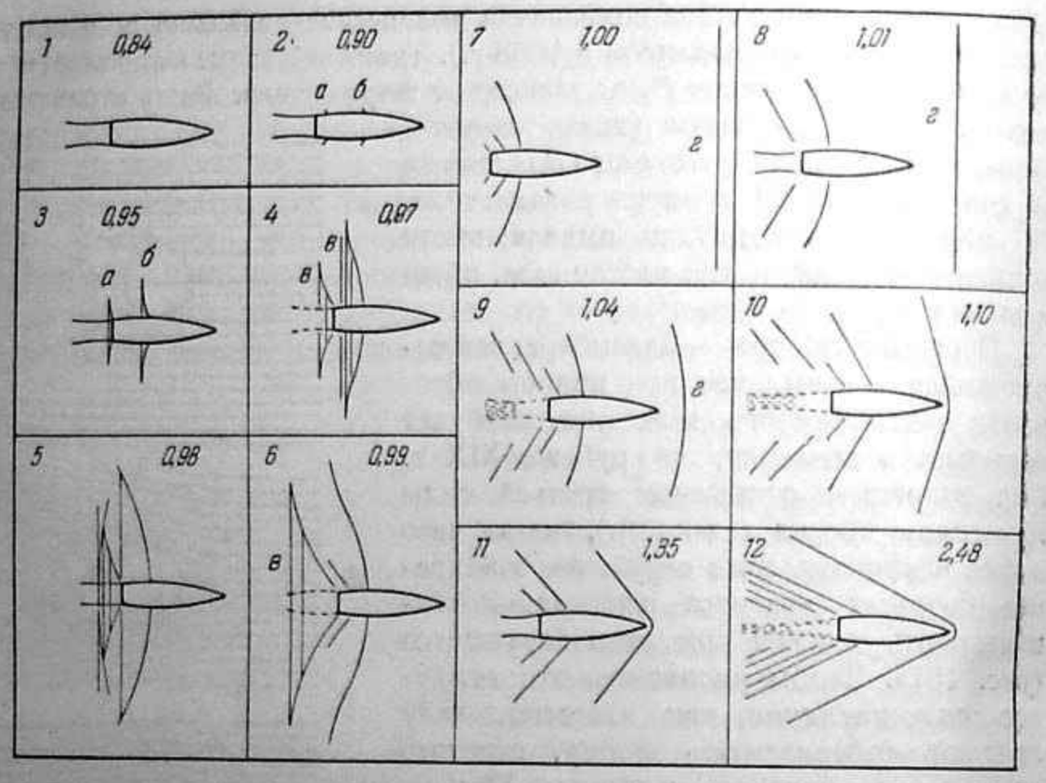


Рис. 188. Воздушные волны при переходе скорости полета v через скорость звука a (числа обозначают число Маха $\mathrm{Ma} = v/a$):

1 — спутная струя, *2* — появление местных скачков уплотнения *а*, *б*, превращающихся затем в баллистические волны, *4* — появление волн *в*, соответствующих «кормовым» в гидродинамике, *7* — появление звуковой волны *г*, впоследствии образующей головную волну, *10* — волна *г* «садится» на носик тела и движется вместе с ним (по Т. Карману, 1947 г.).

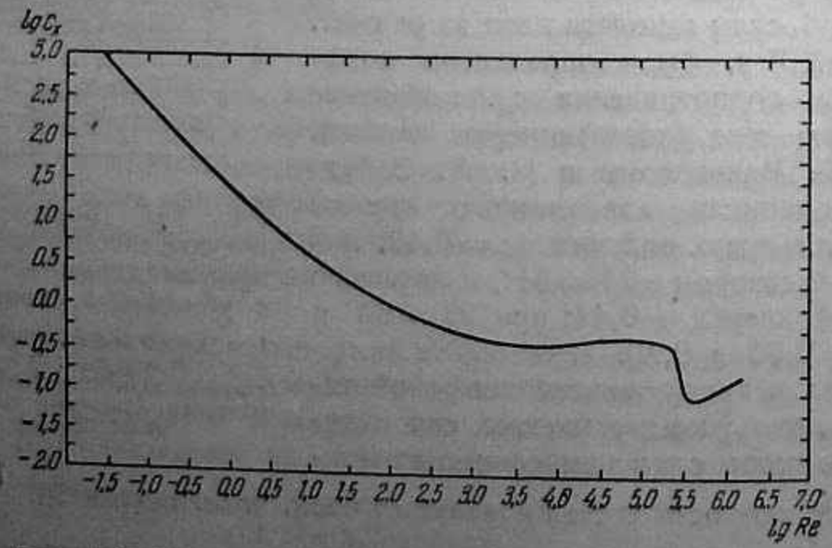


Рис. 189. Изменение коэффициента формы c_x для шара при разных значениях числа Рейнольдса (по С. Гольдштейну). Охватывает диапазон от пылинок до крупных метеоритов.

возникающие в воздухе при движении со скоростью $v > a$ (рис. 188). Так как на их образование тоже требовалась энергия, то появилось представление о *волновом сопротивлении*—четвертой силе F_4. Вопрос о законе сопротивления при больших v рассматривался Кирхгофом, Рэлеем, Маллоком. В общем получался квадратичный закон сопротивления. Анализ размерностей помог найти, при каких условиях геометрически подобные тела в потоках равной плотности дадут геометрически подобное распределение течений. Этим учитывалось влияние вязкости. Оказалось, что для этого необходимо постоянство безразмерного выражения $\frac{vl}{\nu}$, получившего название числа Рейнольдса Re (рис. 189). Например, для воздуха в нормальных условиях $vl = \frac{\mathrm{Re}}{70}$, где l — длина тела (в *мм*), ν — кинематическая вязкость, v — скорость (в *м/сек*). Поэтому c_x зависит и от формы тела, и от числа Re, и закон Ньютона запишется так: $F = \frac{1}{2} c_x S \rho v^2$, причем величина $q = \frac{1}{2}\rho v^2$ называется *скоростным напором* (рис. 190). Численно при $S = 1\ м^2$ примерно $F \approx \frac{1}{8} v^2\ кг$ для воздуха у земной поверхности.

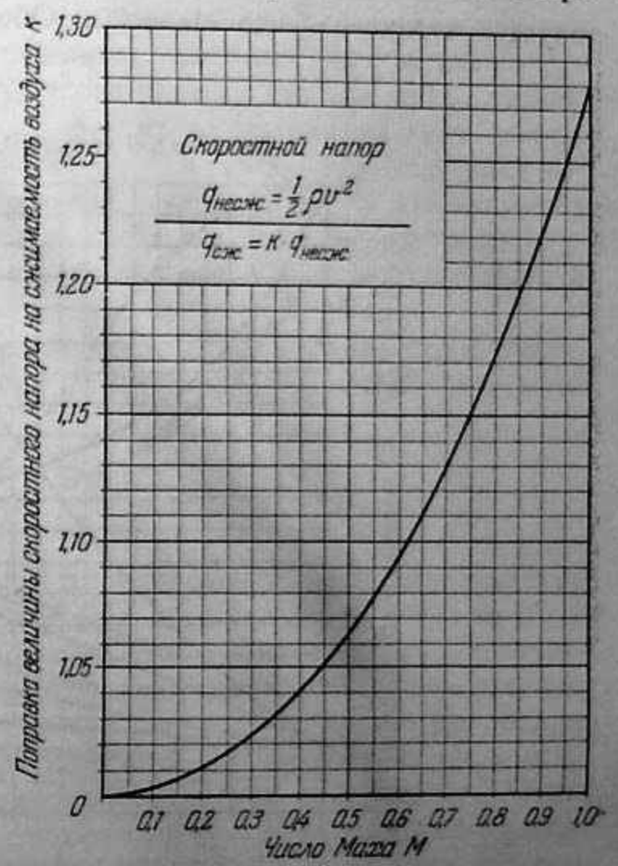


Рис. 190. Поправка величины скоростного напора на сжимаемость воздуха.

При больших скоростях движения гребень сжатия воздушной волны, как более теплый, обгоняет впадину разрежения, поэтому при прохождении такой волны температура T, плотность ρ и давление p меняются скачком (рис. 191). Это явление называется *ударной волной*. В 1887 г. Гюгонио [627] получил формулы изменения p и ρ для идеально сжимаемого газа при прохождении фронта ударной волны (ранее то же нашли Ренкин и Риман). Баллистические волны Маха, возникающие при полете снаряда или метеорита, относятся к «слабым» ударным волнам. В этом случае они возникают при $v = a$, отчего сопротивление резко возрастает (*«звуковой барьер»*). Уравнения сжимаемой жидкости оказываются здесь настолько сложными,

что их интегралы удается находить лишь для частных случаев. Поэтому большую роль играет эксперимент. Под руководством Н. Е. Жуковского еще в 1904 г. в Кучине под Москвой был создан первый аэродинамический институт. Ныне моторами мощностью до 100 000 лошадиных сил, используя гелий или низкие температуры, удается получать потоки с $\frac{v}{a}$ до Ма $= 20$. Обобщение данных звукометрии

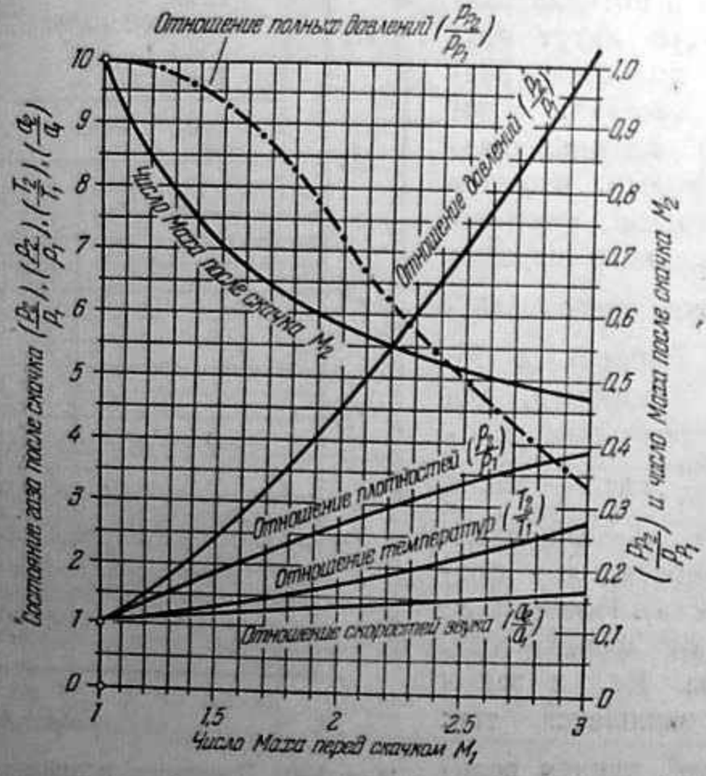


Рис. 191. Изменение состояния воздуха при переходе через ударную волну.

по засечке положения орудий по звуку, произведенное Эсклангоном, показало, что громовой удар с раскатами при полете болидов вызван прохождением фронта баллистической волны. В связи с развитием в последнее время реактивной техники, направленных взрывов и освоением сверхзвуковых скоростей, приближающихся к *астробалистическим*, возникла проблема преодоления *теплового барьера*. Подобно тому, как число Ма учитывает влияние сжимаемости газа, а число Рейнольдса Re — соотношение сил инерции и трения, приходится вводить число Прандтля Pr для учета соотношения между вязкостью и теплопроводностью и число Pe, определяющее связь между теплопередачей (конвекцией) и теплопроводностью. Наконец, техника направленного взрыва позволила в последние годы получать искус-

ственные метеоры, возникающие при движении пуль со скоростью до 6—9 *км/сек*, и исследовать сопротивление воздуха, температуру, спектр и силу света при их полете.

§ 253. Движение метеорного тела в атмосфере, как и всякого твердого тела, определяется шестью дифференциальными уравнениями. Три из них описывают поступательное движение центра массы, три других — вращение тела вокруг этого центра. Так как силы, определяющие движение центра массы, зависят от положения тела относительно касательной к его траектории, а силы, определяющие это положение, сами зависят от движения центра массы, то эти уравнения являются совокупными. Из-за того, что эти силы аналитически изучены недостаточно, совместное интегрирование всех шести уравнений невозможно.

Упростим задачу, отбросив вращение, как явление второстепенное, примем плоскость движения за плоскость координат Oxy, тогда останутся два уравнения:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -j\sin i, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = +j\cos i - g. \tag{117}$$

Это — движение по инерции в поле тяготения Земли, принимаемом за однородное (на высоте $H = 150$ *км* g_{150} меньше g_0 всего на 5%). Здесь ось Ox горизонтальна в плоскости движения, ось Oy направлена в зенит, j есть ускорение силы сопротивления F воздуха, так что $F = Mj$. Сила F при космических скоростях в тысячи раз больше силы тяжести Mg, поэтому для обычных метеоров можно не учитывать g и тогда получим инерциальное движение по прямой. Примем эту прямую за ось Ox. Пусть сопротивление F пропорционально второй степени скорости, т. е. $Mj = -Kv^2$, тогда длина пути метеора $L = \frac{M}{K}\ln\frac{v_0}{v_k}$ и продолжительность $\tau = \frac{M}{K}\left(\frac{1}{v_k} - \frac{1}{v_0}\right)$. Когда v_k уменьшится до $v \sim 1{,}5$ *км/сек*, видимое свечение прекращается. Если метеорное тело не распылилось и не испарилось, то оно продолжает двигаться по инерции с убывающей скоростью, но так как последняя мала, то пренебрегать силой тяжести уже нельзя. Когда сила сопротивления воздуха уравняется с силой тяжести, движение будет происходить с постоянной скоростью v_k, т. е.

$$F = Mg = -\frac{1}{2}c_x\rho S v_k^2. \tag{118}$$

Горизонтальная проекция траектории L' оказывается конечной и равной $L' = \frac{v^2}{g}\left(\frac{\pi}{2} - i\right)$, поэтому метеорное тело будет стремиться падать вертикально (здесь v есть некоторая средняя скорость). Поскольку $M = 4S\frac{r}{3}\rho_m$, а радиус $r = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\rho_m}}$, то

скорость равномерного падения будет

$$v_k = \sqrt{\frac{2Mg}{c_x \rho S}} = \sqrt{\frac{2g}{c_x \rho}} \sqrt[6]{\frac{16}{9}\frac{\rho_m^2}{\pi}} \sqrt{M}. \qquad (119)$$

Таким образом, v_k определяется плотностью ρ_m и массой M метеорного тела; поскольку плотность воздуха ρ увеличивается по мере приближения к Земле, то фактически v_k для данного тела на каждой высоте в атмосфере свое, и падение происходит при непрерывном замедлении v_k; например, на $H = 25$ *км* v_k примерно в шесть раз больше, чем у земной поверхности. При бросании тел с самолета фактически на шестой секунде скорость устанавливается на предельном значении v_k. Для шара практически (с учетом обтекания) при малых скоростях $c_x = 0{,}25$ и при средней плотности метеоритов $\rho_m = 3{,}8$ для разных масс и H получим предельные v_k:

H (км)	0	11	32	62	84	94	100	300
M(г)	v_k, м/сек				v_k, км/сек			
10^6	360	640	3 300	28 000	90	200	340	12 000
10^3	110	200	1 120	8 500	28	61	105	3 660
1	36	64	333	2 800	9	20	34	1 200
10^{-3}	11	20	112	850	3	6	10	366
10^{-6}	4	6	33	280	1	2	3	120

Из этой таблички видно, что метеориты массой даже в тонну достигнут почвы со скоростью лишь сотен метров в секунду, тела с $M = 1-3$ *кг* имеют на высоте $H = 32$ *км* скорость $v_k = 1 - 1{,}5$ *км/сек*, при которой прекращается их свечение; действительно, это высоты H_2 метеоритов, упавших на Землю. Для $M = 10^{-3}$ *г* подобная скорость достигается уже на высоте 84 *км*, где действительно угасают обычные метеоры; крупные тела здесь движутся без заметного торможения: «поперечная нагрузка» $\frac{M}{S}$ для них велика, а торможение ей обратно пропорционально. Так, для двух снарядов калибром 76 и 152 *мм* $\frac{M}{S} = 143$ и 225 *г/см*^{2}, вследствие чего (при начальной скорости $v_0 = 600$ *м/сек* и $i = 15°$) дальность их полета вместо 18 *км* в пустоте соответственно составляет 6,4 и 7,7 *км*. Траектория получается искаженной параболой. Попов (София) дал конструкцию прибора для построения метеорных траекторий, геометрические свойства которых с точки зрения баллистики он рассмотрел в ряде работ 1921—1932 гг. Можно также рассматривать уравнения движения метеорного тела в форме Эйлера, введя центробежную силу $F_n = M\frac{v^2}{r}$ и тангенциальную силу $Mj = F_t - \frac{1}{2}\rho S v^2$, где F_n и F_t — проекции силы притяжения Земли, r — радиус кривизны траектории, при квадратичном законе сопротивления. В. Г. Фесенков в 1922 г. численно интегрировал эти уравнения для метеора неизменной массы [428]. Он нашел, что при $i_0 = 0°$ метеор пройдет $L = 669$ *км* до $H = 90$ *км* за 19,5 *сек*, отклонившись в конце на угол $\Delta = 18'33''$ при потере 80% скорости. Проникнув до 70 *км*, он сохранит 10% скорости. При этом увеличение кривизны пути от притяжения Земли $\Delta z = 35'07''$, а полная кривизна $\Delta = 1°07'20''$. Тот же автор указал, что мелкие пылинки вообще могут захватываться атмосферой планеты. Уиппл нашел это же для микрометеоритов. Далее, мы знаем, что i велико у низких телеметеоров.

В целях практического удобства будем различать движение метеорного тела на нескольких участках траектории — высшем, верхнем, среднем, нижнем и низшем.

§ 254. Движение на высшем участке имеет место от момента вторжения метеорного тела в атмосферу до того момента, когда делаются применимыми законы кинетической теории газов. На этом участке на высоте нескольких сотен километров метеорное тело соударяется с отдельными атомами воздуха с обменом энергией по правилам квантовой механики. Здесь велика вероятность возбуждения и диссоциации, так как энергия удара порядка 100—200 *эв*. Коэффициент сопротивления c_x здесь имеет другой смысл и зависит от так называемой температуры Дебая. Однако общая энергия столкновений из-за их малого числа еще невелика и метеора мы не видим. Упоминавшиеся голубые следы метеоров отмечены на высоте 160 — 120 *км*.

§ 255. Движение на верхнем участке происходит до момента, когда пренебрегать взаимодействием частиц воздуха уже нельзя. Здесь аэродинамика еще неприменима. Опыт показывает вообще наличие трех типов отражений молекул от поверхности: зеркальное, диффузное и конденсационное. Первое имеет место для очень гладких поверхностей и в данном случае вряд ли применимо; во втором случае движение после удара о шероховатую поверхность не зависит от начальных условий, но в целом подчиняется закону косинуса, как рассеяние света. Если же ударившаяся молекула не сразу отлетает обратно, то говорят о конденсации с реэмиссией за время Δt от 10^{-11} до сотен секунд. При малом Δt имеем диффузное отражение, при большом — полную конденсацию. При этом температурного равновесия может не быть. Для пластинки и сферы при $Ma = 4$ коэффициент формы c_x такой же, как и предельный при $Ma = \infty$; при зеркальном отражении $c_x = 6$, при диффузном $c_x = 3{,}5$. Для конуса с углом в вершине 60° и 120° соответственно имеем $c_x = 2$ и 1; 3,2 и 2,7. Таким образом, на верхнем участке практически $c_x = 1{,}0 - 3{,}5$.

Влияние температуры может стать заметным, так как вероятно будет изменяться форма тела. Швейкерт в 1949 г. рассмотрел влияние тепловых скоростей молекул воздуха. Оно оказывается заметным только при $v < 1$ *км/сек*, причем сопротивление растет медленнее v^2 и здесь роли не играет. При больших v закон сопротивления — ньютоновский, так как силы подсасывания F_2 и трения F_3 слишком малы сравнительно с силой F_1 лобового сопротивления, а сила F_4 волнового сопротивления еще не появляется. В 1948 г. Хейнеман, исходя из кинетической теории газов, получил общую формулу сопротивления выпуклых тел в области «свободного молекулярного течения». Для шара при Ma = 1, 2, 3 и 4 при диффузном отражении $c_x = 3{,}0$; 2,5; 2,3 и 2,0. На верхнем участке происходит движение основной массы быстрых неярких метеоров ($H = 120 - 80$ *км*).

§ 256. Движение на среднем участке начинается с момента, когда длина свободного пробега молекул делается сравнимой с размерами метеорного тела и заканчивается прекращением свечения.

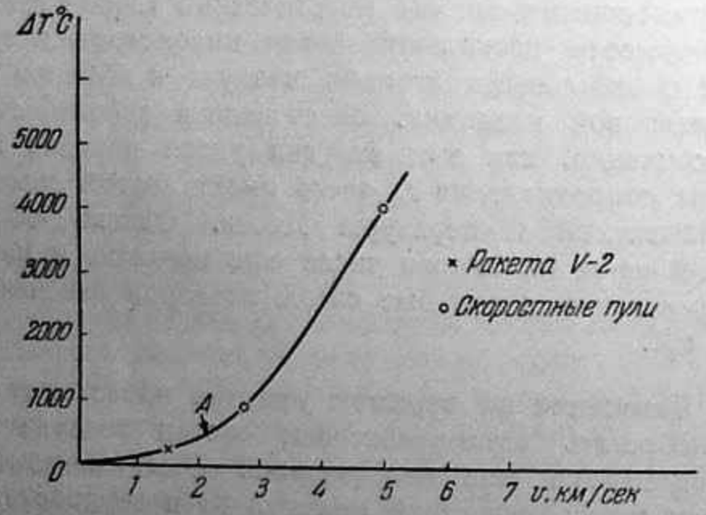


Рис. 192. Повышение температуры ΔT в зависимости от скорости движения в воздухе (по экспериментальным данным). A — граница свечения.

Отброшенные соударением молекулы не успевают расступиться и перед телом возникает уплотнение — воздушная подушка. Встречные молекулы уже не могут ударяться о поверхность тела, а вязнут в этой подушке. Можно рассматривать движение без трения в несжимаемой среде и в такой же среде с трением (т. е. вязкой), а также в упругой среде и в упруго сжимаемой среде. В трех последних случаях привлекается термодинамика, в двух последних — газодинамика. Энергия движения встречных частиц переходит в тепло и появляется *аэродинамическое нагревание*, заметное даже при малых числах Ma, так как температура T растет со скоростью (рис. 192). Основных уравнений газовой динамики для случая, когда

можно пренебречь вязкостью и теплопроводностью, шесть: три уравнения движения Эйлера и уравнения неразрывности среды, притока энергии и состояния. Они определяют проекции скорости v_x, v_y, v_z и затем p, ρ и T. Когда образуется воздушная подушка, то она создает впереди тела скачок плотности; возникает волновое сопротивление, первые четыре уравнения делаются непригодными, и их надо заменить уравнениями законов сохранения масс, количества движения и энергии, которые определят p_1, ρ_1 и скорость v_1 частиц воздуха в подушке после прохождения скачка.

Если возмущение было очень велико (крупное тело), то появляется скачок разрыва ударной волны, скорость которой больше звуковой, и лишь на расстоянии в сотни метров переходит в звуковую. Из-за повышения температуры сжатие не может на фронте скачка превзойти атмосферное давление более чем в $1 + \frac{2}{\gamma - 1} \approx 6$ раз, даже при $v \to \infty$. Скорость v_1 молекул в подушке остается всегда меньше скорости полета v, и даже скорости звука a. Радиус волны при взрыве, когда возникает подобная же ударная волна, растет как $t^{\frac{2}{5}}$, где t — протекшее время (Л. И. Седов).

Взрывные явления и разлет газов изучены К. П. Станюковичем (Москва) [824] и важны при рассмотрении метеорных явлений: воздушная подушка перед метеорным телом ведет себя как взрывающийся газ (В. П. Ветчинкин, 1940 г.). Потеря энергии E метеорного тела при упругом ударе была $\rho S v^3 = -\frac{dE}{dt}$, здесь же молекулы «налипают» на его переднюю сторону и движутся вместе с ним, поэтому ежесекундный расход равен $\frac{1}{2}\rho S v^3$; соответственно $c_x = 4$ и 2. Если же частицы, потеряв при ударе скорость, остаются позади тела, то $c_x < 2$. Первоначально тонкая молекулярная пленка утолщается и образует так называемый *пограничный слой*: в нем скорости молекул изменяются от нуля у поверхности тела до v на его границе. Так как молекулы переходят в этом слое (в силу тепловых скоростей) по его толщине, то их энергия теряется: возникает сопротивление трения, впрочем, относительно силы инерции ничтожное. Мерой его является $1/\mathrm{Re} \approx 10^{-9}$. В этом слое возникают и срываются с тела вихри, тянущиеся позади «спутной струей», образуя «аэродинамическую тень». В нее сносятся частицы метеорного тела, отделившиеся от поверхности испарением, пульверизацией жидкой пленки или механическим отрывом. Ф. И. Франкль нашел, что более 85% энергии встречных частиц передается пограничному слою. Здесь она переходит в другие виды энергии — свет, ионизацию, испарение и разрушение тела, далее в звук и т. д. Здесь при Ma = 200 — 250 выводы сверхзвуковой аэродинамики являются предельными, соотношение между сжимаемостью и вязкостью чрезвы-

чайно сложно, вопрос о взаимодействии ударной волны и пограничного слоя неясен. Опыты показывают, что конечная температура T, вычисленная из функций внутренней энергии по формулам аэродинамики, из-за рассеяния энергии вовсе не соответствует наблюдению. Например, при $v = 72$ *км/сек* $T = 2\,500\,000°$ К против наблюдаемой $T = 4000 — 7000°$ К. Эти явления должна учитывать физическая теория метеоров. Из-за необратимых процессов они будут иметь место даже в газе без трения.

Опыты при больших числах Ма заставляют считать, что толщина воздушной подушки на передней поверхности тела равна толщине пограничного слоя (ракеты А-4 по Изенбергу, 1947 г., шары при Ма $= 4$ по Чартерсу, 1947 г.). Основным тормозящим фактором является волновое сопротивление (так как и донное давление, и трение продолжают оставаться слишком малыми при больших v) и аэродинамический напор. Они поддаются подсчету, находящемуся в хорошем согласии с опытом при квадратичном законе сопротивления. К тому же приводят уравнения газовой динамики при $v \to \infty$ (Эпштейн, 1931 г.). Опыты Чартерса 1947 г. с шарами при экстраполяции до Ма $= 20$ дали $c_x = 0{,}7 — 1{,}0$, а наблюдения за движением обломков неправильной формы — лишь раза в два больше. То, что волновое сопротивление требует значительной доли энергии движения метеорного тела, подтверждается подсчетом энергии звуковых волн, которая превосходит во много раз энергию, идущую на разрушение тела, радиацию и ионизацию (см. гл. 26).

Парадоксальным на первый взгляд кажется, что кинетическая энергия метеорного тела в десятки раз превышает энергию, необходимую для полного превращения этого тела в метеорный газ. Головная волна «слепо», по выражению Прандтля, налетает на встречные молекулы, рывком увеличивает давление, уменьшает скорость встречи молекул до дозвуковой. Рэлей нашел, что динамическое давление на поверхность тела растет как v^2, так что уже на $H = 50$ *км* достигает десятков атмосфер.

Ныне опытом установлено, что уже при нескольких Ма ударная волна начинает светиться из-за роста T в скачке. В. В. Федынский, К. П. Станюкович и автор объясняют этим обширные протяженности газовых оболочек метеоров (десятки метров). Еще старые данные Хладни показывали, что по мере снижения болида размеры этих оболочек уменьшались. Чем более тупой является передняя часть метеорного тела, тем сильнее возмущение в воздухе. Наблюдения дневных болидов указывают, что мощные вихревые (турбулентные) движения при этом охватывают десятки кубических километров воздуха (рис. 193).

Для тупых и сферических поверхностной при больших значениях числа Ма головная волна отстоит от передней поверхности тела на $\sim 0{,}1$ его поперечника. Следовательно, для метеоритов массой в несколько килограммов это составит несколько миллиметров. Для малых песчинок в случае обычных метеоров головная волна

практически «сидит» на передней поверхности. Впрочем, разрыв при этом ничтожен, волны Маха слабы. Таким образом, на среднем участке происходит движение медленных низких или ярких крупных метеоров. Очень медленные (несколько *км/сек*) и слабые телеметеоры,

Рис. 193. Полет железного метеорита Богуславка с «дымным» следом 18 октября 1916 г. (по набл. Бокова, Никольск-Уссурийский).

по-видимому, могут быть видимы только на этом участке на высотах 40—60 *км*. У остальных указанных типов метеоров он начинается на $H = 70 — 80$ *км*, обычные же (более быстрые) метеоры до него уже не доходят.

Условимся считать, что движение на этом участке продолжается до момента прекращения свечения ($v \sim 1{,}5$ *км/сек*).

§ 257. Движение на нижнем участке имеет место лишь в том случае, когда сохранился остаток метеорного тела, движущийся в поле тяготения Земли. Затормаживаясь, метеорное тело доходит до технических сверхзвуковых скоростей. Здесь кончается область физической теории метеоров и вступает в свои права сверхзвуковая аэродинамика: масса тела не меняется, прекращается испарение и разрушение метеорного тела, свечение и ионизация, но акустические и тепловые явления остаются (звуковые явления рассматриваются нами отдельно в гл. 31). Если бы не было потерь тепла, то по

теории прямого скачка при $v=4$, 3, 2 и 1 *км/сек* повышение температуры составило бы соответственно 7750, 4350, 1925 и 465°. Фактические температуры в 3—4 раза меньше, например, для ракеты Фау-2 при $v=1{,}5$ *км/сек* на высоте $H=30$ *км* $T=900°$ С. Известно, что тонкие тросы (фалы) перегорают при близком полете тяжелых снарядов. Динамическое нагревание (тепловой барьер) даже при низких скоростях требует учета, так как, например, в кабине самолета «Шутинг Стар» при $v=0{,}25$ *км/сек* $T=60°$ С. Винтовочная пуля ($v\leqslant 0{,}9$ *км/сек*) при полете нагревается так, что потом ее нельзя держать в руках, но вещества, которыми такие пули иногда начиняются, не воспламеняются, т. е. $T<180°$ С (из-за потерь тепла).

Таким образом, температура метеорного тела на нижнем участке продолжает снижаться; при падении со скоростью $v_k\approx 0{,}1$ *км/сек* в течение почти двух минут оно вполне охлаждается и потому не удивительно, что обычные метеориты падают на Землю едва теплыми (железные метеориты горячи из-за высокой теплопроводности), но отнюдь не раскаленными, вопреки обычному предвзятому мнению. Закон сопротивления воздуха здесь усложняется и из простого квадратичного переходит в более сложный, учитывающий трение и отсасывание. Скачок плотности вызывает давление, в максимуме равное 165, 92, 40 и 9 атмосфер при v, равном соответственно 4, 3, 2 и 1 *км/сек*. Даже при $v=a$ поправка давления аэродинамического напора за счет возникновения уплотнения составляет 27%. При скорости $v\geqslant\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{2p}{\rho}}$ позади движущегося тела образуется пустота; для воздуха это наступает при $v\geqslant 0{,}76$ *км/сек* ($\mathrm{Ma}\approx 2{,}2$). Это явление называется *кавитацией*; при этом добавочное давление, создающее донное сопротивление или отсасывание, достигает 1 атмосферы. Поэтому им можно пренебрегать, когда давление лобового сопротивления велико. Полость кавитации быстро заполняется воздухом, но при $\mathrm{Ma}\sim 1$ ее длина порядка длины тела.

Движение на этом участке описывается газовой динамикой с учетом сжимаемости; термодинамические явления учитываются, как поправки. Явления обтекания и связанного с ним трения изучает аэродинамика: в пограничном слое рассматриваются движения сжатого воздуха, как струйные (ламинарные), так и возникающие при завихрении и срыве струй — турбулентные. В последнем случае сопротивление воздуха резко возрастает. Число Re, доходившее до сотен миллионов на верхнем участке, уменьшаясь до $\mathrm{Re}=0{,}5$, позволяет возникнуть ламинарному течению, охватывающему по длине участок l на поверхности, считая от вершины тела:

Масса метеорита (*г*)	10^9	10^6	10^3	1	10^{-3}
Конечная скорость (*м/сек*)	1000	360	100	36	10
Длина метеорита (*см*)	1200	120	12	1,2	0,12
l (*см*)	0,7	2	7	20	72

Это значит, что падение крупных метеоритов будет сопровождаться завихрениями вплоть до проникновения в почву, а падение масс менее 1 *кг* сопровождается ламинарным обтеканием. Толщина слоя, где ламинарное течение переходит в турбулентное, по Карману есть $\varepsilon=5{,}5\sqrt{\frac{\nu l}{v}}$ *м*, так что метеориты в 1 *мг*, 1 *кг* и 10^3 *т* имеют $\varepsilon=5{,}6$, 0,56 и 0,06 *мм*. Из-за возникновения этих новых явлений коэффициент формы c_x сильно изменяется, например, для тупоносого тела при атмосферном давлении имеем:

Скорость (Ma)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
c_x	(0,3)	0,25	0,53	0,61	0,63	0,62	0,58	0,58

На верхнем участке траектории c_x также меняется из-за того, что происходит оплавление краев метеорного тела, стремящееся придать им более обтекаемую форму, в результате чего получаются «ориентированные» метеориты (рис. 194). Кроме того, возможно «кувыркание» тела. На среднем участке последняя возможность также

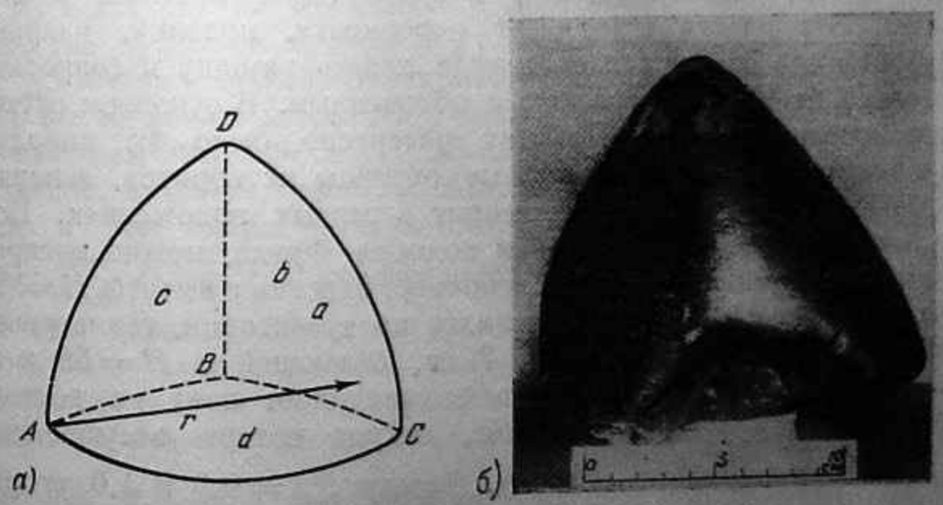


Рис. 194. *а* — Тело *ABCD* тетраэдроидной формы ограничено поверхностями четырех сферических треугольников *a*, *b*, *c*, *d*, описанных радиусом кривизны *r* из противоположных вершин. При данном объеме площадь проекции (миделя) такого тела наименьшая (после шара), поэтому ее стремятся принять метеориты; *б* — железный метеорит Репеёв Хутор (падение 8 августа 1933 г.). Воздушная эрозия придала ему форму минимального миделя.

имеется, поэтому c_x может меняться на десятки процентов. Если же обратиться к данным баллистики, то для снарядов, приобретающих гироскопическую устойчивость благодаря сообщаемому им вращению вокруг оси, будет играть роль некоторая подъемная сила, возникающая тогда, когда тело летит под углом $\delta>0$, образуемым осью вращения с касательной. Таким образом, одно и то же тело при

разных δ будет иметь разные c_x. Тем более должна быть разница для метеоритов. Если же принять, что c_x остается неизменным, то при одночленном законе сопротивления вида $F = cp(H)v^n$ приходится брать переменным n; зависимость $n = f(v)$ называется «степенью сопротивления». Например, по опытам Круппа со 100-*мм* снарядами в 1911—1912 гг. оказалось:

Скорость v (*м/сек*) . . .	50	200	250	300	330	350	400	600	1000
Показатель n	2,0	2,0	3,0	4,2	8	4	2	1,8	2

Виден максимум при $v = 330$ *м/сек*, т. е. при $\mathrm{Ma} = 1$, соответствующий звуковому барьеру, так как тепловые скорости молекул почти равны a. Именно здесь начинает образовываться головная волна. Если метеорное тело приближается к звуковому барьеру, уменьшая свою скорость, то здесь захлопывается полость кавитации, отделяется головная волна, тело отстает от нее и поэтому звук опережает породивший его метеорит. Последний, однако, остается покрытым как бы тонкой пленкой целлофана: это уплотненный воздух при $v \approx 200$ *м/сек*, наблюдающийся, например, на кромках крыльев самолета. Эта пленка сглаживает неровности, поэтому, например, необработанный снаряд может иногда давать разницу в сопротивлении только на 1% по сравнению с обточенным. В основном остается велико влияние формы. Поэтому интересно было бы «продуть» в аэродинамической трубе музейные образцы метеоритов, измеряя F при разных v и ориентируя метеорит в разных положениях. Пользуясь так называемым критерием подобия Фруда, можно воспроизвести путь движения метеорита: например, падение с высоты $H = 5$ *км* массы $M = 7$ *кг* с $v_k = 157$ *м/сек* идет по траектории, геометрически подобной траектории модели в 7 *мг*, падающей с $H = 50$ *м* при $v_k = 15{,}7$ *м/сек*. Падающее тело ежесекундно, пока не достигнет скорости v_k, теряет энергию Fv, откуда потеря энергии равна $\frac{1}{2} c_x S \rho v^3$; она передается воздуху. Между $\mathrm{Ma} = 0{,}9$ и 1,0 укорачиваются и исчезают головная и хвостовая баллистические волны (рис. 188); хотя здесь $v \leqslant a$, но в некоторых точках при обтекании могут возникать местные скорости $v > a$. Здесь же, при $\mathrm{Re} = (1 \div 4) \cdot 10^5$, у неудобообтекаемых тел, таких как метеориты, падает волновое сопротивление. Встречные частицы при приближении тела с $v < a$ как бы стремятся расступиться перед ним, «предупреждаемые» повышенной плотностью воздушного уплотнения перед метеоритом, не имеющего резкой границы. При переходе от беспорядочного турбулентного к упорядоченному ламинарному течению возникает замечательное явление «волнового кризиса» — временное уменьшение сопротивления при увеличении скорости тела. В нашем случае обратный эффект может произойти у масс немногим более 1 *кг* при v_k, несколько меньшей 100 *м/сек*. В 1924 г. это было подтверждено сбрасыванием шаров с самолета с $H = 600$ *м* (Бекон и Рейд). Вращение при этом определяет область, где происходит переход одного движения в другое и поэтому различно влияет на величину сопротивления. Последняя для шара при разных v такова (значение F при волновом кризисе при $v = 40$ набрано жирным шрифтом):

v (*м/сек*)	10	20	30	40	50	60	70	80
c_x	0,44	0,42	0,20	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11
F (10^3 *дин*)	50	180	190	**155**	250	400	660	1100
$j : g$	0,01	0,02	0,03	0,02	0,04	0,06	0,10	0,17

Нижняя строка указывает, какую часть сила F составляет от силы тяжести $Mg = 6{,}4 \cdot 10^6$ *дин*, действующей на метеорит массы $M = 6{,}57$ *кг* при $\rho_m = 3{,}8$ *г/см*^{3}. При $v_k = 155$ *м/сек* это отношение равно 1.

При скоростях $v = 100$ *м/сек*, приняв воздух несжимаемым, мы получим ошибку при определении давления p около 4%; для обтекаемого тела оно определится уравнением Бернулли: $\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \mathrm{const}$.

Идеально несжимаемым воздух можно принимать только при $v \leqslant 15$ *м/сек*. Когда Re снизится до 2500 и менее, то в спутной струе, где турбуленция возникает сразу за телом, появляются два ряда устойчивых вихрей, образующих «дорожку Кармана». Практически мы ее можем встретить у масс 0,1 *г* при $v < 20$ *м/сек*. Для еще меньших масс при $v < 3$ *м/сек* сила сопротивления становится ничтожной, остается трение, пропорциональное первой степени скорости и для шара получается формула Стокса: $F = 3\pi\mu Dv$, а $c_x = \frac{24\mu}{\rho Dv}$ (здесь μ — коэффициент вязкости).

Таким образом, движение на нижнем участке описывается баллистикой и аэродинамикой. Оно заканчивается моментом удара метеорного тела о почву, движение в которой до остановки происходит на низшем участке пути, рассматриваемом в гл. 30.

§ 258. Исследование упавших метеоритов указывает на следующие явления: 1) частое дробление метеоритов, не только каменных, но и железных (рис. 195), вследствие чего одиночные падения редки; 2) наличие *первичной* (см. рис. 3), а при расколе в воздухе еще *вторичной* и даже *третичной* коры плавления; 3) наличие черных *жилок* (рис. 152, *б*) внутри каменных метеоритов (по П. Н. Чирвинскому это расплавленное вещество коры, проникшее внутрь по порам под давлением воздуха); 4) магнитную окалину, подтеки расплава, капли и мелкие шарики на поверхности железных метеоритов; 5) сглаженную, без углов и ребер, «зализанную» поверхность метеоритов, иногда со следами косых струек, указывающих на переориентировку в полете; 6) форму метеорита, приближающуюся к обтекаемой, «ориентированные» метеориты (рис. 196), а иногда также признаки переориентировки в полете; 7) наличие углублений и впадин — пьезоглиптов и регмаглиптов (рис. 195, 197), размеры которых больше

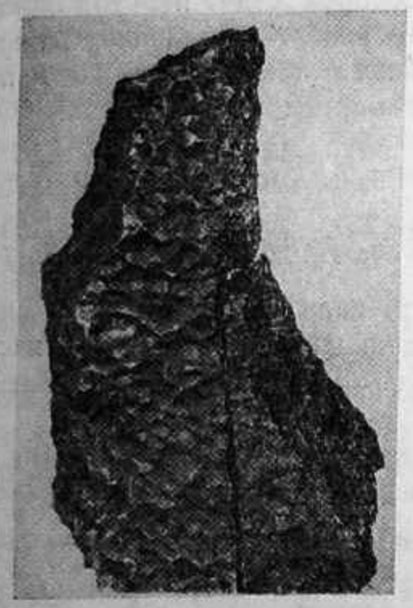


Рис. 195. Регмаглипты на поверхности крупного железного метеорита Богуславка (вес 257 *кг*) сами являются крупными. Они вызваны воздействием потоков воздуха (скачок температуры).

Рис. 196. Гигантский железный метеорит Вилламетте (Орегон, США) получил в воздухе ориентированную форму, несмотря на вес более 14 тонн.

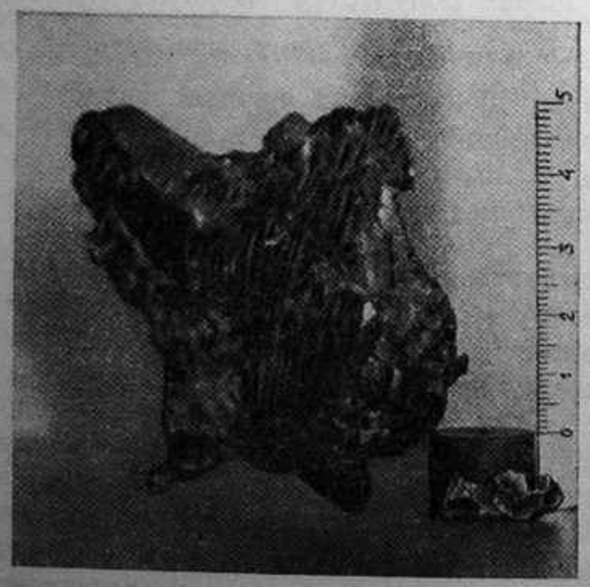


Рис. 197. Два куска железного Сихотэ-Алинского метеорита (падение 12 февраля 1947 г.). Меньший кусок имеет и меньшие регмаглипты, что указывает на их газодинамическую природу.

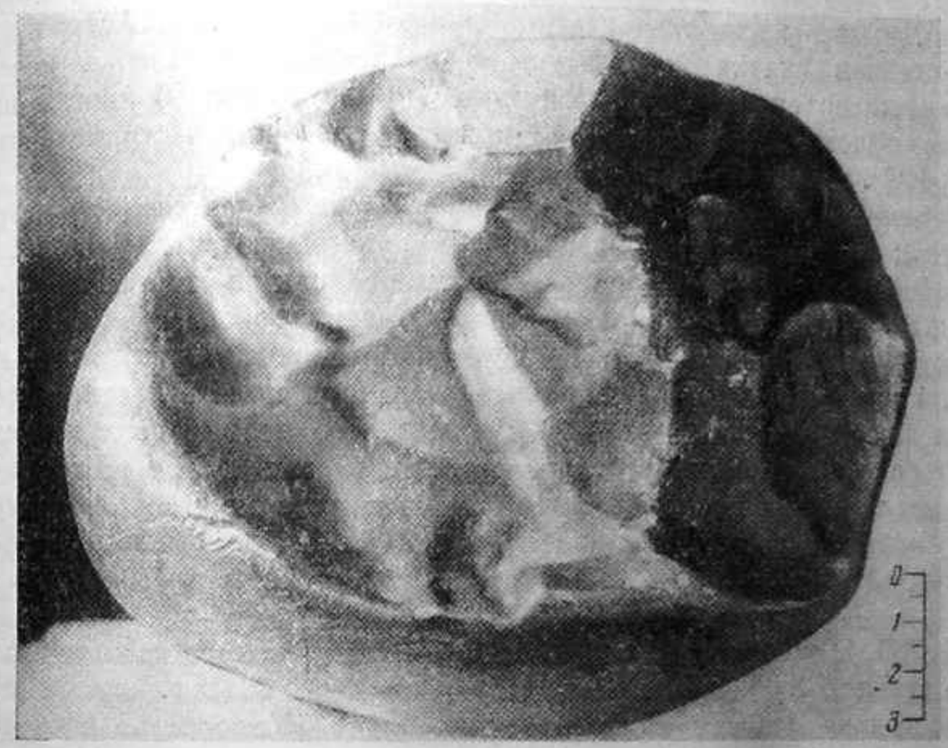


Рис. 198. Тыльная поверхность метеорита Репеёв Хутор (см. рис. 194, *б*) сохранила доатмосферный рельеф, так как сравнительно мало подвергалась воздушной эрозии.

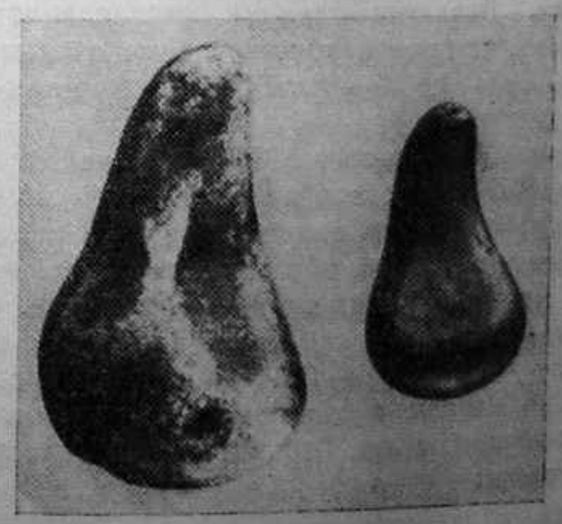


Рис. 199. Грушевидные железные метеориты: Шарлотта (США) и Бугальди (Австралия), получившие ориентированную форму под действием воздушной эрозии. До области задержки двигались вперед острым концом, при свободном падении — тупым концом (по Фаррингтону).

зависят от размеров метеорита, чем от состава и скорости, следовательно, вызваны аэродинамической причиной (по И. С. Астаповичу, воздействием скачка температуры и давления); 8) наличие каверн после выплавления менее тугоплавких компонентов; 9) иногда скопление толстого слоя вещества коры на тыльной части метеорита (рис. 198).

Каменных метеоритов крупнее тонны не встречается (они разрушаются); железные, как более прочные, сохраняются массой иногда почти до ста тонн без дробления; с массой свыше тонны их более двадцати. Конечной формой развития ориентированных метеоритов являются грушевидные (рис. 199). Кора метеорита образуется в момент, когда температура поверхности тела при полете делается ниже точки плавления (1100—1300° С), после чего потоки воздуха перестают ее сдувать и пульверизировать. Найденные на земле космические железо-никелевые пылинки являются застывшими шариками, пузырьками или их частями (см. гл. 34, а о пылевых следах гл. 29), как и силикатные шарики (Е. Л. Кринов и другие).

§ 259. Искусственные метеоры. Первым «искусственным метеором» явился 105-*кг* снаряд, выпущенный в 1918 г. по Парижу с расстояния 120 *км* из германской пушки «Колоссаль» и светившийся в первой части полета, длившегося 2 *мин*. Из двух пушек таких снарядов было выпущено более 200. Затем еще до второй мировой войны было описано свечение пуль, выстреливаемых со скоростью около 3 *км/сек*. Они пролетали несколько метров в атмосферных условиях. Развитие техники направленного взрыва, как известно, позволило, применяя кумулятивные заряды, получать скорости маленьких пуль до 5—9 *км/сек* и более мелких частиц до 90 *км/сек*.

В лаборатории Майкельсона Морской испытательной станции (Калифорния) в 1952 г. исследовались сверхбыстрые пули из стали и разных металлов, весом от долей грамма до нескольких граммов. В этой *астробаллистической* области уже перекрываются скорости, рассматриваемые метеорной астрономией и техникой. Стальные пульки массой 1,9 *г* при $v_0 = 2{,}9$ *км/сек* пролетали 4,4 *м* в воздухе, испытывая торможение $-j = 0{,}5 - 0{,}8$ *км/сек*^{2}; в полете они светились слабо при $v = 2{,}5$ *км/сек* и обычном атмосферном давлении. Баллистический коэффициент их был, несмотря на деформацию при выстреле, следующим:

Скорость v (*км/сек*) . .	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	5,0	10,0
c_x	0,24	0,25	0,29	0,41	0,48	0,49	0,47	0,45	0,43	0,42	0,4

Чартерс и Томас для стальных шаров в 5 и 10 *мм* диаметром при $v = 1{,}0$ *км/сек* получили почти то же: $c_x = 0{,}49$. Стальные кубики дали на 50% больше. Динамическая температура при 6 *км/сек* оказалась 4100° К вместо теоретической 24 000° К. Свечение стальных пуль прекращалось при $v < 2{,}4$ *км/сек*, потеря массы — при $v < 2{,}5$ *км/сек*. Пульки из алюминия и легких металлов сгорали, выделяя тепло и яркий свет (10—20 тыс. свечей). Пролетев путь $L = 2{,}5 - 4{,}0$ *м* при $v_0 = 5 - 6$ *км/сек*, они снижали v до 1,0—2,1 *км/сек*, испытывая j до 1—4 *км/сек*^{2}. При $v = 6$ *км/сек* давление воздуха составляло 150 атмосфер вместо теоретического $p = 372$ *ата* без учета потерь. Пульки из цинка, кадмия и олова разрушались выстрелом и вылетали роем обломков, алюминиевые дробились в полете на несколько частей. В течение 1 миллисекунды десятки раз возникали и сменяли друг друга светлые хвосты длиной до несколько сантиметров и длительностью 0,1—0,5 *мсек*. После полета оставался дымовой след. Некоторые пульки «рыскали» в полете, создавая неровности траектории. Потеря скорости шла по формуле $v = v_0 e^{-KL}$ при $K = 0{,}08 - 0{,}16$ в зависимости от массы, материала и дробления и была наибольшей при минимальной плотности ρ_m. При таких скоростях пулька, сплющенная в диск или обгоревшая, имела c_x такой же, как у сферы. Еще раньше было известно, что даже неправильной формы обломки дают c_x, отличное от c_x сферы менее, чем вдвое. При обгорании c_x оказалось меняющимся. Термодинамического равновесия при этих скоростях уже не оказалось.

Интересные данные были получены с так называемыми кумулятивными зарядами. Представим мысленно, что поверхность взрывающегося заряда в одной своей части вогнута. Тогда струи взрыва, перпендикулярные к этой поверхности, сконцентрируются на мгновение в одной точке, как в фокусе. При этом могут быть достигнуты мгновенные давления в десятки миллионов атмосфер и температуры до миллиона градусов (Г. И. Покровский [626]). Можно осуществить концентрацию вдоль некоторой оси; тогда скорости движения по этой оси могут достигать десятков километров в секунду. Вводя некоторые твердые тела в сферу взрыва, можно получить такую же скорость осколков этих тел, например, 45—90 *км/сек*. Они вылетают направленным роем, воспроизводя в воздухе явление метеора. При обычном атмосферном давлении, пролетев несколько дециметров, осколки «сгорают», полностью разрушаясь.

§ 260. Некоторые новые исследования. За последнее время был проведен ряд исследований по изучению движения тел с большими скоростями. Некоторые работы произведены с аэродинамическими трубами; так, например, в Ковентри (Англия) в 1955 г. введена в действие труба со скоростью воздушного потока до Ма = 3. С ее помощью будет исследоваться аэродинамический нагрев. В Таллахоме (США) строится труба с мощностью компрессора 216 000 *л. с.* В сечении $4{,}9 \times 4{,}9$ *м* она даст Ма = 3,5. В баллистических трубах исследуется движение тела в неподвижном воздухе. В ударных

трубах создаются ударные волны и исследуется их взаимодействие с телами различной формы, с пограничным слоем и т. д. Например, наблюдается, как по мере снижения скорости перемещается по «продуваемому» телу скачок уплотнения и как он ослабляется по мере перехода через скорость звука. Ударная волна во всех газах (H, He, Xe, Ar) даже при низком давлении светится: фронт волны светится относительно слабо; сильнее всего спустя $2 \cdot 10^{-6}$ *сек* светятся области, расположенные несколько дальше за ним. При этом возникает высокая температура (10—18 тыс. градусов), так что значительный процент (иногда 100%) газа оказывается ионизованным. Ионизационное равновесие наступает через 12 микросекунд. Возникает сплошной спектр. Кроме того, возникают электромагнитные явления; последние вообще при взрыве недавно обнаружены в Японии (Такакура, 1955 г.).

Много работ проводится в связи с полетом ракет и управляемых снарядов. Звуковой барьер был преодолен человеком на самолете в 1947 г., после чего полеты со сверхзвуковой скоростью производились многократно. Самолет Скай-Рокит в 1953 г. дал $v = 2136$ *км/час* (Ma = 2). При $v = 0{,}985 - 1{,}015$ скорости звука возникали скачки уплотнения на поверхности самолета. Иногда водяные пары конденсировались спирально вокруг самолета. Оливер в 1956 г. описал обтекание простых тел с тупым передним концом при Ma = 5,8; Богдонов и Хаммитт в 1956 г. провели аэродинамические испытания при Ma = 11—15, Фейдж и Иохансен установили, что донное давление мало зависит от степени обтекаемости тел, так как здесь основную роль играют не форма тела, а срывающиеся вихри: они образуют «след». Поэтому форма тела влияет не больше, чем изменение числа Рейнольдса для одного и того же тела. Область образования этих вихрей за телом доходит до 4—5 его поперечников. В 1954 г. Томас доказал, что расстояние от центра сферы до вершины возникшей перед ней ударной волны пропорционально радиусу этой сферы; это расстояние пропорционально числу Ma. Проблемы аэродинамического нагревания кабин самолетов и ракет потребовали экспериментов в этой области. Самолет Фейри Δ-2 при $v = 1882$ *км/час* на высоте $H = 11{,}6$ *км* нагревался на $\Delta t = +100°$. В Морской артиллерийской лаборатории США (NRL) нейлоновые шарики выстреливаются со сверхзвуковой скоростью в тяжелый газ. При Ma = 6,9 исследуется плавление моделей ракет из сплава Вуда (NACA). Шортал сообщает, что в результате полетов около 1800 ракет NACA получено много данных для диапазона скоростей от 0,6 до 4,0 Ma. Ряд исследований проведен по изучению аэродинамического (иначе «кинетического») нагрева. Последний возникает от адиабатического сжатия воздуха и от фрикционного нагрева в пограничном слое. В тех «критических» точках тела, где встречные молекулы воздуха полностью затормаживаются, температура наивысшая; она называется критической или *температурой тор-*

жения T_s. Если T_0 — температура невозмущенного воздуха, то

$$T_s = T_0\left[1 + \frac{1}{5}\left(\frac{v}{a}\right)^2\right].$$

Повышение температуры на некотором диапазоне v удобно представляется выражением $\Delta T = \left(\frac{v}{45}\right)^2$, если v выражать в *м/сек*. Если тело и пограничный слой имеют одинаковую температуру, то потока тепла от слоя к телу нет и тогда температура у поверхности тела называется *адиабатической температурой* T_{aw} у стенки, причем

$$T_{aw} = T_0\left[1 + \frac{r}{5}\left(\frac{v}{a}\right)^2\right];$$

здесь r есть мера эффективности нагрева в слое и называется *коэффициентом восстановления*. Хортон (1954 г.) принимает по данным опыта $r = 0{,}9$ и тогда для высоты $H = 15$ *км*, например, получается:

Скорость (Ma)	0	2	4	6	8	10
Скорость (*м/сек*)	0	600	1200	1800	2400	3000
T_s, °K	220	360	850	1600	2600	3900
T_{aw}, °K	220	340	800	1540	2400	3400

Тепло, возникшее в слое в результате сжатия и трения, передается телу молекулами (контактный и конвективный нагрев) и излучением.

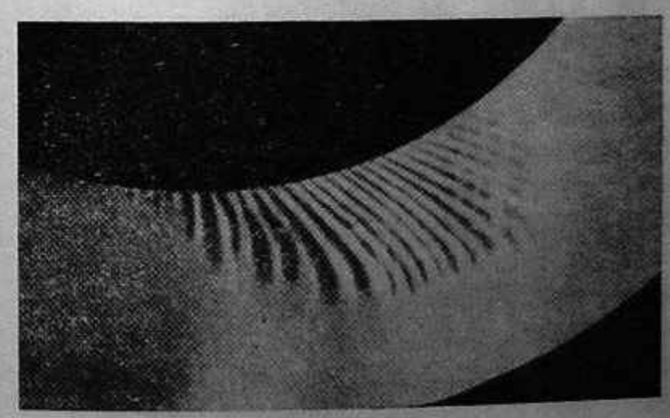


Рис. 200. Возникновение веера баллистических волн при огибании внешней выпуклой поверхности (поток идет справа).

Контактный нагрев воспроизведен лабораторно до Ma = 2—3. Из двух видов конвективной теплопередачи — свободной и вынужденной — в нашем случае из-за больших скоростей потока важен лишь последний. Поток тепла H_T, сообщаемый телу контактным нагревом, свободной и вынужденной конвекцией и радиацией, в абсолютной мере достигает соответственно 2,7, 0,03, $> 1{,}3$ и 0,1—2,1 *кал · см*$^{-2}$ *· сек*$^{-1}$. Практически важно не столько T_{aw}, сколько знание H_T; например по Кинслеру (1954 г.) самолет при Ma = 2,5 на $H = 10{,}7$ *км*

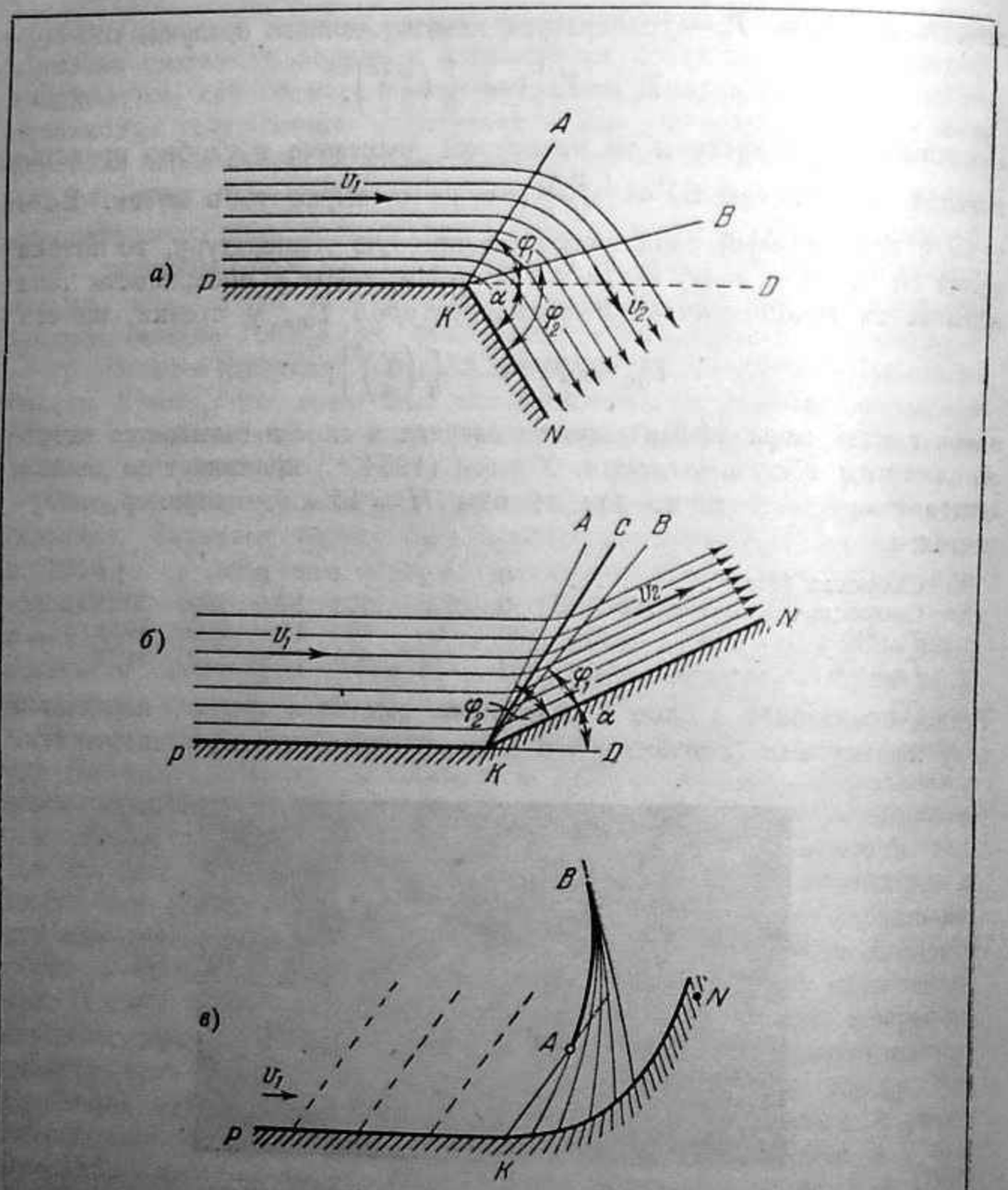


Рис. 201. *а* — Обтекание тупого внешнего угла K при $v_1 > a$; KA и KB — волны Маха от угловой точки (выступа) K; при $K \sim 180°$ KA и KB сливаются; *б* — обтекание тупого внутреннего угла K при $v_1 > a$; между KA и KB возникает скачок плотности KC; *в* — обтекание вогнутой поверхности KN при $v_1 > a$ с образованием скачка уплотнения AB; возможно, что его высокая температура является причиной возникновения регмаглиптов.

за пять минут получает 43 тыс. *б. кал.* при $T_s = 221°\,C$. Эта полная температура достигается на всех передних кромках. Отношение $(T_{aw} - T_0)/(T_s - T_0)$ для ламинарного слоя по данным теории и опыта равно 0,84, а для пограничного слоя — 0,89. Таким образом, в нашем примере температура пограничного слоя будет $T_{aw} \sim 195°\,C$, а температура прилегающей поверхности тела будет зависеть от свойств вещества. Из-за термической инерции даже в металле температура $t°$ бывает значительно ниже T_{aw}. Например, для ракеты при $v = 2{,}8$ *км/сек*, $T_{aw} = 330°$, а $t° = 130°\,C$. Ожидается, что стальная ракета начнет плавиться при $Ma < 6$, а при $v = 6$ *км/сек* T_s достигнет $1816°\,C$. При падении ракеты на Землю в нижних слоях воздуха в конце пути тепловой поток H_T достигнет 2700 *кал/см²* · *сек* для турбулентного движения; H_T в 18 раз меньше для ламинарного движения, что все же в 50 раз больше тепловых потоков современных мощных котлов. Действием радиации можно пренебречь, так как даже при плавлении железа тепловой поток $H_T \sim 15$ *кал/см²* · *сек*. Градиент падения температуры в наружном слое определяется выражением

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{\Lambda}{\lambda}(T_{aw} - T_w) = \frac{H_T}{\lambda}. \qquad (120)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности, Λ — коэффициент теплопередачи, T_w — температура поверхности. В нашем случае, при $\lambda \sim 0{,}0011$, градиент будет от 2520 до 140°/*мм*, отчего в теле возникают *термические напряжения*, могущие разрушать его подобно тому, как в пустынях разрушаются скалы. Ожидается (Макленнан, 1955 г.), что головная часть будет оплавляться и сдуваться, причем потоки расплавленного вещества распространятся по остальной части ракеты. В 1953 г. Грюнвальд в трубе исследовал оплавление тел из твердой CO_2, но она испаряется, не плавясь. Поэтому Макленнан испытывал тела из сплава Вуда ($T_{плавл.} = +70°\,C$) при $Ma = 6{,}9$, $T_s = 371°\,C$, $Re = 13{,}3 \cdot 10^6$. Полусфера диаметром 29 *мм* при $r = 0{,}825$ получала бы $H_T = 3{,}6$ *кал/см²* · *сек*, тогда как измерено $H_T = 4{,}7$; плавление начиналось через 0,7 *сек*, а через 10 *сек* потеря веса за счет расплавления достигала постоянного значения 4,2 *мг/град* · *сек*. Особенностями обтекания тела газом, вероятно, можно будет объяснить более детально явление образования регмаглиптов (рис. 200 и 201).

Очевидно, что область скоростей, охватываемых описанными явлениями, соответствует скоростям метеоритов в области задержки и при дальнейшем падении на Землю. Потребность в обобщении уже накопленных данных побудила, например, Принстонский университет начать издание двенадцатитомной серии книг по аэродинамике больших скоростей.

ГЛАВА 24

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРОВ

§ 261. Введение. Первые попытки физического объяснения явлений, возникающих при полете метеоров, исходили из неверных предположений о том, что свечение метеоров вызывается нагреванием и излучением самого метеорного тела. Крупное значение имело открытие С. Н. Блажко в 1907 г. линейчатого характера спектров метеоров; оно доказало, что в метеоре светит газ, а не раскаленное тело. Правда, еще в 60-х годах XIX в. Гайдингер [543, 679] рассматривал метеор как газ, адиабатически сжатый до состояния свечения и смешанный с продуктами испарения метеорного тела. Для выяснения вопроса о потере скорости метеора в атмосфере еще в 1865 г. Скиапарелли [108] получил выражение для v в точке, где давление воздуха есть p при радиусе r_m и плотности ρ_m метеорного тела, летевшего с начальной скоростью v_0 под углом $i = 90° - z_R$:

$$\lg\left[1+\left(\frac{696}{v}\right)^2\right]-\lg\left[1+\left(\frac{696}{v_0}\right)^2\right]=0{,}0278\,\frac{p\,\operatorname{cosec} i}{r_m\rho_m}. \quad (121)$$

В 1884 г. аналогичное выражение привел И. А. Клейбер [11]. Конечные скорости метеорных тел очень быстро почти уравниваются, хотя бы их v_0 и различались очень сильно (Скиапарелли, Клейбер). В 1913 г. Дэвидсон [669] получил такое выражение:

$$\lg\left(1+\frac{1}{v}\right)-\lg\left(1+\frac{1}{v_0}\right)=Ae^{-\frac{H}{s}\frac{\operatorname{cosec} i}{r_m\rho_m}}, \quad (121')$$

где A и s — числовые коэффициенты. Стало ясно, что достигнуть с космической скоростью почвы могут только гигантские метеориты (Магги, 1924). Более мелкие практически теряют всю космическую скорость в атмосфере. Так как убывание скорости идет все время, пока метеорит движется, то введенный еще в прошлом веке термин «точка задержки» следует заменить на «область задержки», практически длиной несколько *км*, где *торможение имеет максимум*. Уже в 1922 г. В. Г. Фесенков [428] нашел, что при $v_0 = 40$ *км/сек* энергия в 70 раз больше того, что требуется для испарения железного метеорита при $T = 1500°$.

В 1904 г. Рэлей вывел формулу для давления P в вершине тела при скорости $v = a \cdot \mathrm{Ma}$ (γ — показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей при постоянном давлении и объеме):

$$P=\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}(\mathrm{Ma})^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}\left[\frac{2\gamma}{\gamma-1}(\mathrm{Ma})^2-1\right]^{\frac{1}{1-\gamma}}-1. \quad (122)$$

При $\mathrm{Ma}\to\infty$ P растет пропорционально v^2. На то, что сопротивление воздуха производит большое давление на метеорит в полете, указывал Фаррингтон в 1916 г., изучая деформации железных и сдвиги каменных метеоритов. В 1916 г. в воздухе раскололся железный метеорит Богуславка на куски в 199 и 57 *кг* (третий похищен при интервенции 1920 г.).

В 1927 г. Бургатти [666] выразил сомнение, как может чрезвычайно разреженный воздух на $H = 50$ *км* дать заметное свечение метеора? Хотя известно интенсивное свечение полярных сияний и разрядных трубок, но в 1929 г. Мартиноцци поддержал эту мысль, объясняя свечение метеора за счет накопляющихся на нем положительных зарядов. В 1934 г. Мишель Леви и Мюраур обнаружили опытом свечение ударной волны взрывов. Стоило сделать шаг — и объяснение свечения метеорных оболочек было бы найдено. Но шаг этот сделан не был, пока внимание вновь не привлекли спектры метеоров, полученные Миллмансм сравнительно в большом числе при возвращении Леонид в 1932 г. С этими данными должна была посчитаться всякая физическая теория метеоров.

§ 262. Обзор развития физической теории метеоров. Теория Хладни явилась первой астрономической теорией: он рассматривал метеоры, как явления, вызванные космическими телами, тождественными по составу с метеоритами, и объединил метеоры в одну группу с болидами. Физическим явлениям, наблюдаемым при полете, он дал объяснение, соответствующее состоянию науки того времени, но в общем верное. Он писал, что наблюдаемые «явления можно объяснить, если принять, что метеоры суть маленькие твердые тела, ... которые с неизмеримой скоростью проносятся в верхних частях атмосферы».

Теория Гайдингера (1861—1864 гг.) имела целью объяснить причины световых, тепловых и звуковых явлений болидов на основе механической теории тепла [543]. Она явилась шагом вперед, хотя не могла учесть неизвестных тогда фактов (например, баллистической природы звуков болидов).

Теория Скиапарелли (1865—1869 гг.) в основном касалась вопросов торможения метеорного тела неизменной массы и развиваемой им при полете температуры [108]. Основные результаты работ Скиапарелли приведены выше.

Теория И. А. Клейбера (1884 г.) близка к предыдущей и дала результаты, качественно верные и поныне [11]. В частности, Клейбер сделал важное указание на фильтрующее действие земной атмосферы и на то, что летучие вещества не могут доходить до нас в форме метеоритов, хотя и производят метеоры.

Теория Гэде (1913 г.) относилась к верхнему участку траектории, где нет взаимодействия молекул [671]. Принимая энергию одного удара $W=\frac{1}{2}\mu v^2$ (μ — масса молекулы) и число молекул на пути тела N, он нашел суммарную энергию ударов за 1 *сек* равной $\frac{1}{2}N\mu Sv^3$ и вычислил, используя закон Стефана — Больцмана, температуры вращающегося (4300° С) и невращающегося (6900° С) тела.

Теория Линдемана и Добсона (1923 г.) относилась к движению на среднем участке [677]. Авторы допускали, что энергия движения идет на работу адиабатического сжатия воздуха (тогда как вместо адиабатического закона следует применять динамический по формуле Гюгонио). Тогда температура в подушке сжатого воздуха будет

$$T=T_0\left(\frac{\mu_0 v^2}{2RT_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \qquad (123)$$

где μ_0 — молекулярный вес воздуха, имеющего температуру T_0. Допускалось, что метеорное тело прогревается сразу (что справедливо для медленных и мелких железных тел). Тогда приток тепла к поверхности тела зависит от скорости v' молекул в подушке, плотности ρ в ней и от потери Δv скорости в подушке следующим образом:

$$S\rho v'=S\frac{1}{2}\rho_0 v^3\frac{\Delta v}{v}.$$

Доля энергии a, идущей на нагревание, оказывается порядка $a\approx\frac{\Delta v}{3v}$ (или 1% в кислородно-азотной атмосфере). Нагреванием за счет лучистой радиации подушки авторы пренебрегали.

Если обозначить скрытую теплоту испарения через Q, то скорость убывания радиуса r_m есть

$$\frac{dr_m}{dt}=\frac{v^2}{24}\frac{\rho}{\rho_m}\frac{\Delta v}{Q}, \qquad (124)$$

а торможение

$$j=-\frac{3}{8}\frac{\rho v^2}{\rho_m r}. \qquad (125)$$

Расчет был применен к метеору 1 вел., яркости которого при расстоянии 150 *км* соответствует поток энергии $3{,}3\cdot10^{10}$ *эрг/сек*. При $T_0=220°$ К и азотной атмосфере в подушке $T=3420°$ К при $v=40$ *км/сек* и 1550° К — при 15 *км/сек*. Если метеор пролетел путь $L=60$ *км* за время $\tau=1{,}5$ *сек*, превратив всю энергию в излучение, то минимальная масса будет 6,2 *мг*. Тогда железное тело будет иметь радиус $r_m=0{,}58$ *мм* и испытает давление $4{,}5\cdot10^7$ *дин/см*^{2} (45 *атм*). Пока не испарится 90% массы, торможение незаметно, при потере 95% массы скорость уменьшится на 25%. Теория являлась значительным шагом вперед (хотя и исходила из идеального случая) и оказалась особенно важной для определения T и ρ атмосферы.

Теория Гофмейстера (1924—1934 гг.) исходила из того, что свечение метеора начинается тогда, когда убыль энергии $\frac{dE}{dt}$ достигнет определенного из наблюдений значения [673]. Поэтому более быстрые метеоры появятся выше, что и наблюдается. Считалось, что интенсивность свечения метеора определяется плотностью сжатого воздуха, которая сама зависит от скорости и размера метеорного тела. Тогда

$$\frac{dE}{dt}=av^2[p(H)]^y f(m), \qquad (126)$$

где параметры a и y находятся из наблюдений (каталоги Деннинга дали $a=8{,}0$ и $y=0{,}58$). Так как торможение велико только в конце, то здесь оно не учитывается. Приняв массу метеора 2,3 вел. за единицу, Гофмейстер находил высоты, продолжительности и яркости других метеоров, а для данного метеора — изменение массы и яркости в полете. Этот «относительный» метод был свободен от предположений о строении атмосферы, тогда еще плохо известном, и качественно соответствовал наблюдениям.

Теория Спарроу (1926 г.) касалась движения на верхнем участке (как и у Гэде), рассматривая удары встречных молекул, как неупругие [684]. Тогда $E=\frac{1}{8}kS\rho v^3$, где $k=0{,}37=\text{const}$, а излучение на высоте $H=160$ *км* при $v=70$ *км/сек* будет соответствовать температуре черного тела при $T=3200°$ К. Используя принцип обратимости, автор считал поток молекул налетающим на неподвижное метеорное тело. Он также отрицал адиабатический процесс: сжав *адиабатически* некоторый объем водорода до 0,1 начального, получим повышение T на 12°, сжав его до 0,1 *динамически* с $v=60$ *км/сек*, найдем повышение на 18 000°. При соударении с телом часть энергии уйдет на ионизацию, диссоциацию и k-я часть — на разрушение кристаллической решетки; для железного и каменного тел $k=27\%$ и 37%. Тогда плотность воздуха на пороге появления ($\rho v^3=\text{const}$) окажется $\rho=\frac{8\sigma T^4}{kv^3}$, т. е. высота H_1 растет с ростом скорости v. Приняв $T=2500°$ К для $v=10$, 40 и 70 *км/сек*, Спарроу получил соответственно $H_1=69$, 98 и 115 *км*. Считая, что бо́льшая энергия молекулы способна возбудить более высокие уровни состояний атомов, он нашел эквивалентные частоты $h\nu=\frac{mv^2}{2}$; при тех же

скоростях $\lambda = 225$, 16 и 5,2 $m\mu$, т. е. чем больше v, тем дальше в ультрафиолетовую часть уходит максимум излучения и его спектр приближается от дугового к искровому. Качественно это верно; неточна гипотеза, что *вся* энергия идет на повышение внутренней энергии атомов метеорного тела. Достоинством работы являлось рассмотрение явления с молекулярной точки зрения. Взгляды Гэде и Спарроу легли в основу современной теории метеоров.

В 1927 г. Мэрис [678] продолжил этот расчет. Молекула азота при $v = 40$ *км/сек* несет энергию 155 *эв*, достаточную, чтобы выбить более сотни атомов из тела или сообщить $T = 1000°$ К другим 1800 таким же, как она, молекулам воздуха, либо испарить 56 железных молекул, либо 24 из них испарить с ионизацией. Излучение при этом должно происходить в ультрафиолете или даже в области мягких рентгеновских лучей, так что в видимую часть может перейти только 10% излучения. Мэрис неправильно считал, что только 1% общей энергии идет на работу сопротивления воздуха. Неверно было и положение об абсолютной неупругости ударов.

Теория Фишера (1934 г.) исходила из рассмотрения упавших метеоритов и вводила предположение, что потеря массы пропорциональна потере кинетической энергии [670]. Без учета потерь тепла и расхода на излучение Фишер писал для мгновенного значения массы M, когда ее скорость есть v:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Q}{K}\frac{M}{2}\frac{d(v^2)}{dt}, \qquad (127)$$

где Q — скрытая теплота плавления, а K — постоянная. Интегрируя от начальной массы M_0 и скорости v_0 до конечной скорости v_k (~ 1 *км/сек*), когда метеорит уже не разрушается, Фишер нашел

$$M = M_0 e^{-\frac{K}{2Q}\left(v_0^2 - v_k^2\right)}. \qquad (128)$$

Это — одна из основных формул теории метеоров. При квадратичном законе торможение $j = -c\rho M^{-\frac{1}{3}} v^2$. До численного решения теория не была доведена.

Теория Н. М. Штауде и В. П. Ветчинкина (1927 г.) использовала данные строения атмосферы на основании фотометрического анализа сумерек, выполненного В. Г. Фесенковым [665]. Применяя квадратичный закон сопротивления, авторы численно интегрировали уравнения движения метеора. Допускалось, что свечение метеора начинается при $T = 1600°$ К, когда тело потеряет определенную долю энергии. Масса принималась неизменной. Влияние силы тяжести не учитывалось, поэтому траектория являлась отрезком гиперболической спирали при постоянном угле наклона i. Была найдена зависимость v от давления воздуха p, массы тела M, его радиуса r_m, а также от v_0 и i. Высоты появления оказались $H_1 \approx 80$ *км*. Таким образом, уже в то время в СССР был приме-

нен вполне приемлемый метод и получен качественно верный результат о завышенности тригонометрических высот.

В 1935 г. К. П. Станюкович [663] получил уравнение скорости

$$v = v_0 e^{-k\frac{m}{M}}, \qquad (129)$$

где M — масса тела, а m — масса смятого им воздуха и k — коэффициент упругости. Он также считал, что для начала свечения нужно, чтобы заданная часть энергии перешла в излучение; тогда можно найти $v = f(H)$ и изменение плотности воздуха с высотой. Затем А. Б. Северный [662] исследовал распределение абсолютной яркости метеоров по высоте и получил качественный вывод, что выше 80 *км* средняя молекулярная плотность воздуха должна начать убывать, что и подтвердилось позже.

Теория Эпика (1933—1937 гг.). На основании данных опытов П. Л. Капицы с α-частицами радия-С, скорости которых сравнимы с космическими, было принято постоянство расхода энергии на 1 *см* длины пути пробега, мало зависящее от величины самой энергии; соударения оказываются неупругими [680]. Рассматривается метеорное тело («ядро») и его воздушная подушка («кома») с продуктами испарения. В соответствии с расчетами Эпштейна (1931 г.) считалось, что у маленьких частиц ее не может быть и она возникает у болидов. В результате соударения происходит ионизация. Свечение производят кома и ядро; температурное излучение составляет не более 1%, остальную энергию дают соударения с ядром, причем эту энергию переизлучает кома, дающая основной поток радиации. Поэтому в спектре возможны два максимума радиации — в области и длинных, и коротких волн, лежащих вне оптического спектра. Поскольку на высоте метеоров длина свободного пробега атома железа составляет 3,7 — 370 *см*, то видимые следы образуются коротковолновой (УФ) радиацией. Одновременно с ионизацией возникает электронное возбуждение, приводящее к излучению линий паров комы. Ионизация с возбуждением требует небольшого радиационного потенциала (O_2 — 17, N_2 — 19 *эв*). В видимом интервале спектра излучается $^1/_{40}$ доля энергии движения, переходящей в излучение при 6000° К при $M = 0{,}3$ *мг*, поэтому исправленная масса равна 12 *мг*. Ультрафиолетовые и рентгеновские лучи могут возбудить в атмосфере спектр флуоресценции: в первом случае в спектре следа будут видны линии металлов, во втором — газов. Вычислялось аэродинамическое давление, работа сил сопротивления до образования подушки, выводится зависимость $H = f(v_0)$. Важную роль играет распыление вещества, его вязкость, вращение тела вокруг оси. Вторичные столкновения происходят уже далеко от метеорного тела.

Теория Швиннера (1936 г.) изложена в работе по физической геологии [683]. В ней разбирался математически вопрос о разрушении метеорного тела. Рассматривалось уравнение Лапласа

распространения изотермы плавления в глубь тела, причем расплавившееся вещество сдувается прочь. Скорость разрушения метеорита $\frac{dr_m}{dt}$ есть скорость распространения изотермы, известная из опыта. Однако следует заметить, что сравнение поверхностей раскола упавших метеоритов дает $\frac{dr_m}{dt} \approx 4-7$ *мм/сек*; действие паяльной лампы на метеорит этого не даст. Поэтому видно, что одного теплового воздействия мало для разрушения метеорного тела — нужно механическое действие потоков воздуха.

Теория Хоппе (1937 г.) легла в основу современной теории [674]. Автор ее ввел *коэффициент аккомодации* a, указывающий, какая доля энергии удара молекул идет на нагревание. Удар он принимал абсолютно упругим, $a = 0{,}01$—$0{,}05$, отражение молекул — зеркальным. Хоппе составил уравнения движения, позволяющие найти торможение в зависимости от массы (рис. 202). Он нашел уравнение

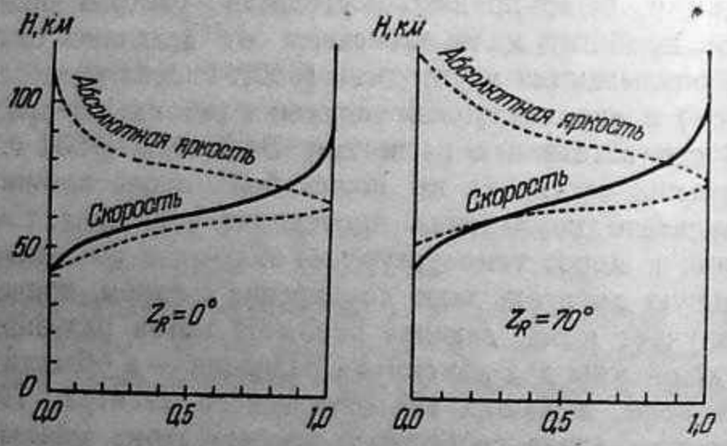


Рис. 202. Относительные изменения абсолютной яркости и скорости метеора с массой 1 *г* при скорости 60 *км/сек* и различных углах наклона траектории (по теории Хоппе, 1937 г.).

испарения и торможения, пользуясь аэродинамикой. В 1938 г. Уиппл [688] по излучению нашел массы шести метеорных тел, а пользуясь тем, что $j = F/M$ и что F пропорционально ρ, определил плотности воздуха ρ на высоте полета метеоров. Уравнение Уиппла имеет вид

$$j = -\Gamma A \rho v^2 \rho_m^{-\frac{2}{3}} M^{-\frac{1}{3}}. \qquad (130)$$

Численно $\Gamma = 0{,}42$, $A = 1{,}70$ для тел неправильной формы (по позднейшим опытам на полигоне).

В 1940—1941 гг. Б. Ю. Левин [660] предположил, что в уравнении испарения и торможения играет роль «коэффициент проницаемости» $\alpha = N/N_0$, где N_0 — число молекул воздуха на пути тела, а N — число молекул, фактически достигших его поверхности; тогда

уравнения Хоппе напишутся в виде (K — параметр):

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\alpha a S v^2}{2Q \cos z_R}; \quad M \frac{dv}{dH} = \frac{\alpha(1+K)}{\cos z_R} S \rho v. \qquad (131)$$

Кроме того, он полагал, что испарение частиц с поверхности должно вызвать реактивное усилие, добавочное к силе сопротивления воздуха. Оно, однако, оказалось несущественным.

В 1952 г. О. В. Добровольский (Сталинабад) вычислил энергию ударной волны при неупругом соударении $E_1 \leqslant \frac{3}{4} S v^3 \rho$ и энергию взрыва при мгновенном испарении некоторой массы тела $E_2 \leqslant \frac{v^2}{4Q}$ ($Q = 10^{11}$ *эрг/г* есть энергия испарения 1 *г*). Оказалось [622], что при малых v E_2 мала, при $v = 10$ *км/сек* она заметна, а при 60—70 *км/сек* превосходит энергию ударной волны E_1 в сотню раз. Для персеид при $r_m = 1$ *см* взрывная волна через 10^{-4} *сек* после возникновения имеет радиус 0,9 *м*, $v = 4$ *км/сек*, скачок давления в 180 раз и $T = 9000°$ К, как при взрыве тринитротолуола. В связи с тем, что при движении метеорного тела происходит не только потеря скорости, но и массы M, закон изменения количества движения обобщается. Проблемой движения тел с переменной массой еще в конце XIX в. занимались К. Э. Циолковский и И. В. Мещерский [643, 644]. В связи с развитием реактивных самолетов, снарядов и ракет механика движения тел переменной массы получила значительное развитие в теоретической части в СССР трудами А. А. Космодемьянского [642], Ф. Р. Гантмахера, И. П. Гинзбурга [639]; в 1953 г. к движению метеоров ее применил Л. А. Катасев [640]. Правильность решения зависит от точности знания закона убывания массы. При составлении уравнений движения необходимо использовать законы сохранения количества движения и момента количества движения; чтобы эта система уравнений была замкнутой, надо присоединить к ней закон изменения массы и закон изменения положения центра массы относительно центра формы.

§ 263. Современное состояние вопроса. Мы видели, что в вопросе теории движения метеора сначала учитывались только механические соударения, затем процессы адиабатные, далее динамические, затем трение, сжимаемость воздуха и, наконец, теплопередача. На этом уровне и находятся современные теории. В будущем следует учесть расход энергии на диссоциацию, ионизацию, возбуждение, найти физический смысл числовых параметров, полученных опытом.

Напишем закон Ньютона, выражающий силу F сопротивления воздуха для невзаимодействующих между собой частиц сопротивляющейся среды («пылевой атмосферы»):

$$F = Mj = -\frac{1}{2} c_x S \rho v^2. \qquad (132)$$

Здесь M — масса метеорного тела, а его ускорение $j=\frac{dv}{dt}$. Американские авторы, в отличие от европейских, употребляющих коэффициент формы c_x, применяют в баллистике *коэффициент сопротивления* $\Gamma=\frac{c_x}{2}$. Таким образом, имеем для метеора баллистическое уравнение или уравнение торможения

$$M\frac{dv}{dt}=-\Gamma S\rho v^2. \qquad (132')$$

Оно является первым уравнением теории Хоппе 1937 г. [674]. Масса воздуха, «сминаемая» метеорным телом с сечением миделя S за 1 *сек* при скорости v, заключена в цилиндре объемом Sv и при плотности ρ равна $S\rho v$. Энергия движения этой массы найдется умножением ее на $\frac{v^2}{2}$, а так как эта энергия получается за 1 *сек*, то выражение $\frac{S\rho v^3}{2}$ есть мощность процесса. Из этой мощности на разрушение метеорного тела тратится часть, обозначаемая *коэффициентом теплопередачи* Λ. Если Q есть энергия разрушения 1 *г* массы тела, то уравнение потери массы будет таким:

$$\frac{dM}{dt}=-\frac{\Lambda}{2Q}S\rho v^3. \qquad (133)$$

Если потеря массы происходит за счет не только испарения, но также за счет механических причин (пульверизация, сдувание, распыление и т. д.),то это отразится на Λ и тогда нельзя называть уравнение (133) уравнением испарения, что иногда делается. Деля почленно уравнения (132) и (133), получаем уравнение потери массы

$$\frac{dM}{M}=\frac{\Lambda}{2\Gamma Q}v\,dv, \qquad (134)$$

считая $\sigma=\frac{\Lambda}{2\Gamma Q}$ не зависимым от v и M, интегрируем (134) и получаем уравнение Фишера 1933 г. [670]:

$$M=M_0e^{-\frac{\sigma}{2}\left(v_0^2-v^2\right)}; \qquad (135)$$

здесь масса M соответствует той точке, где скорость упала до значения v. Считая, что сила света метеора пропорциональна энергии теряемых молекул метеорного тела, причем коэффициент пропорциональности есть $\gamma=\gamma_0 v$ (согласно наблюдениям), получаем уравнение светимости (Хоппе, 1937):

$$4\pi I=-\frac{1}{2}\gamma_0 v^3\frac{dM}{dt}. \qquad (136)$$

Если I есть сила света, то, беря $\frac{dM}{dt}$ из (133), получаем

$$I=\frac{\gamma_0\Lambda}{8\pi Q}S\rho v^6. \qquad (136')$$

В новых работах 1953—1955 гг. Хоппе теоретически ищет коэффициенты пропорциональности уравнений (132) и (133) [675]. По Херлофсону [672] испарение, торможение и убывание радиуса метеорного тела идет согласно кривым, изображенным на рис. 203.

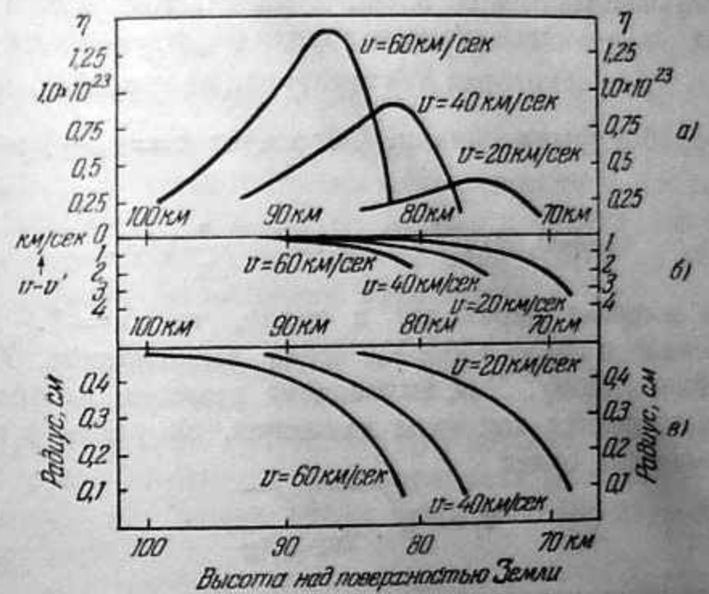


Рис. 203. Испарение (*а*), торможение (*б*), изменение радиуса (*в*) метеорных тел при разных скоростях (по Херлофсону).

В 1950 г. появилась первая работа из серии работ коллектива авторов [667, 668, 685] по физической теории метеоров. Сложность проблемы потребовала участия астрономов, аэродинамиков и физико-химиков. В основном теоретически и лабораторно решалась проблема теплопереноса. Так как потеря энергии $\frac{dE}{dt}$ пропорциональна v^3, то, введя *коэффициент теплопередачи* Λ для количества тепла H_T, получим $H_T=\frac{1}{2}\Lambda\rho Sv^3$ (Уиппл, 1943 г. [279]). Поэтому потеря массы будет тем больше, чем больше H_T и чем меньше энергия Q испарения 1 *г* тела, т. е. $\frac{dM}{dt}=\frac{H_T}{Q}$. Для вычисления температуры T (поскольку опытных данных по атомарной бомбардировке твердых тел на диапазоне космических скоростей нет, а теория чрезмерно громоздка) авторы ищут макроскопическое решение, применяя термодинамику (это все равно, что строить мост, применяя сопротивление материалов, но не пользуясь теорией решетки твердого

тела). Тонкий слой горячего воздуха перед телом, куда испаряющийся атом переходит или откуда теряется конденсирующийся атом, рассматривается, как «зона реакции». Температура в ней находится из уравнения:

$$\frac{\Lambda}{2}\rho v^3 = \frac{KT^2}{\vartheta_S h} e^{-\frac{\varepsilon}{KT}} \left[\varepsilon + \frac{5}{2}KT\right] \left(\frac{\rho_m}{\mu_m m_H}\right)^{\frac{2}{3}}. \qquad (137)$$

Здесь K и h — постоянные Больцмана и Планка, ε — «нулевая» энергия испарения атома при 0° К, ρ_m и μ_m — плотность и молекулярный вес тела, m_H — масса атома водорода ($\mu_m m_H$ — масса атома метеорного тела), ϑ_S — некоторая температура, получаемая, например, из опыта со сверхбыстрыми пулями. Обозначив $\tau = \frac{\varepsilon}{KT}$, в числах получим

$$(1+0{,}4\tau)\tau^{-3}e^{-\tau} = 10^{-3{,}91}\frac{\rho}{\rho_0}v^3\Lambda.$$

Если вся энергия переходит в тепло, то $\Lambda = 1$. Для железа $\varepsilon = 4{,}2$ *эв/атом* и $\vartheta_S = 453°$ К, тогда вычисленное $T = 3370°$ К близко к наблюденному. Для вычисления реакции испарения температура рассматривается как мера движения, скорость в направлении навстречу движения будет

$$v_1 = \sqrt{\frac{KT}{2\pi\mu_m m_H}}$$

и полная сила сопротивления

$$F = -\frac{1}{2}c_x\rho v^2 S\left[1 + \frac{\Lambda}{\frac{1}{2}c_x}\frac{v}{2}\frac{\alpha}{\varepsilon + \frac{5}{2}KT}\right]. \qquad (138)$$

При $T = 3100°$ К численно $F = -\frac{c_x}{2}\rho v^2 S\left(1 + 0{,}016\, v\frac{\Lambda}{\frac{1}{2}c_x}\right)$. При $\Lambda = 1$ и $c_x = 2$ для $v = 60$ *км/сек* второй член равен 1 и сопротивление F удвоится. Но опыты показывают, что $\Lambda \approx 0{,}05$, так что влияние реакции испарения ничтожно. Оксиды и нитриды, образующиеся при проникании атомов O и N в метеорное тело, могут добавить до 4% тепла к энергии движения (при $v = 30$ *км/сек*). Энергия радиации при $T = 2260°$ К равна энергии испарения, а при более высокой T она убывает как $\tau e^{-\tau}$ и ею можно пренебречь.

Далее рассматриваются вопросы теплопереноса. При $v = 1$—2 *км/сек* в тепло переходит 1% энергии движения, но эта доля быстро растет с v^3. Под руководством Зегера [633] в лаборатории астробалистики Морского ведомства США были проведены опыты со скоростными пулями, так как теоретически наиболее трудно ответить на вопрос, как влияет H_T на сопротивление F. Пока еще нет теории радиации метеора с квантовомеханической точки зрения и неизвестен коэффициент аккомодации. Поскольку масса M переменна, то она вводится соотношением $S = M^{\frac{2}{3}}A$, где $A = \frac{1}{\rho_m}\sqrt{\frac{9\pi}{16}}$. Величина $\frac{dM}{dt}$ пропорциональна силе света I и в то же время равна $\frac{\Lambda}{2Q}\rho v^3 S$, таким образом, комбинацию неизвестных $\frac{\Lambda}{c_x Q} = \sigma$ можно найти, зная S и M метеорных тел из наблюдений, или отдельно c_x по торможению и Λ по силе света I. Продувая в аэродинамической трубе тела из твердой углекислоты и измеряя их форму и потерю массы при разных v, можно найти связь H_T с $\frac{dM}{dt}$.

Другой путь — изучать полет пуль и оплавление упавших метеоритов. Приняв $c_x = 1$, мы получим неуверенность в два раза на очень большом диапазоне v (от десятков метров в секунду до космических скоростей) и плотностей ρ. В 1949 г. Яккиа [676] из 36 метеорных фотографий получил 55 значений величины

$$\sigma = \frac{\Lambda}{c_x Q} = \frac{I}{v^3}\left[\sum\frac{I\Delta t}{v^3}\right]^{-1}(vj)^{-1},$$

причем оказалось $\lg\sigma = -11{,}75$ и σ для каждого метеора — постоянным; десять самых медленных метеоров дали $\lg\sigma = -11{,}61$, видимо из-за увеличения Λ. Тогда закон убывания массы в интегральной форме примет вид

$$M = M_0 e^{-\sigma\frac{v_0^2 - v^2}{2}},$$

так что при $v_0 = 12$, 20 и 70 *км/сек* к концу полета сохранится 0,3, 0,03 и $1{,}2\cdot10^{-19}$ от M_0. При $c_x = 1{,}0$, скрытой теплоте плавления железных и каменных метеоритов 10^{10} *эрг/г* и теплоте испарения 10^{11} *эрг/г* оказывается $\Lambda = 0{,}16$, если тело только плавится, и 0,016 — если оно еще и испаряется. Эпик [680] нашел, что металлические тела пульверизуются, едва только происходит плавление, а каменные тела должны испаряться. При испарении $\Lambda = 0{,}05$, если σ брать по Яккиа; сверхбыстрые пули (парафин, сплав Вуда), у которых энергия плавления в 30 раз, а испарения в 200 раз меньше, чем у метеорных тел, соответственно дали Λ меньше в пять раз, т. е. $\Lambda = 0{,}01$. Испарение сплава Вуда с температурой плавления +65°,5 С начиналось при $v = 0{,}8$—$1{,}0$ *км/сек*, поэтому испарение железа будет при $v \geqslant 2{,}7$ *км/сек* (что и подтвердилось другими опытами). Продувание твердой CO_2 дало $\Lambda = 0{,}014$ при $v = 0{,}5$—$0{,}7$ *км/сек*.

Плавление не начинается при скоростях, меньших, чем те, какие нужны для возникновения температуры плавления. Если рассматривать только соударения, то H_T является мерой их неупругости. Пули из

магния вспыхивали при $v = 1{,}26$ *км/сек* в нормальных атмосферных условиях. Если поверхность была не шероховатая, а полированная, то этого не происходило. При нанесении царапины на полированную поверхность на этом месте возникало углубление до 1 *мм*. Если на передней стороне делалось углубление, то оно ускоряло вспыхивание, так как в нем температура была выше, чем на гладкой поверхности. Таким образом, регмаглипты могут быть развитием начальных случайных углублений, вероятно, на железе они получатся при $v > 3{,}1$ *км/сек*. Тот же эффект кавернизации получится на канифоли, сере и воске при меньших скоростях. Цилиндрические пули из сплава Вуда в полете закруглялись по краям на глубину 0,3—1,0 *мм* при $v = 0{,}8$—$1{,}4$ *км/сек*, причем c_x из опыта оказывалось 1,2. Таковы данные, которые должны быть учтены будущей физической теорией метеоров, из которой аэродинамика и баллистика будут вытекать, как частные случаи при неизменной массе.

В 1956 г. появилась обстоятельная монография Б. Ю. Левина, содержащая критический обзор и оригинальное изложение современных физических теорий метеоров [24], лучшая по данному вопросу. Она содержит краткую историю вопроса (с 1913 г.), изложение исходных уравнений Хоппе, их развитие Уипплом, Яккиа и самим автором, в ней рассматривается экранирующее влияние отбрасываемых молекул, процесс нагревания больших и малых метеорных тел (в частности, микрометеоритов Уиппла), затем процессы при интенсивном испарении (торможение и свечение метеорного тела), приводятся по идее Хоппе теоретические высоты точек максимальной силы света, рассматривается влияние массы, скорости и наклона траектории на полет метеорного тела, даются численные значения упоминавшихся выше коэффициентов A, Γ и χ_0 и приводятся оригинальные соображения автора.

ГЛАВА 25

МАССА МЕТЕОРНОГО ТЕЛА

§ 264. Введение. Абсолютное значение массы метеорного тела оказывается ничтожным и разочаровывающим, несмотря на мощность излучения, целиком обязанного скорости движения, а не массе. Даже болид —8 вел. при скорости 20 *км/сек* порождается телом всего в 3 грамма, но с энергией в $6 \cdot 10^{12}$ *эрг*, равной энергии движения снаряда.

Первые попытки определения массы M метеорного тела сделаны столетие назад. Применяя механическую теорию тепла, Глейшер [691] уже в 1864 г. расчетом определил, что масса каждого из 200 персеид 1863 г. не превышала 60 *г*. Полагая, что метеор 2 вел. излучает, как светильный газ, А. Гершель [693] оценил для него $M = 8$ *г*. Сэндс [698] в 1867 г. исходил из наличия твердого тела и для эталона брал свечение известняка в струе светильного газа (друммондов свет), откуда для метеора 1 вел. получил $M = 0{,}06$ *г*, а для метеора 5 вел. 0,004 *г*. В том же году Харкнесс [692] за источник сравнения брал газ, друммондов свет и электродугу и для метеора 1 вел. нашел соответственно 1,4, 0,06 и 0,0045 *г*. Фабри [690] в 1903 г. нашел, что метеор 3 вел. светит с силой 4500 свечей на $r = 150$ *км*. Приняв, что светимость электродуги $R = 20\,000$ *м. св./см*^{2}, Фабри нашел площадь свечения метеора 23 *мм*^{2} и диаметр 5,4 *мм*, а Пиккеринг [697] по окончательным расчетам 7 *мм*, а диаметр оболочки 50—60 *мм*.

Эпик [545] в Ташкенте в 1922 г. для сравнения с персеидами использовал α Персея, считая их излучение идентичным и для $m_z = 2$ вел, при $v = 56$ *км/сек* нашел $M = 0{,}0003$ *г*, но так как метеор имеет не сплошной спектр, а линейчатый, дающий по Эпику лишь $^1/_{40}$ света сплошного спектра, то исправленная $M = 0{,}012$ *г*. Через год Линдеман и Добсон [677] для метеора 1 вел. и $v = 40$ *км/сек* по своей теории определили $M = 6{,}25$ *г*. В 1929 г. Мэрис [695] принимал для метеора 2 вел. $M = 0{,}025$ *г*; в 1930 г. В. В. Федынский [237], учитывая цветовую температуру и яркость, для такого же метеора вычислил $M = 0{,}005$ *г*, а Эпик в 1933 г. [696] по теории атомных столкновений 0,012 *г*.

В 1933 г. Пиккеринг вновь занялся этим вопросом: делая прикидку, какая доля кинетической энергии идет на ионизацию и сравнивая с наблюдениями следов метеоров, он вновь заключил, что для метеора 2 вел. нужна масса в несколько килограммов. Уайли [699] в 1934 г. исходил из сравнения упавших метеоритов с их яркостью при полете и также получил большие M при экстраполировании на метеорный диапазон. В 1937 г. Гофмейстер [41] уподоблял излучение метеора миниатюрному Солнцу и нашел его угловой радиус 0″,003 и линейный радиус 1,36 *мм* при $r = 100$ *км*, что для железного тела дало бы массу $M = 0{,}082$ *г*, а при температуре вдвое меньшей — в 20 раз больше (рис. 204).

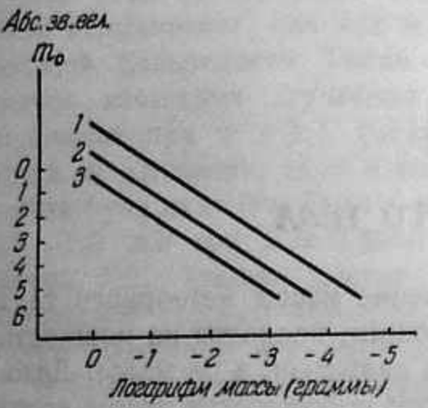


Рис. 204. Абсолютная звездная величина метеоров m_0 в зависимости от массы и закона излучения, соответствующего: *1* — Солнцу, *2* — электрической дуге и *3* — теории столкновения атомов Fe с молекулами N_2, при скорости $v = 56$ *км/сек*. Наблюдения ближе удовлетворяют гипотезе 1.

§ 265. Методы определения масс. Имеется несколько методов, дающих возможность принципиально найти M. Пусть метеор излучает, как известный источник света. Тогда, зная силу света I, можно найти энергию E его излучения, откуда $M = \frac{2E}{\Lambda v^2}$, где Λ — доля E, переходящая в излучение. Можно использовать понятие механического эквивалента света, учесть распределение энергии в спектре и свойства спектральной восприимчивости глаза или фотоэмульсии и т. д. и этим путем, зная скорость метеора, найти M. Здесь, однако не ясен вопрос, какая доля энергии движения переходит в излучение, т. е. каков световой кпд метеора γq. В 1939 г. Н. Н. Ситинская [689] использовала восемь фотографий персеид ($v = \text{const}$), для которых имелись также визуальные оценки их звездных величин, и проинтегрировала кривые изменения яркости по времени, найдя таким образом полное световое излучение $\int E\,dt$, где E — освещенность в люксах; зная расстояние до метеора, она отсюда получила силу света I; задаваясь величиной коэффициента светоотдачи γ из лабораторных данных и полагая, что вся энергия метеора идет в излучение ($q = 1$), она нашла значения масс M для разных звездных величин. В 1938 г. Уиппл [279], использовав уравнение торможения (132) и светимости (136), исключил M и нашел плотность воздуха ρ по скорости, торможению и силе света, найденным из измерения фотографий. Подставив ρ в уравнение торможения, Уиппл нашел массу M в данной точке траектории на высоте H. Тогда начальная доатмосферная масса M_0 может быть найдена из выражения

(в нынешних обозначениях [24]):

$$\left(\frac{M}{M_0}\right)^{1-\mu} = 1 - (1-\mu)\frac{\sigma v_0^2}{M_0}\sec z_R\,[\rho(H) - \rho(H_1)]\,\Gamma H^* S_0, \qquad (139)$$

причем

$$M = -\frac{8\pi I}{\chi \sigma v^3 j}.$$

Здесь H^* есть высота однородной атмосферы («шкала высот»), $\sigma = 1{,}8 \cdot 10^{-12}$, $\chi = 10^{-9{,}07} v$, μ — параметр, зависящий от формы, а абсолютное излучение берется в *эрг/сек* на интервале 450—570 $m\mu$; по Эпику,

$$\lg I = 9{,}84 - 0{,}4\ m_0, \qquad (140)$$

где m_0 — абсолютная визуальная звездная величина метеора (на расстоянии 100 *км*).

Независимо от «баллистического» метода Уиппла можно применять «фотометрический» метод Яккиа [694]. Интегрируя уравнение

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{8\pi I}{\chi v^2}, \qquad (141)$$

полученное из уравнения потери массы и уравнения Фишера, находим уравнение Яккиа

$$M = -8\,\pi \int_t^\tau \frac{I}{\chi v^2}\,dt, \qquad (142)$$

где τ — момент конца полета, а t — момент, когда масса равна M. Начальная масса M_0 получится при $t = 0$. Здесь требуется знать всю характеристическую кривую мгновенной яркости и мгновенные v на протяжении траектории. Ряд значений M_0 Яккиа нашел в 1948—1952 гг. [694].

В связи с тем, что плотность ρ может быть взята из других (например, ракетных) данных, можно подставить выражение поперечной нагрузки

$$\frac{M}{S} = \frac{M^{\frac{1}{3}}\rho_m^{\frac{2}{3}}}{A}; \quad A = \frac{S}{V^{\frac{2}{3}}}, \qquad (143)$$

где V — объем метеорного тела, а ρ_m — его плотность, в уравнение торможения. Тогда «динамическая» масса есть

$$M = \frac{A^3\Gamma^3}{\rho_m^2}\frac{\rho^3 v^6}{j^3}. \qquad (144)$$

По Уипплу (1952 г.) возникает расхождение между фотометрическими и динамическими значениями M, которые он объясняет малой

плотностью $\rho_m \sim 0{,}3$—$1{,}0$ *г/см*^{3}, а Яккиа (1955 г.) дроблением метеорной частицы.

Масса, находимая фотометрически, не зависит от того, раздробилось метеорное тело или нет, тогда как на торможение это влияет очень сильно. Действительная причина расхождения лежит также и в неточности теории (например, в незнании точного значения светового кпд: последний при сильных взрывах достигает $q\gamma = 10$—30%, а не $0{,}1$—1%, как принимается для метеоров; в действительности $q\gamma$ достигает нескольких процентов). По Уипплу (1954 г.) метеор 0 вел. при $v = 31$ *км/сек* имеет массу $M = 0{,}04$ *г*; фотометрическая масса будет $M = 0{,}16$ *г*. Б. Ю. Левин берет [24] $q\gamma = 0{,}1\%$ при $v = 10$ *км/сек* и $0{,}6\%$ при $v = 70$ *км/сек*; тогда вертикальный метеор 0 вел. при $v = 40$ *км/сек* будет иметь $M_0 = 0{,}055$ *г*. Он предположил, что зависимость силы света I метеора от массы, скорости и угла наклона пути может быть представлена формулой вида

$$I = \text{const} \cdot M_0^{\alpha} v_0^{\beta} \cos^{\gamma} z_R. \qquad (145)$$

Использовав 117 фотографических наблюдений метеоров, полученных в Гарвардской обсерватории и на станциях в Нью-Мексико, Б. Ю. Левин заключил, что $\gamma \approx 0$, т. е. наклон траектории роли не играет, а $\alpha = 1$, $\beta \approx 4$, следовательно, I пропорционально не кубу, а примерно 4-й степени скорости. Если принять параметр $\mu = 0{,}4$, а $b = 6{,}5$ *км*, то $\chi_0 = 5 \cdot 10^{-14}$. Метеорное тело с массой $M_0 = 1$ *г* при $v_0 = 10$ *км/сек* даст метеор с максимальной абсолютной звездной величиной $m_0 = +2{,}9$ [694].

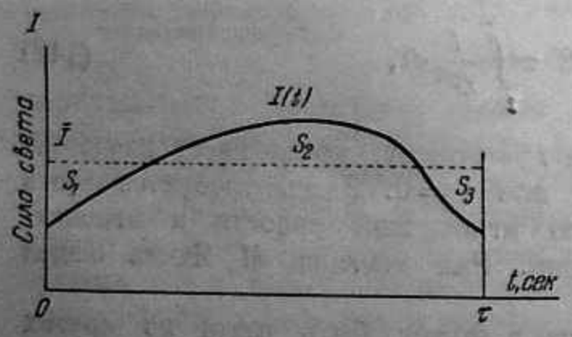


Рис. 205. Получение средней силы света $\bar{I}$ метеора из условия $S_1 + S_3 = S_2$.

Зная, как изменялась яркость во время полета, можно найти интеграл (142) механической квадратурой или пользуясь теоремой о среднем значении интеграла (рис. 205). В последнем случае ищем такую ординату $\bar{I}(t)$ кривой изменения силы света $I = f(t)$, чтобы площадь $\bar{I}(\tau - t)$ была равновелика площади, заключенной между осью t и кривой $f(t)$ между значениями t и τ. Если, кроме того, v мало меняется, то заменяем ее также средним значением $\bar{v}$ и тогда получаем приближенно:

$$M(t) = \frac{8\pi}{\chi_0} \frac{\bar{I}}{\bar{v}^3} (\tau - t), \qquad (146)$$

причем I выражается через абсолютную звездную величину m_0: $\bar{I} = 10^{-0{,}4m_0}$. Если $\bar{v}$ брать в *км/сек*, то численно $\chi_0 \approx 7 \cdot 10^{-2}$.

§ 266. Результаты определений масс. Приведем несколько значений M, найденных по наблюдениям в Ашхабаде в 1950 г.:

Метеор	Яркость, зв. вел.	Скорость, *км/сек*	Масса, *мг*	Метеор	Яркость, зв. вел.	Скорость, *км/сек*	Масса, *мг*
Камелопардид	−3	68	54	Кассиопеид . .	+0,5	46	8,6
Орионид . . .	−3	65	57	R (296° + 56°)	−2	45	56
Вост. персеид	−2	63	21	R (251° + 59°)	−2	29	86
Персеид . . .	−2	61	25	χ-Цигнид . . .	−1	26	79
» . . .	−3	61	69	» . .	−1,5	26	23

При одинаковой яркости более медленные метеоры, как видно, имеют большую массу, нежели быстрые, согласно соотношению $M = 2E/v^2$. Приняв по Уипплу для метеора 0 вел. при $v = 40$ *км/сек* массу $M = 0{,}05$ *г*, найдем массы, соответствующие метеору 1 вел., при разных скоростях:

Скорость v (*км/сек*)	10	20	30	40	50	60
Масса M (*г*)	1,1	0,14	0,043	0,018	0,007	0,005

Так как момент t можно брать для разных точек траектории после максимума, то можно проследить, как убывает масса метеора в полете. Например, по Уипплу [279]:

Метеор	Скорость, *км/сек*	Торможение, *км/сек*^{2}	Высота, *км*	Масса, *г*
1936 X 21	30,6	2,3	82	0,9
	29,8	8,4	77	0,3
1937 XI 5	30,4	1,9	79	10,5
	28,5	7,1	69	3,7
	25,4	14,1	64	1,6
1941 III 23	22,6	2,8	67	12,6
	21,6	5,0	63	8,1
	19,8	10,1	59	2,7
1945 II 6	28,0	1,2	78	11,8
	26,9	3,7	65	8,7
	24,6	9,8	57	4,2

Метеор 25 мая 1943 г. имел наибольшую известную пока массу: 81 *г*. Наименьшие массы в 0,08, 0,10 и 0,09 *г* оказались соответственно у персеид 11 и 12 августа и орионида 22 октября 1945 г. на высотах 89—91 *км*. Впрочем, эти старые определения завышены и приводятся лишь для качественной иллюстрации.

§ 267. Изменение массы в полете, по мнению Фишера, происходит пропорционально потере энергии движения, так что

$$M = M_0 e^{-\frac{K}{2Q}\left(v_0^2 - v^2\right)}.$$

Впервые Хоппе в 1937 г. и Уиппл в 1938 г. вывели это уравнение

из уравнений испарения и торможения метеорного тела. Здесь K есть постоянная формы, а Q — энергия испарения одного грамма метеорного тела. Однако формальное применение этого выражения может дать неверный результат, так как изучение поверхности метеоритов указывает, что, кроме испарения, происходит сдувание и разбрызгивание расплавленного вещества с поверхности метеорного тела. Очень мелкие и медленные метеорные тела («микрометеориты» Уиппла) вообще своей массы не теряют. В 1952 г. Л. А. Катасев [640] использовал выражение

$$\ln\frac{M}{M_0}=\frac{Q}{\bar{a}}\frac{c_x}{K^2v_T^2}\ln\frac{Kv_0v_T+\frac{Qc_x}{\bar{a}}}{Kvv_T+\frac{Qc_x}{\bar{a}}}-\frac{v_0-v}{Kv_T} \qquad (147)$$

для нахождения начальной «доатмосферной» массы метеорного тела. Здесь $c_x=2{,}7$, $K=4/9$ (сфера), $\bar{a}$ — коэффициент аккомодации и v_T — тепловая скорость испаряющихся молекул; для железа $Q=8\cdot10^{10}$ *эрг/г*, $\bar{a}=0{,}75$, $v_T=1{,}3$ *км/сек*, для силикатов соответственно $10{,}4\cdot10^{10}$, 1,00 и 1,4. Применив к данным наблюдений этот расчет, Л. А. Катасев находит начальные значения массы, скорости и радиуса, причем $v_0=v\left(1-j/v_0^2\cos z_R\right)$ по Уипплу (1938 г.):

Метеор	Скорость, *км/сек*		Торможение, *км/сек²*	Абс. зв. вел.	Масса (*г*)			Радиус (*см*)	
	v_0	v	j	m_0	M	M_0'	M_0''	r_0'	r_0''
1940 VI 5	34,2	32,0	—4,4	—5,2	1,6	2,5	2,4	0,46	0,58
VI 9	27,9	27,2	—0,3	—8,2	3,2	3,5	3,5	0,46	0,66
VII 25	26,4	25,6	—1,7	—2,6	0,3	0,4	0,4	0,24	0,32

Здесь M_0 и r_0 даны со штрихами соответственно для железного и силикатного метеорного тела, но видно, что они мало различаются. Кроме того, второй и третий метеоры, несмотря на различие по яркости более, чем в сто раз, по размерам отличаются лишь вдвое. Если скорости будут разниться в два раза, то радиусы только в 1,4 раза.

Для более мелких частиц (если этот расчет для них пригоден) получим такие значения относительной массы:

Зв. вел. метеора	—6	—4	—2	0	+2	+4	+6
Среднее $\bar{\tau}$ (*сек*)	3,92	1,98	1,20	0,72	0,44	0,26	0,18
Относит. масса M	1110	110	10,5	1	0,07	0,002	$4\cdot10^{-5}$

Следовательно, для ярких метеоров масса изменяется на 1 зв. вел. втрое, а для обычных — в 4—7 раз; для более слабых закон изменения неизвестен, но масса тела, давшего телеметеор, должна измеряться микрограммами.

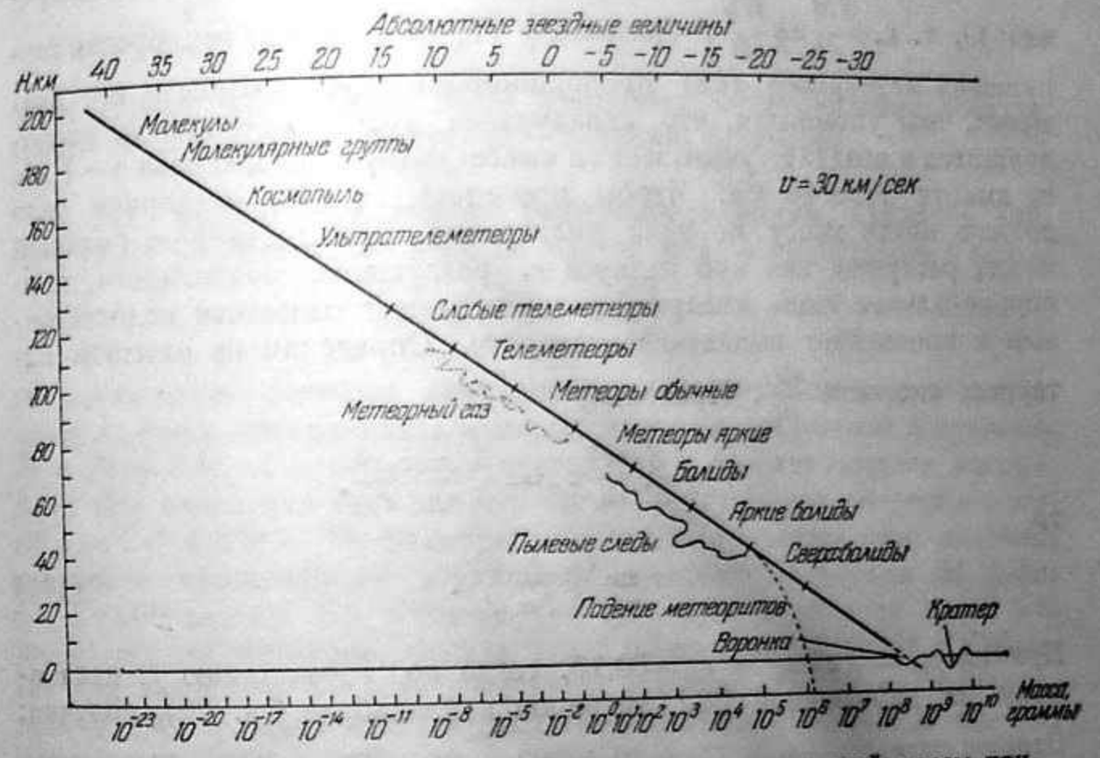


Рис. 206. Высоты области задержки метеорных тел разной массы при $v=30$ *км/сек*.

Закон изменения массы метеорного тела с высотой в зависимости от угла наклона, скорости и параметра формы дан был выше (см. (139)). Высота области задержки тел различной массы показана на рис. 206.

§ 268. Масса метеорной материи. Если бы нам были известны закономерности между I и M для большого диапазона звездных величин, то можно было бы найти массу метеора данной абсолютной звездной величины m_0, а зная число метеоров для каждой звездной величины из функции яркости, определить общий привнос массы метеорами. Пока может быть сделана только грубая оценка. Пусть число метеоров изменяется вдвое на одну звездную величину. Тогда, ограничиваясь только обычными и яркими метеорами, не касаясь метеоритов и микрометеоритов, приняв для метеора 0 вел. массу 0,1 *г* и часовое число таких метеоров для всей Земли равным $N_h=3{,}2\cdot10^3$, получим, что на диапазоне от 0 до +6 вел. привнос материи метеорами составляет около 0,8 *кг/час* или порядка 7 тонн в год; все видимые телеметеоры дают на три порядка меньше, а болиды, возможно, на столько же больше, если для них закон изменения массы с яркостью остается таким же. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в гл. 35.

§ 269. Изменение радиуса метеорного тела в полете. Из теории полета метеора (гл. 24) следует, что скорость потери массы пропорциональна притоку H_T тепла, деленному на энергию испарения Q, т. е. $\frac{dM}{dt}=\frac{H_T}{Q}$. Поскольку $H_T=\frac{1}{2}\Lambda\rho v^3 S$, то скорость разрушения метеорного тела пропорциональна кубу скорости его движения. Мы упоминали, что складывание кусков метеоритов, расколовшихся в воздухе, указывает на ежесекундную потерю слоя 4—7 *мм* на высоте $H\approx 40$ *км*. Чтобы пролететь 10 *сек*, метеорное тело должно иметь массу порядка килограмма. При достаточно большой массе, растущей как куб радиуса r, разрушение поверхности, пропорциональное лишь квадрату радиуса, может оказаться недостаточным и произойдет выпадение метеорита. Определим на опытном материале скорость $\frac{dr}{dt}$. Поскольку

$$j=\frac{S}{M}\frac{\rho v^2}{2}c_x=\frac{3}{8}\frac{\rho}{\rho_m}\frac{c_x v^2}{r},$$

то

$$r=\frac{c_x}{8}\frac{\rho}{\rho_m}\frac{v^2}{j}. \qquad (148)$$

Примем $\rho_m=3$ *г/см*^{3} и $c_x=0{,}15$, тогда по торможению j, найденному из наблюдений 692 метеоров в Ашхабаде (гл. 22), получим:

Отрезок пути . .	0	17	20	22	24	27	30	34	*км*
Высота H	90	80	78	76	75	74	72	70	*км*
Плотность $\rho\cdot 10^9$.	4,9	28	38	50	60	69	78	110	*г/см*^{3}
Торможение j . .	0,0	−4,0	−6,6	−16	−30	−46	−61	$-\infty$	*км/сек*^{2}
Радиус r_m	—	0,14	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	*см*

Отсюда скорость уменьшения радиуса $\frac{dr}{dt}=-1{,}4$ *мм/сек*. На меньших высотах она больше. Из опытов Томаса и Уиппла с быстро движущимися телами оказывается, что передача тепла идет пропорционально плотности ρ воздуха (а не $\sqrt{\rho}$, как давала теория); при $v=1{,}6$ *км/сек* на нагревание идет лишь 1% энергии движения, при метеорных скоростях — уже около 10%, причем максимальная температура при этом доходит до 2800° K.

Изменение радиуса сферического метеорного тела согласно [24] происходит по формуле

$$r=r_0-\sigma v_0^2\frac{\Gamma H^*}{4\rho_m}[\rho(H)-\rho(H_1)]\sec z_R. \qquad (149)$$

§ 270. Уравнение движения метеорного тела при изменении его массы будет обобщением обычных уравнений механики. Теоретически эта задача о динамике точки переменной массы решена И. В. Мещерским еще в конце XIX в.; для случая движения ракеты в наше время общее решение дано И. П. Гинзбургом [639] в векторной форме. Если v_T есть скорость теплового движения испаряющихся молекул, то уравнение движения метеора напишется так:

$$M\frac{d^2L}{dt^2}=-\frac{1}{2}c_x S\rho v^2+Mg\cos z_R-\frac{dM}{dt}(v-v_T). \qquad (150)$$

Здесь первый член правой части учитывает сопротивление воздуха, второй — силу тяжести и третий — реакцию испарения.

§ 271. Масса метеоров по радиоопределениям. Согласно Кайзеру [301] распределение масс M частиц можно представить в форме

$$dN_M^{M+dM}=A\frac{dM}{M^s}, \qquad (151)$$

где левая часть означает секундное число метеоров, проходящих через единицу поверхности, и массы которых заключены в пределах M и $M+dM$, A — некоторая постоянная и s — «показатель массы». Если при изменении на 1 зв. вел. число метеоров изменяется в $\varkappa$ раз, то $s=1+2{,}5\lg\varkappa$. Из радионаблюдений оказывается, что линейная плотность концентрации электронов α пропорциональна M (пока $\alpha<2\cdot 10^{12}$ *эл/см*). По Кайзеру $s\sim 1{,}5$—$2{,}5$, в среднем $s=2$ для спорадических метеоров, откуда $\varkappa=2{,}5$, но Бюллаф (1954 г.) находит для диапазона 4—7 вел. меньшее значение. Например, Квадрантиды в 1953 г. дали $\varkappa=1{,}9\pm 0{,}1$, Геминиды в 1951—1952 гг. 1,8, Персеиды в 1952 г. 1,7 и т. д. Кроме того, на протяжении активности Геминид $\varkappa$ плавно менялось. Что же касается масс M, то Ловелл и др. еще в 1946—1947 гг. нашли, что число метеоров данной массы обратно пропорционально величине самой массы, которая получается, таким образом, в относительных единицах.

§ 272. Общее количество энергии метеоров. В конечном счете более 95% энергии движения метеоров передается атмосфере (остальное — метеорному телу). Попытаемся сопоставить ее с энергией, поступающей от других источников, частично пользуясь данными Герзона (1954 г.) и др. авторов; результат относится ко всей атмосфере:

Источник	Мощность в 10^{17} *эрг/сек*	Источник	Мощность в 10^{17} *эрг/сек*
Солнечная энергия . .	$5{,}9\cdot 10^6$	Космические лучи . . .	1,6
Полная Луна	106	Солнечные корпускулы	2,5
Радиоактивная энергия	2800	Излучение звезд . . .	0,7
Энергия молний	160	Флуоресценция верхних слоев атмосферы . .	0,7
Энергия полярных сияний	~ 50	Зодиакальный свет . .	0,7
Энергия приливов (атмосферных)	54	Галактическая составляющая	0,1
Энергия метеоров . . .	~ 18	Внегалактическая составляющая	0,1
Радиоизлучение Солнца	$\gtrsim 4$	Неизвестные источники	0,7
» Галактики	$\gtrsim 2$		

Для энергии Солнца и Луны принята во внимание и та часть, которая поглощается в атмосфере; радиоизлучение подсчитано для волн $\lambda > 3$ *см*, для метеоров при скорости 43 *км/сек* привнос массы взят $2 \cdot 10^5$ *г/сек*. Таким образом, энергия микрометеоритов, в основном длинноволновая и потому оптически незаметная, но по мощности превосходит многие другие источники и до сих пор недооценивалась. Около 30 лет назад ставился и был решен в отрицательном смысле вопрос, не могут ли метеоры быть источником космических лучей и свечения ночного неба.

Значительный интерес представляет распределение, т. е. энергетический спектр комплекса метеорных частиц. Он изучен мало, но некоторые материалы дают исследования на искусственных спутниках Земли, снабженных специальными приборами.

Например, число частиц диаметром 4 μ и более, по американским данным, составляет около $4 м^{-2}$ *сек*$^{-1}$. Советские приборы регистрируют более мелкие частицы (до 1 μ), которых оказывается 90 $м^{-2}$ *сек*$^{-1}$. При плотности $\rho_m = 1$ это дает для всей Земли привнос метеорной материи 10^5 *г/сек*, в хорошем соответствии с данными, приведенными выше, и вместе с тем показывает незначительность роли метеоров ярче 9 вел. в этом процессе. Впрочем, многие мелкие частицы могут быть продуктом разрушения более крупных, тем более, что выше 200 *км* число их убывает.

ГЛАВА 26

МЕТЕОРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ

§ 273. Введение. Имеется несколько доказательств тому, что при полете метеор создает ионы. Это явление называется *метеорной ионизацией*. Эти доказательства следующие:

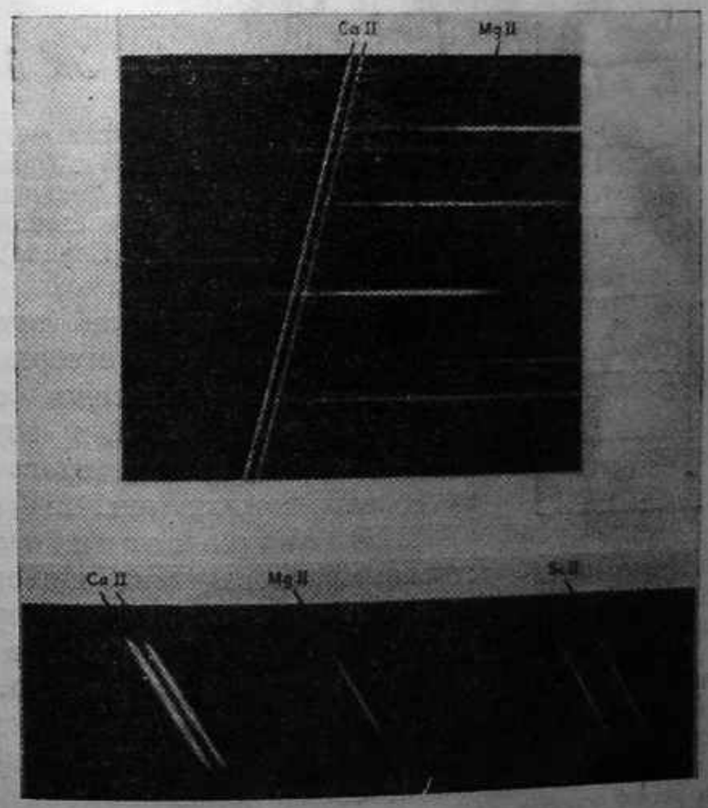


Рис. 207. Прямое доказательство метеорной ионизации; линии CaII, MgII и SiII в спектрах метеоров 11 мая 1904 г. и 10 августа 1940 г. (по Миллману).

1) Оптические: а) возникновение метеорных следов, б) наличие ионизованных атомов в спектрах метеоров (рис. 207), в) «метеорная корона» быстрых белых метеоров, г) усиление свечения полярного

сияния на месте полета метеора и д) общее фосфоресцирующее свечение ночного неба после больших метеорных дождей.

2) Радиометеорные: а) Отражение радиоволн от головы метеора, б) отражение радиоволн от метеорного следа (рис. 208),

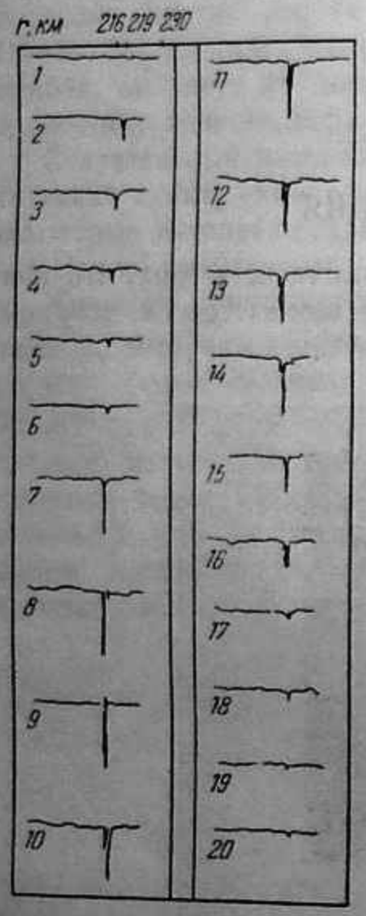


Рис. 208. Изменения интенсивности отражения от метеорного следа на экране катодного осциллографа (кадры киносъемки с интервалом 1 *сек*). След появился на расстоянии $r = 216$—219 *км*; на 6-й секунде интенсивность резко увеличивается, на 19-й почти исчезает (английские наблюдения).

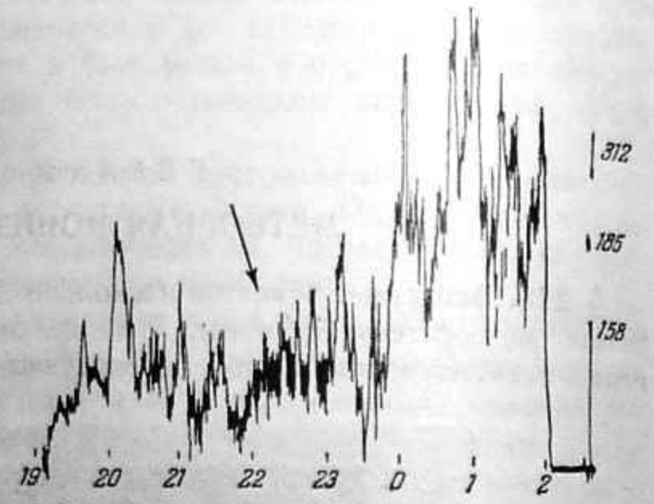


Рис. 209. Увеличение числа федингов между 22—23 час. 9 октября 1933 г. (время II пояса), совпавшее с максимумом Драконид (регистрограмма силы поля приема станции Давентри, полученная в Слуцке).

в) замирание радиоволн при массовом появлении метеоров (метеорные фединги (рис. 209)), г) вспышки слышимости радиопередач (рис. 84), д) возникновение спорадического ионизованного E-слоя при метеорных дождях (рис. 210, *а*).

3) Электромагнитные: а) собственное радиоизлучение метеоров, б) макровариации геомагнитного поля при полете болидов и микровариации при полете обычных метеоров, в) метеороэлектрические явления, также возникающие при образовании и движении зарядов.

Метеорная ионизация может быть *индивидуальной* (голубые следы метеоров, обычные метеорные следы ярких и быстрых метеоров, радиоэхо от метеоров и их следов), и *массовой* (образование спорадического E-слоя, непрохождение радиоволн одной длины и улучшение проходимости на других длинах, фосфоресценция неба от массы слившихся индивидуальных следов (1202, 1799, 1832, 1833, 1838, 1866 гг.)). Медленные и слабые метеоры (кроме низких телескопических)

создают ионизацию, оптически неразличаемую, но регистрируемую метеорными радиометодами.

Газовые следы метеоров специально рассматриваются в гл. 27, данные по излучению линий ионизованных элементов рассмотрены

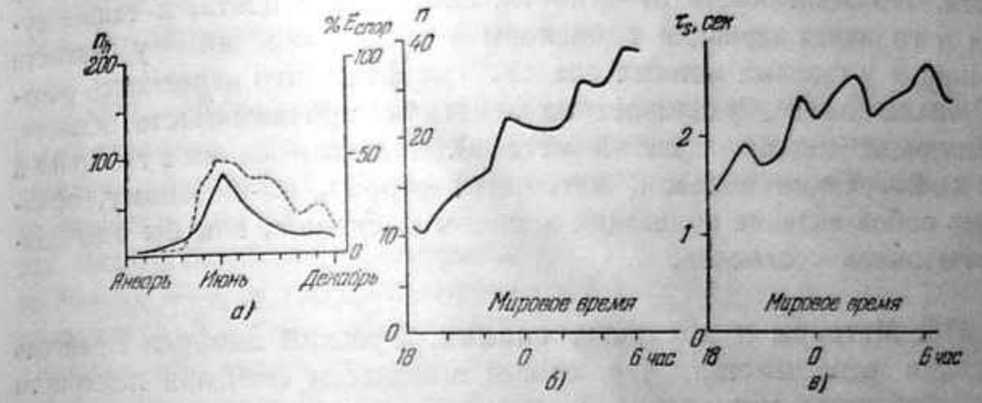


Рис. 210. *а* — часовое число n_h радиоэхо от метеоров (левая шкала, сплошная линия) и частота появления спорадического E-слоя (правая шкала, пунктир); *б* — ход числа отражений ночью; *в* — ход длительности отражений в течение ночи по [703].

в гл. 17, электромагнитные наблюдения в гл. 28. Остальные явления рассмотрим здесь.

§ 274. «Метеорная корона». В числе физических характеристик метеора по программе-максимум отмечается степень резкости его очертаний (очерченность o). С этой точки зрения метеоры распадаются на два класса: а) резко очерченные: желтые и красноватые, небыстрые, иногда с заметными поперечниками, и б) быстрые белые, с точечным ядром и более или менее плотным туманным сиянием. Наши наблюдения за январь — май 1944 г., свободные от влияния больших потоков, показывают, что повышение скорости влечет снижение o, особенно начиная с метеоров 0 вел. и ярче. Вообще по 959 метеорам 1943 г., также отмеченным в Ашхабаде, половина очерчена отлично, четверть — хорошо, прочие — средне, совсем туманных 2,5%. Замечательна зависимость от скорости:

Балл скорости l_ω . . .	1	2	3	4	5	6	7	Метеоров
% метеоров с $o = 5$.	60	59	55	51	50	43	42	466

Очерченность имеет годичную и суточную вариации: зимой o выше на 0,3—0,5 балла, чем летом, и настолько же выше утром по сравнению с вечером. Таким образом, годичная и суточная вариации имеют одинаковую амплитуду и, видимо, связаны с температурой в атмосфере. Если взять только плохо очерченные метеоры, то минимум их падает на декабрь, максимум — на июнь — июль, для резко очерченных картина обратная. Этот вывод получен Л. И. Головковой по 7889 метеорам

ашхабадского ряда. Телескопические наблюдения по обработке В. Е. Штепана 1940 г. показывают, что метеоры ярче 6 вел. хуже очерчены, чем более слабые, в среднем для трех разных наблюдателей на 0,3 балла. Сопоставляя эти данные с ходом метеорной ионизации, находим, что зависимость от яркости, скорости и цвета, а также суточная и годичная вариации одинаковы у обоих явлений — у резкости очертаний и у газовых ионных следов. Тот факт, что нерезкость очертаний видна глазом, указывает на заметную протяженность области, охватывающей метеор (десятки метров). Назовем ее «*метеорной короной*». Таким образом, метеорная корона, по-видимому, представляет собой явление ионизации в малом масштабе, как бы в начальном зачаточном состоянии.

§ 275. Метеоры и полярные сияния. Русский адмирал Врангель в прошлом веке заметил, что «когда в области свечения полярного сияния появляется метеор, то в том месте, где он прошел, тотчас зажигаются столбы света... Мною часто наблюдалось, что метеоры принимали участие в возбуждении свечения этих столбов». Описывая северные сияния Гренландии, Гинге говорил, что их появления были чаще во время полета метеоров. Риттер искал даже более глубокую связь обоих явлений, а в 1830 г. в Англии Фаркьюэрсон считал, будто метеоры движутся из области полярных сияний параллельно их лучам (!). Однако имеется ряд наблюдений, свидетельствующих, что полярное сияние чаще возникает там, где пролетел метеор. Приведем, например, данные Куратова в Никольском районе Вологодской области: 17 февраля 1929 г. пролетел большой болид и «в течение нескольких часов в этой же области было видно северное сияние». После некоторых мощных полярных сияний на 10—15 *мин.* остаются бледные «ионные облака», описанные Стермером как «остатки драпри». Они похожи на стойкие ионные следы метеоров. Метеорная фосфоресценция неба представляет собой как бы разлитое полярное сияние, наблюдаемое во время мощных метеорных дождей. Уже в Тверской летописи под 6711 г. (1202 г. н. э.) описано, как во время дождя Леонид «потече небо все и бысть чрвлено, на земли же, и по хоромам, и на снегу видети яко кровь пролияну, и мнози с небесе звезды отторгахуся». По описанию Гумбольдта во время дождя метеоров того же потока 12 ноября 1799 г. масса метеорных следов к концу явления слилась вместе и все небо пришло в состояние свечения. В следующее появление этого потока учитель Дмитрюков в Судже, Курской губ., 1 (13) ноября 1832 г. в 5 час. утра после метеорного дождя отметил свечение неба «как будто со всех сторон начинало рассветать»; нижняя часть неба кругом по горизонту была «как бы подпоясана бледным беловатым облаком, с более или менее яркими, багряными, подобно загоревшейся заре или зареву от пожара, местами» [702]. В 1833 г. и 1838 г. явление это также повторилось, его отметили, например, в Англии, как и в 1866 г. (Чаллис).

§ 276. Возникновение спорадического E_s-слоя впервые отмечено во время метеорного дождя Драконид 10 октября 1946 г. ионосферными станциями СССР и Англии. На этом основании Эпплтон и Нэсмит [703] вообще стали считать, что этот слой вызывается метеорами. Но поскольку этот слой чаще возникает летом и в дневное время, то в его образовании очень велика роль Солнца.

§ 277. «Вспышки слышимости» радиопередач. Еще в 1928 г. было замечено, что на ультракоротких волнах (например, $\lambda = 7{,}5$ *м*) передача на дальних линиях связи иногда на короткое время внезапно улучшалась (рис. 84). В 1933 г. эти «вспышки» были обнаружены на волнах 3—8 *м* трансокеанской радиосвязи. В 1938 г. Пирс [725] приписал это метеорам, увеличивающим плотность N ионной концентрации на пути радиоволны. В 1942—1944 гг. это явление специально обследовала особая комиссия федеральной связи США на волнах 3,2—7,1 *м*. В период Персеид и Леонид «вспышки слышимости» возникали при пролете метеоров. Суточный ход вспышек соответствовал суточной вариации оптических метеоров (рис. 211). При уменьшении λ с 6,8 до 4,2 *м* длительность и частота вспышек убывали, при прохождении волны над E-слоем их не было вовсе.

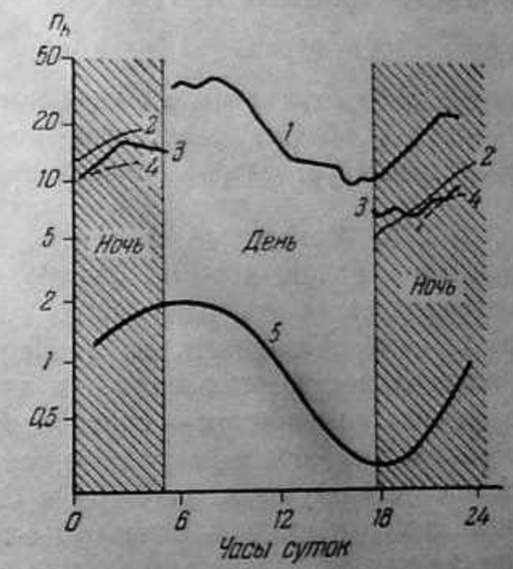


Рис. 211. Суточная вариация часовых чисел вспышек радиослышимости (*1*) соответствует вариации часовых чисел метеоров по Шмидту (*2*), Кувье-Гравье (*3*) и Гофмейстеру (*4*) и теоретической кривой (*5*), вычисленной для параболических скоростей (по Аллену, 1943 г.).

В 1947 и 1948 гг. в Ашхабаде проводились радиоакустические наблюдения передачи Москвы в период действия Персеид. В одном случае, например, двукратное усиление яркости одного метеора на пути радиолуча сопровождалось синхронно увеличением громкости приема. Теперь это явление используется на практике в некоторых случаях радиосвязи на далекие расстояния, так как при этом на пути радиоволны число метеоров оказывается достаточным для передачи речи. Особенно отчетливо это явление проявилось во время максимума Драконид 10 октября 1946 г. И. С. Астапович [282] сообщал о существовании двукратного радиоэхо от метеоров, благодаря чему можно наблюдать очень далекие метеоры, используя обратные отражения, так как длительность отражения при наклонном падении в $\sec^2\varphi$ раз больше, чем при нормальном (здесь φ есть угол между

падающим и отраженным лучом). Во время радиометеорного дождя Геминид 13/14 декабря 1953 г. число таких «метеоров—двукратников» на частоте 9—11 *Мгц* составляло до 10—12 за 10—15 *сек*. Хартсфилд [713] в 1955 г. обнаружил также отражения от очень далеких метеорных следов на частоте 13,7 *Мгц*. С 1951—1952 гг. в Стэнфордском университете производятся [730] исследования радиосвязи на частотах 14,3 *Мгц*. При передатчике мощностью 0,5 *квт* на расстоянии 15 *км* связь держалась только 7,5% всего времени, тогда как на расстоянии 475 *км*—27% времени. Ее можно поддерживать еще дольше на расстоянии до 1200 *км* даже тогда, когда прекращаются на той же частоте обычные отражения от E- и F-слоев [730]. По Мак-Кинли [314] общая длительность отражений равна $0{,}2\lambda^{3{,}3}$ *сек/час*, если λ брать в метрах при нормальном отражении, а общая мощность их $P \sim \lambda^{6{,}3}$ $(2{,}8 < \lambda < 9{,}2)$. Ныне эта область радиосвязи получает значительное развитие, так как гарантирует направленность передачи.

§ 278. Метеорные фединги. Вызывая местное увеличение концентрации ионов, метеоры создают как бы ионные облака, влияющие на распространение радиоволн; длинные и короткие волны будут по-разному реагировать на такие неоднородности, в одних случаях рассеивающие энергию волны, в других случаях поглощающие, а при вспышках слышимости — способствующие прохождению волн за счет перехода на более выгодную траекторию. При приеме станций Кенигсвустерхаузен и Давентри в Слуцке впервые 10 октября 1933 г. были инструментально отмечены электрометром колебания силы поля приема как на длинных волнах (около 1500 *м*), так и на более коротких (радиостанция Стокгольм). В 1934 г. И. С. Астапович [163] определил, что для обычного метеора мощность ионизации выражается, вероятно, сотнями ватт на основании наблюдений 16 и 17 ноября 1933 г. потока Леонид, организованных им в Сталинабаде при содействии радиста Н. Алликальта на волнах около 1000 *м*. Были отмечены своеобразные атмосферики, правильно истолкованные как собственное радиоизлучение метеоров. Из наблюдений автора 5—11 августа 1934 г. в Ленинграде совместно с А. Ю. Маноцковым выяснилось, что обычные персеиды на средних и длинных волнах производят лишь незначительную индивидуальную ионизацию, не превосходящую уровня индустриальных помех. Если рассматривать метеор как радиопомеху, то влияние массовой метеорной ионизации на распространение длинных волн будет сказываться слабее, чем в случае коротких.

На возможность индивидуального эффекта метеорной ионизации Пикар [724] указывал еще в 1921 г.; в 1926—1930 гг. он отмечал силу поля приема радиостанции WBBM во время действия больших потоков; в дни максимума, особенно Персеид, она убывала на несколько процентов. То же оказалось на длинных волнах (станция Науэн).

Пикар ошибочно считал, что влияние потока может сказываться в течение 25 дней после его прохождения. Иокояма [716] наблюдал Леониды 1928 г. и 1929 г., Квадрантиды и Персеиды 1929 г., производя подсчет щелчков и тресков при радиоприеме. В 1928 г. Леониды дали звуки скрежета и писка длительностью до 1 *мин*, что, видимо, было вызвано деионизацией следа; у Квадрантид это явление имело максимум в 3 часа утра 3 января 1929 г. Персеиды повышали число щелчков немного против нормы, но длительность звуков доходила до 3 *мин*. Руководивший этой работой Нагаока [723] сам произвел статистику трансокеанской радиосвязи за три года. Он нашел, что в период Лирид, Акварид, Драконид, Персеид, Леонид и Андромедид происходит ослабление силы приема, редко — мгновенные усиления. Он указал, что за сутки $20 \cdot 10^6$ обычных и $400 \cdot 10^6$ телескопических метеоров имеют суммарную длину пути, в 55 000 раз превосходящую длину экватора. Мешающее действие метеора он видел (как и Ценнек в 1933 г.) в образуемых им пылинках, диаметром 0,01—1 μ, вбирающих якобы ионы. В 1928 г. Хейског отметил быстро исчезающие флуктуации E-слоя, что в 1932 г. Скеллетт и Эпплтон [728] приписали метеорам, подтвердив тем работу Н. А. Иванова [284] 1931 г. Шефер и Гудолл [727] параллельно визуально и по радио наблюдали Персеиды 11—12 августа 1931 г. и Леониды 15—17 ноября 1931 г. на $\lambda = 47$—187 *м*; Скеллетт [729] отсюда заключил, что метеоры создают добавочную ионизацию E-слоя. Ионное облако метеора нарушает состояние E-слоя, снижает временно его высоту, что ухудшает передачу на волнах 50—190 *м*. Вспомним, что теоретически еще в 1926 г. Спарроу и в 1929 г. Мэрис указали на достаточность скорости метеора, чтобы произвести ионизацию воздуха. В 1933 г. М. А. Бонч-Бруевич показал, что максимальная мощность метеорной ионизации составляет лишь около 3% солнечной. Нагаока считал, что по сравнению с другими источниками метеорные потоки имеют много меньшее влияние на ионизацию атмосферы. На коротких волнах метеорная ионизация Персеид усиливала радиослышимость, как нашли Бэли и Томсон [704] по статистике связи 1929—1933 гг. Минохарис и Ито в 1933 г. нашли, что массовая метеорная ионизация увеличивает кратность радиоэха. В 1934 г. Скеллетт [729] вновь отметил аномалии в E-слое в период Леонид. В Индии Митра, Сиам и Гозе [722] с 1934 г. применили субкритические частоты, так что легкое увеличение ионной плотности N, вызванное метеором, уже давало отражение радиоволны. Из наблюдений 13—14 ноября 1933 г. оказалось, что метеорное $N = 3{,}3 \cdot 10^5$ *см*$^{-3}$ вдвое превысило норму. С 12 по 16 ноября 1936 г. Бхар [705] в Калькутте ежечасно измерял N слоев E и F; оно имело усиление 14 и 15 ноября в 2—3 часа ночи на $H = 100$ и 150 *км* и не менялось на 210 и 260 *км*. В 1948 г. метеорные фединги исследовались в Ашхабаде на разных λ в период Персеид. Индивидуальный эффект (собственное радиоизлучение метеора) оказался преимущественно на средних волнах, а массовый, незаметный на $\lambda \geqslant 1000$ *м*, дал, например,

9 августа замирания на $\lambda = 250$ *м* и особенно сильные на $\lambda = 19$ *м*. Действие метеорной ионизации в разное время суток и года различно на разные волны.

§ 279. Коэффициент рекомбинации χ, как известно, входит в уравнение рекомбинации ионов

$$\frac{dN}{dt} = -\chi N^2.$$

Для нормальной ионосферы в E-слое он порядка 10^{-8} *см*^{3}/*сек*. Из радионаблюдений Скеллетта χ оказался $0{,}2 \cdot 10^{-8}$. В момент, когда радиоволна с частотой $f_{кр}$ перестает отражаться от метеорного следа, его N становится равным плотности зарядов окружающей ионосферы; последняя может быть найдена из известного соотношения

$$N = \frac{\pi m_e}{e^2} f_{кр}^2 = 1{,}24 \cdot 10^{-8} f_{кр}^2 \ см^{-3}.$$

Здесь m_e и e — масса и заряд электрона. Наблюдая на двух разных волнах длительность видимости отражения радиоволны от метеора, можно определить N_1 и N_2 в моменты t_1 и t_2, когда эти отражения прекращаются. Тогда χ находится из соотношения

$$\chi = \frac{N_1 - N_2}{N_1 N_2 \Delta t}; \quad \Delta t = t_2 - t_1. \qquad (152)$$

В ноябре 1940 г. Пирс в Квинстауне (Южная Африка) фотографически зарегистрировал отражения от нескольких метеоров. Максимум интенсивности отражений был не сразу после полета метеора, а 10—30 *сек* спустя, когда в силу диффузии площадь следа делалась большой, а концентрация еще недостаточно падала. Один метеор +2 вел. на частоте 3,0 *Мгц* исчез на 30 *сек* позже, чем на 6,4 *Мгц*; так как $N_1 = 5{,}1 \cdot 10^5$, $N_2 = 1{,}1 \cdot 10^5$, то оказалось, что $\chi = 2 \cdot 10^{-7}$. Для более яркого метеора —1 вел. $\chi = 2 \cdot 10^{-8}$, т. е. в ослаблении концентрации помимо рекомбинации играет роль диффузия — расширение следа, которое меньше при более длительном свечении следа яркого метеора. При таком χ на $H = 100$ *км* метеорный след может наблюдаться несколько минут, так как за 100 *сек* N уменьшается в 10^2 раз. Скорость диффузии около 4—11 *м/сек*, поэтому объем следа увеличится более, чем в 10^2 раз, следовательно, диффузия влияет на концентрацию N сильнее, чем рекомбинация.

В *отражении радиоволн* основную роль играют *электроны*, а не *ионы*, так как соударения с последними менее упруги и поэтому эффективное поперечное сечение их в 10^9 меньше; запасая энергию, ионы затем ее «высвечивают» при возвращении электронов на нормальные уровни, так что в *оптическом свечении* метеорных следов, напротив, главная роль принадлежит *ионам*. Так как в следе χ во много раз отличается от χ ионосферы, то приходится считать, что здесь рекомбинация затруднена, видимо, из-за того, что ионы удалены метеором от электронов; последние образуют цилиндр небольшого диаметра, порядка нескольких дециметров, как показывают радионаблюдения, в то время как диаметр ионного следа, судя по визуальным (в том числе по телескопическим) наблюдениям, в первый момент после образования имеет диаметр в десятки метров (рис. 212). Виллард и др. [730] подтверждают, что основной причиной уменьшения числа электронов является не столько рекомбинация с ионами, сколько диффузия электронов, из-за чего электронный цилиндр следа быстро расширяется, пока его ширина не станет сравнимой с длиной радиоволны.

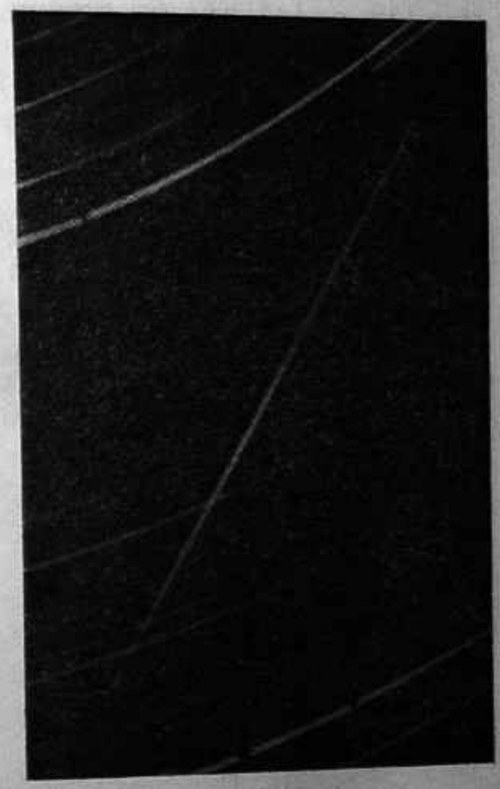


Рис. 212. Ионный след, охватывающий путь метеора, имеет ширину до 3 *км* (орионид 24 октября 1949 г., фото экспедиции МОВАГО в Ашхабаде).

Электронное облако, созданное метеорной ионизацией, помимо обратного рассеяния, позволяющего наблюдать радиоэхо, создает также прямое рассеяние, способствующее в иных случаях распространению радиоволны.

§ 280. «Вспышки» метеорной ионизации, вызванные полетом отдельных метеоров, на экранах радиолокаторов замечались с 1932 г. при ионосферных и иных наблюдениях. Они происходили в E-слое, были мимолетными, длительностью обычно менее 1 *сек*, но в иных случаях до 1 *мин* и более. За год до того Скеллетт [728] подсчитал, что тело в 1 *г* при $v = 40$ *км/сек* за $\tau = 0{,}5$ *сек* в состоянии коротковолновым излучением ионизовать до $N = 10^6$ *см*$^{-3}$ цилиндр воздуха длиной 20 *км* и диаметром 0,5 *км*. Хотя здесь ошибочно принято, что вся энергия движения перейдет в ионизацию, эта работа обратила внимание наблюдателей на «вспышки» ионизации, приписанные в 1937 г. Эккерслеем [708] метеорам. Особое внимание они стали обращать на себя с 1939 г. на волнах $\lambda \approx 20$ *м* английских башенных локаторов. В 1940 г. из наблюдений 1936 г. было найдено,

что максимум этих вспышек виден на волне $\lambda = 40$ *м*, а их высот — на $H = 140$ *км* (при $\lambda = 17 - 44$ *м*). Пиддингтон и Эпплтон [708] в 1937 г. получили незамеченные ими два максимума высот на $H = 112$ и 145 *км*. Со вторым из них совпадают высоты голубых следов и некоторых телеметеоров по тригонометрическим и радионаблюдениям в Ашхабаде в 1947 г. Двумя разнесенными антеннами Эккерслей и Фармер обнаружили, что поляризация радиоволн за 0,25 *сек* может меняться на 15°.

В 1938 г. Пирс [725] доказал расчетом, что метеорный след даст наилучшее отражение при перпендикулярном падении волны; в 1941 г. он показал, что поперечник следа должен быть порядка нескольких λ и что его электроны должны диффундировать радиально. В 1942 г. Харанг (Осло) на $\lambda = 38$—50 *м*, изучая вспышки с $\tau = 0{,}5$—3 *сек*, обнаружил, что отражение происходит от облачка электронов, но не связал его возникновение с метеором и упустил это открытие.

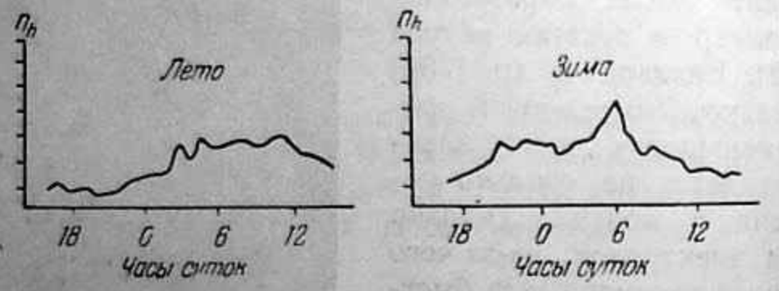


Рис. 213. Суточная вариация числа метеорных радиоэхо летом и зимой (по [703]).

После окончания второй мировой войны аппаратура радиолокационных станций Англии была направлена на изучение вспышек. Например, станция Боудси в течение 19 месяцев работала на $\lambda = 13$ *м*; часовые числа имели максимумы в 4 и 12 час., минимум — после полудня; в течение года эта кривая менялась, но минимум оставался (рис. 213). Годичный максимум падал на осень, минимум на весну; средняя высота оказалась $H = 85$ *км*, а число вспышек в пределах 20—50 *Мгц* обратно пропорциональным частоте. Влияние местных условий находилось сравнением записей станций в Англии и Шотландии; отдельные дни давали сильно отличные результаты. Солнечное затмение 9 июля 1945 г. на появлении метеорных вспышек не сказалось. Эпплтон и Нэсмит [703] работали на $f = 27$ *Мгц* на мощной установке с вертикальным излучением. Ночной ход в течение года не менялся, к утру увеличивалось и число вспышек, и их τ; абсолютное число отражений максимально летом в полдень; полуденные n_h во втором полугодии были выше. Таким образом, дневную метеорную ионизацию контролирует Солнце, определяющее также и летний максимум, и минимум у полуночи. Наилучшие отражения были на $\lambda = 5$—30 *м*.

С 1944 г. Хей и Стьюарт [299, 715] начали работу на $\lambda = 5$ *м*; хотя при этом можно заметить лишь самые яркие метеоры, видимые даже глазом, зато результаты более сравнимы с визуальными и менее зависят от капризов E-слоя. Среднее H, соответственно большей «жесткости» λ, оказалось выше (95 *км*), 90% отражений лежало между 87—108 *км*. Если лепесток излучения на разных станциях направлен в разные стороны, то ход суточной вариации вспышек ионизации будет неодинаковым из-за преобладания метеоров с востока. У отдельных потоков число вспышек резко возрастает тогда, когда высота радианта переходит через 40°, например, при низком его стоянии Квадрантиды и Геминиды давали $n_h = 5$—10, а при высоком $n_h = 40$—60.

По ашхабадским наблюдениям на $\lambda = 4$ *м* оказался следующий ход вспышек в эпоху Персеид 1948 г., совпавший с фотографическим ходом:

1948 Август .	8	9	10	11	12	13
Вспышки n_h .	3,3	5,4	13,0	16,0	21,3	12,5

Кроме того, влияние массовой ионизации на волны 19—25 *м* оказалось наибольшим 11 августа в часы визуального максимума. Высота вспышки мало влияет на продолжительность τ по данным станции Джодрелл Бэнк: у 60% метеоров она была короче 0,25 *сек*, только у 1% более 10 *сек*, но бывают и по 100 *сек*. То же видно и из ашхабадских данных 1947—1948 гг. Число вспышек данной интенсивности обратно пропорционально значению самой интенсивности; Херлофсон [714] отсюда заключил, что общая масса метеорной материи на каждую звездную величину постоянна, что на оптическом диапазоне было отмечено в Москве еще в 1937 г. Более подробные измерения τ показали его зависимость от скорости метеора, увеличение которой дает более интенсивное отражение; на волне 4,2 *м* при уменьшении v от 75 до 25 *км/сек* τ растет с 0,03 до 0,06 *сек*, так как более быстрые метеоры более высоки и там длина пробега иона больше. Визуальные наблюдения метеорной короны это подтверждают.

§ 281. Ионизация в голове метеора. Наблюдения показывают, что «бегущее эхо», вызванное (при $\lambda > 8$ *м*) отражением от головы метеора, тем интенсивнее, чем больше длина волны. Миллман и Мак-Кинли [313] объясняют его ультрафиолетовой ионизацией метеором окружающего воздуха. Они считают, что в голове линейная плотность α электронов должна быть $\gg 10^{12}$; с увеличением расстояния от головы коэффициент отражения от следа увеличивается, что происходит за счет диффузии, расширяющей площадь отражения. Если длительность импульса есть $\Delta\tau$, расстояние до головы — r, а до кратчайшей точки A_0 траектории — r_0, то условие наблюдения

головного эха есть $\frac{1}{2} c\,\Delta\tau < r - r_0$; поскольку при больших α амплитуда отражения растет, как $\sqrt[4]{\alpha}$, то только малая часть метеоров дает головное эхо.

§ 282. Ионизация в следе. При $\lambda < 6-8$ *м* метеорный след отражает «зеркально» от области длиной $\Delta L \approx \sqrt{r_0 \lambda}$ (несколько сотен метров) близ точки A_0. Амплитуда такого отражения пропорциональна $\sqrt{\lambda}$, а длительность отражения в основном определяется остротой направленности антенны; мощность P станции играет здесь малую роль, как это нашел Мак-Кинли [314] в 1953 г., работая одновременно на $P = 200$ и $P = 0{,}1$ *квт* (при этом $\lambda = 9{,}2$ и $9{,}5$ *м*):

Длительность эхо τ_s . . .	0,0—0,25	0,3—0,45	0,5—0,95	1,0—1,9	2,0—3,9	4,0—9,9	10—20
$\lg \tau_{\infty 0}$	−0,14	+0,12	0,30	0,62	0,81	1,13	1,52
$\lg \tau_{0.1}$	−0,85	−0,46	−0,20	+0,17	0,41	0,83	1,15

В 1952 г. Гринхоу [712] в Джодрелл Бэнк ввел в действие установку, автоматически регистрирующую за время τ_s смещение следа, что дало ему возможность быстро определять дрейф метеорных следов. Чем больше τ_s, тем реже такие следы видны, например, по Мак-Кинли за 30 часов работы 4 августа 1948 г. было только 6 следов с $\tau_s > 9$ мин. Для сравнимости τ_s от метеоров, находящихся на разных зенитных расстояниях z, их надо приводить к зениту ($z = 0$), учитывая, что мощность эха слабеет соответственно кубу расстояния. В 1954 г. Маннинг указал, что наличие на следе отдельных сгущений (центров отражения), не всегда заметных оптически, можно использовать даже для определения радиантов. Он же считает, что в следе ионизован в основном не столько воздух, сколько вещество самого метеорного тела. Это верно, поскольку след плотнее всего там, где были вспышки яркости метеора (рис. 214), но нельзя забывать и о ионизующей роли волны Маха.

Наблюдая на экране радиолокатора стойкое эхо, часто можно видеть, что оно как бы «дышит»: его амплитуда то увеличивается, то уменьшается, прежде чем исчезнуть (рис. 208). Эти флуктуации интенсивности происходят от диффузии и оттого, что под действием ветров, разных на разной высоте, метеорный след изгибается и отражения от него могут фокусироваться или, наоборот, рассеиваться. Линейная плотность электронов в следе определяется по выражению Ловелла — Клегга:

$$\alpha = \sqrt{12}\,\pi \frac{m_e c^2}{e^2} \frac{A r^{\frac{3}{2}}}{G} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{P \lambda^3}}\ см^{-1}. \qquad (153)$$

Здесь m_e — масса, а e — заряд электрона, c — скорость света, A — амплитуда эха в единицах уровня шумов, G — коэффициент направленности, а ε_0 — пороговая мощность приемника. Если известен диаметр следа, то можно найти объемную плотность концентрации N. После прекращения действия ионизующего агента, в момент t,

$$N = N_0 e^{-\chi t}. \qquad (154)$$

На высоте $H = 92{,}5$ *км*, где имеется максимум числа появлений эхо, по Кайзеру [301], $N_0 = 7 \cdot 10^{13}$ *см*$^{-3}$, причем $\chi = 5 \cdot 10^{-10}$ *см*^{3}/*сек*, против 10^{-8} в E-слое. У очень стойких следов $\chi = 4{,}5 \cdot 10^{-12}$. Из

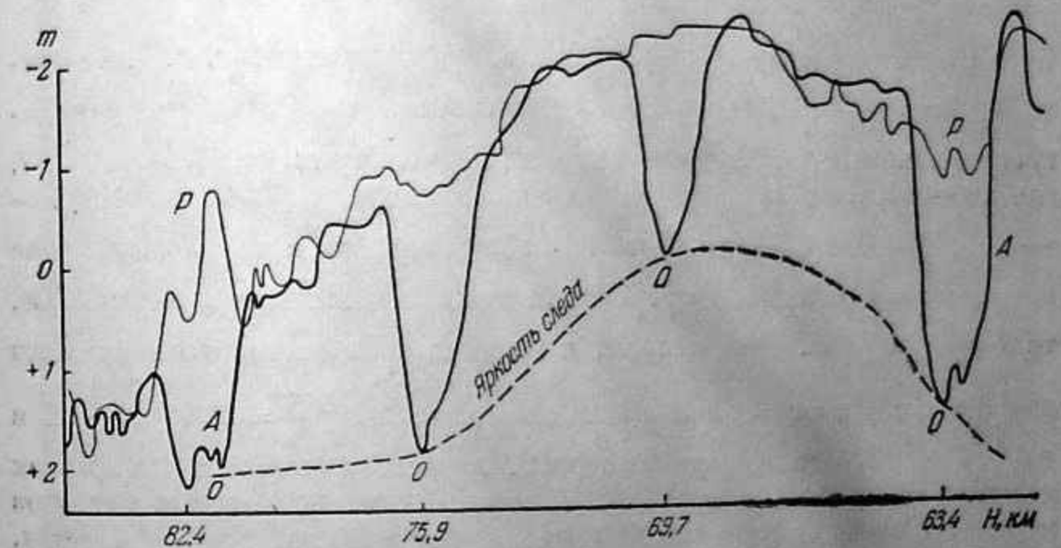


Рис. 214. Сопоставление кривых изменения яркости метеора 19 сентября 1939 г. по двум фотографиям (A и P) Сталинабадской обсерватории. Минимумы кривой A соответствуют перерывам от обтюратора. Яркость следа (0) в перерывах изменяется параллельно яркости метеора (по А. М. Бахареву).

работ Миллмана на $\lambda = 9$ *м* (1947 г.) видно, что α и τ_s пропорциональны яркости метеора, оставившего след. Амплитуда эха неодинакова в случае, если поляризованная радиоволна падает на след параллельно его оси или перпендикулярно. Это явление носит название поляризации следа и изучается двумя взаимно-перпендикулярно поляризованными излучениями. Современная радиоаппаратура позволяет регистрировать эхо с α соответствующей +10 вел. (в 1958 г. — до 15 вел.); часовое число таких и более ярких метеоров равно 1000, что, по Кайзеру, достаточно, чтобы непрерывно поддерживать постоянную ионизацию слоя на $H = 115$—130 *км*, а ниже — создавать спорадические облака, размер которых убывает с высотой. Нэсмит (1955 г.) называет его «метеорный E-слой».

§ 283. Коэффициент диффузии D в следах можно найти из радионаблюдений над скоростью их распада. В уравнении $D = \text{const}\, T^2/p$ Вейсс в Австралии [317] для $\lambda = 11{,}2$ *м* и известного давления p и температуры T, используя τ_s 1000 эхо, нашел численно

$D = 8{,}0 \cdot 10^{8}\tau^{-1}$, хотя здесь влияет турбуленция, геомагнитное поле и др. По Уипплу [731] D на больших высотах настолько велико, что препятствует радионаблюдениям быстрых метеоров.

§ 284. Коэффициент полезного действия ионизации. Мы определили световой к. п. д. метеора, как коэффициент пропорциональности η между силой света I и интенсивностью испарения, т. е.

$$I = \frac{\eta}{2} v^2 \left(\frac{dM}{dt}\right).$$

Будем искать, следуя Эвансу и Холлу, ионизационный к. п. д. в выражении $\alpha = \frac{\beta}{\mu v}\frac{dM}{dt}$, где β есть вероятность, что атом массы μ ионизуется (т. е. даст свободный электрон); поскольку $m_0 = 24{,}6 - 2{,}5 \lg I$, где m_0 — абсолютная звездная величина метеора, то $0{,}4\, m_0 = 10{,}14 - -\lg\left(\frac{\eta\mu}{\beta}\right) - 3 \lg v - \lg \alpha$. Зная из наблюдений m_0 и α в данной точке пути метеора, находим $\eta\mu/\beta$. Если потенциал ионизации есть $\Phi \approx 7$ *эв*, то $I = \Phi\beta \Big/ \frac{1}{2}\mu v^2$. Для персеид и геминид соответственно получается при $\mu = 10^{-22}$ *г*, $v = 60$ и 35 *км/сек* значение $\lg \frac{\eta}{\beta} = 2{,}4$ и $-1{,}5$ и $\eta/I = 7$ и 15. Из других радарных данных β порядка нескольких десятков процентов, а $\eta \approx 1\%$. Следовательно, у быстрых метеоров на ионизацию идет в 25 раз, а у медленных в 30 раз меньше энергии, чем на световое излучение или $0{,}4 \cdot 10^{-4}$ и $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ полной энергии движения метеорного тела; еще в 1934 г. И. С. Астапович оценил мощность метеорной ионизации в сотни ватт [163], что при $M = 0{,}05$ *г*, $v = 60$ *км/сек* и $\tau = 1{,}0$ *сек* дает $3 \cdot 10^{-4}$ полной энергии. В 1946 г. в Ашхабаде был дан правильный расчет для N_0 и α [162].

§ 285. Виды ионизации. Ультрафиолетовая радиация метеора, как уже указывалось, также может ионизовать воздух, в котором летит метеор (рис. 215). Например, Солнце ионизует его радиацией с $\lambda = 80$—90 $m\mu$. Иногда ультрафиолетовая вспышка на его поверхности, с излучением, эквивалентным 30 000° K, внезапно повышает ионизацию в земной атмосфере. Если 10^{-4} часть поверхности Солнца при этом лишь вдесятеро ярче фотосферы, то звездная величина такой вспышки есть $m = m_\odot + 7{,}5 = -19{,}7$ зв. вел. Если распределение энергии у метеора будет такое, как у этой вспышки, то тот же эффект ионизации даст метеор силой света I с расстояния

$$r = 1{,}08 \cdot 10^{-4}\sqrt{I}\ км,$$

например, обычный метеор $I = 10^4$ *м. св.* с расстояния $r = 0{,}01$ *км*, что как раз соответствует размерам метеорного следа.

Полярные сияния возникают при ионизации воздуха ударами корпускул, летящих со скоростями сотен и тысяч километров в секунду, т. е. за счет ударной ионизации, которая, видимо, играет роль в образовании голубых следов и, возможно, — страт обычных следов.

Рис. 215. Орионид 19 октября 1952 г. Ореол (фиолетового цвета) имеет диаметр 3 *км* (фото ААЛ).

Имеется третий вид ионизации — термическая (например, при разряде молнии, эффективная температура которой в среднем 17 000° K). По Мег Над Саха в газе, находящемся в термодинамическом равновесии, всегда присутствует доля ионов, тем бо́льшая, чем температура газа выше. Возможно, что этот вид ионизации имеет место при полете медленных красноватых метеоров. Взаимоотношение этих трех источников метеорной ионизации — ударной, ультрафиолетовой и термической — пока недостаточно выяснено.

ГЛАВА 27

ГАЗОВЫЕ СЛЕДЫ МЕТЕОРОВ

§ 286. Введение. Метеорные следы известны человеку с глубокой древности. Их описания имеются в китайских летописях первого тысячелетия до н. э. Средневековые хроники содержат сотни указаний на следы. Опубликованы описания некоторых болидов с долго видимыми следами (1583, 1676, 1683 гг. и др.). В XVIII в. было сделано немало подробных описаний устойчивых следов, длительностью до часа и более.

Изменение формы следа от действия воздушных течений было описано в 1876 г. А. Гершелем; на это явление обратил внимание еще Гумбольдт 12 ноября 1799 г. Конколи в Венгрии в течение 25 мин. телескопически наблюдал спектр следа болида 13 ноября 1873 г. Далее, в Англии были тригонометрически измерены высоты нескольких следов, причем найдено, что след занимает только часть пути. Но метеорологи мало интересовались следами после того, как восторжествовала астрономическая точка зрения на метеоры, поэтому даже призывы астрономов изучать дрейф следов не находили отклика. Колтон и Перрайн в 1893—1895 гг. наблюдали и описали следы персеид, в следе метеора 29 ноября 1908 г. Кребс наблюдал вихревое движение, подобное описанному при полете метеоритов: Оханского (17(30) августа 1887 г.), Орвинио (31 августа 1872 г.) и Пасамонте (24 марта 1933 г.). Спиральный след описан Аллисоном в 1912 г. и Стивенсом 26 июля 1916 г. П. Л. Драверт (Омск) отметил изменение цвета стойкого следа 17 августа 1919 г., видимого 45 мин. Первое наблюдение следа в телескоп произвел Ольберс 26 сентября 1829 г., затем Ю. Шмидт и др., но призывы производить систематические наблюдения оставались за рубежом безрезультатными; они были начаты только в СССР с 1925—1928 гг. в Николаеве (рис. 216), продолжены в 1933—1938 гг. в Сталинабаде [185, 739] и в 1942—1948 гг. в Ашхабаде. Тогда впервые были получены однородные наблюдения сотен следов. В 1935 г. В. П. Цесевич [743] вновь определил ширину метеорного следа ($d_s = 1' - 3'$). Сводный каталог 1336 следов в 1941 г. напечатал Оливье [749], в него частично вошли наблюдения СССР. Этот каталог исследовался чешскими астрономами [745]. Его третье дополнение 1957 г. содержит 700 следов.

§ 287. Взгляды на природу следов. В донаучный период не казалось удивительным, что после полета «воспламененного тела» метеора остается как бы продукт его горения — след. Поэтому первыми были попытки химического объяснения причины следов (Вейделер и Ростро 1731, Зильбершлаг 1764, Фай 1851, Конколи 1872,

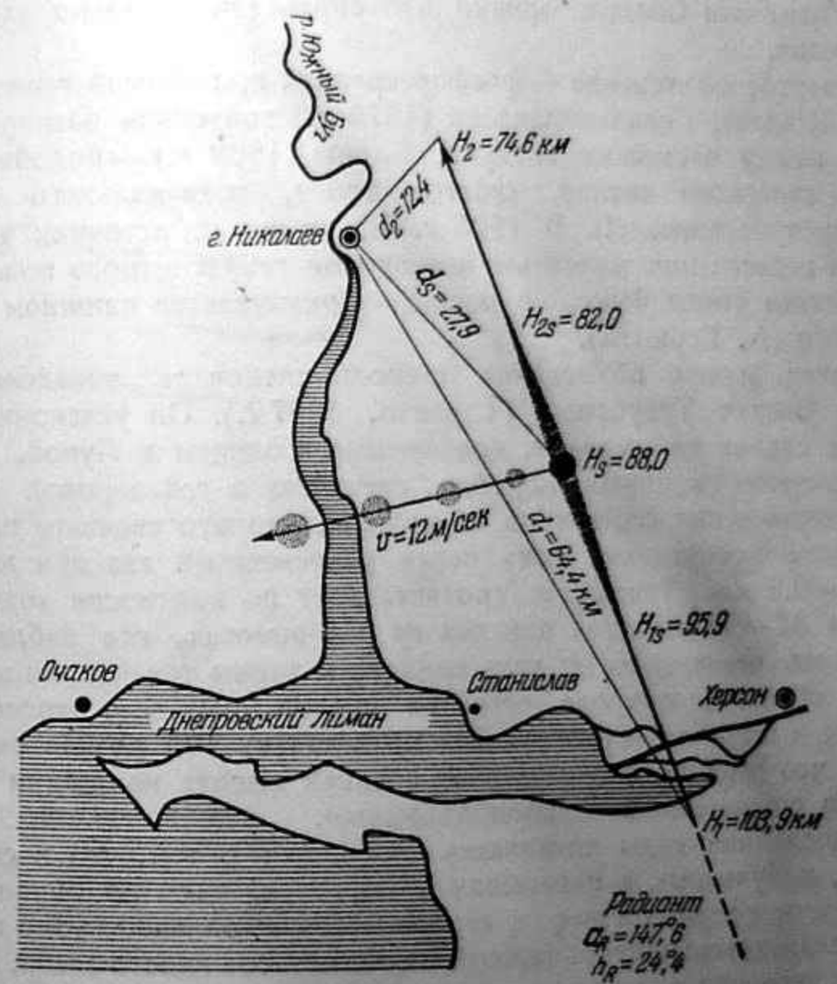


Рис. 216. Траектория болида со следом 19 марта 1925 г., наблюдавшегося в Николаеве.

H_1, H_2 — односторонние высоты начала и конца пути, H_{1S}, H_{2S} — то же для следа, H_S=88 км — высота дрейфующего облачка. Длина пути L=70,2 км, проекция пути L'=63,5 км, длина следа L_S=36,7 км, проекция следа L'_S=33,9 км. Диаметр облачка 230 м, сила света болида $8{,}4 \cdot 10^4$ м.св.

Секки 1872). Мейденбауэр в 1886 г. сравнивал след с белой магнезией, возникающей при горении магния, линию которого тогда видели в спектре.

Второй оказалась «термическая» точка зрения «раскаленного воздуха» (Бьянкони 1863, Вейсс 1868 и другие, вплоть до Деннинга, 1913). Только очень яркие болиды (например, исследованный

Гофмейстером болид 23 июля 1936 г.) дают «нагретые» следы, которые «всплывают» вверх в течение 1—2 минут, после чего изменяют цвет, охлаждаясь, и испускают обычный фосфоресцирующий свет.

Третьего взгляда придерживались Олмстед в 1833 г., Матгиссен в 1871 г. и др., считавшие причиной свечения следа отражение им света Луны или Солнца; однако это справедливо только для пылевых следов.

Четвертое объяснение — фосфоресценция при низкой температуре. Галле, Шарлье, Гильденбрандсон (1875 г.) допускали электрический разряд между частицами воздуха, Корню (1889 г.) — подобие огней Эльма, северного сияния, хвостов комет, зодиакального света и даже протуберанцев (!). В 1905 г. Браун искал источник электризации в пересечении железным метеоритом геомагнитного поля с возникновением токов Фуко, но последнее оказывается слишком слабым для этого (А. Гершель).

Первое верное объяснение природы следов дал канадский профессор физики Траубридж (Торонто, 1907 г.). Он установил [752] деление следов на *пылевые*, освещаемые Солнцем и Луной, и *газовые*, свечение которых подобно свечению в гейслеровой трубке. Путем физических опытов он обнаружил, что это свечение происходит после пропускания тока через разреженный газ при давлении в 0,05—0,2 *мм*. Такой газ соответствует по плотности воздуху на высотах 82—96 *км*, т. е. как раз на тех высотах, где наблюдаются эти следы, независимо от угла наклона и длины траектории метеора. Таким образом, природа свечения следов оказалась атмосферной. Средняя высота метеорного следа по каталогу 175 следов оказалась 87 *км*, что хорошо соответствует средней высоте ионизации метеорами по современным радиоопределениям.

В последние годы появлялись сообщения о том, что в спектрах следов, полученных в перерывах обтюратора, имеются линии свечения не атмосферных газов, а самого метеора; однако трудно сказать, не был ли здесь получен спектр хвоста метеора вместо следа. В оптическом свечении следа должна играть роль рекомбинация ионов.

§ 288. Определения. Туманная полоска, возникающая иногда после полета метеоров, называется *метеорным следом*. В связи с отсутствием за рубежом установившейся терминологии его также там неверно называют хвостом (нем. Schweif, англ. train, франц. trainée и др.), или чертой (англ. strike), что приводит к недоразумениям, так как хвост есть явление, перемещающееся вместе с метеором, а след, как и всякий след, остается на месте, где явление происходило. Пылевые следы мы рассмотрим отдельно (в гл. 29); в отличие от них ионные следы будем называть *газовыми*, другие их названия — *ионизационные*, *самосветящиеся*, *ночные светящиеся*. Следует избегать называть «следом» фотографическое изображение метеора на негативе.

Газовые следы возникают только у достаточно быстрых ($v > 45$—50 *км/сек*) метеоров, видимых недалеко от зенита (где не сказывается атмосферное поглощение), обычно у ярких метеоров. Степень интенсивности его поверхностного свечения назовем *плотностью следа* δ_s (она оценивается в пятибалльной шкале), интервал

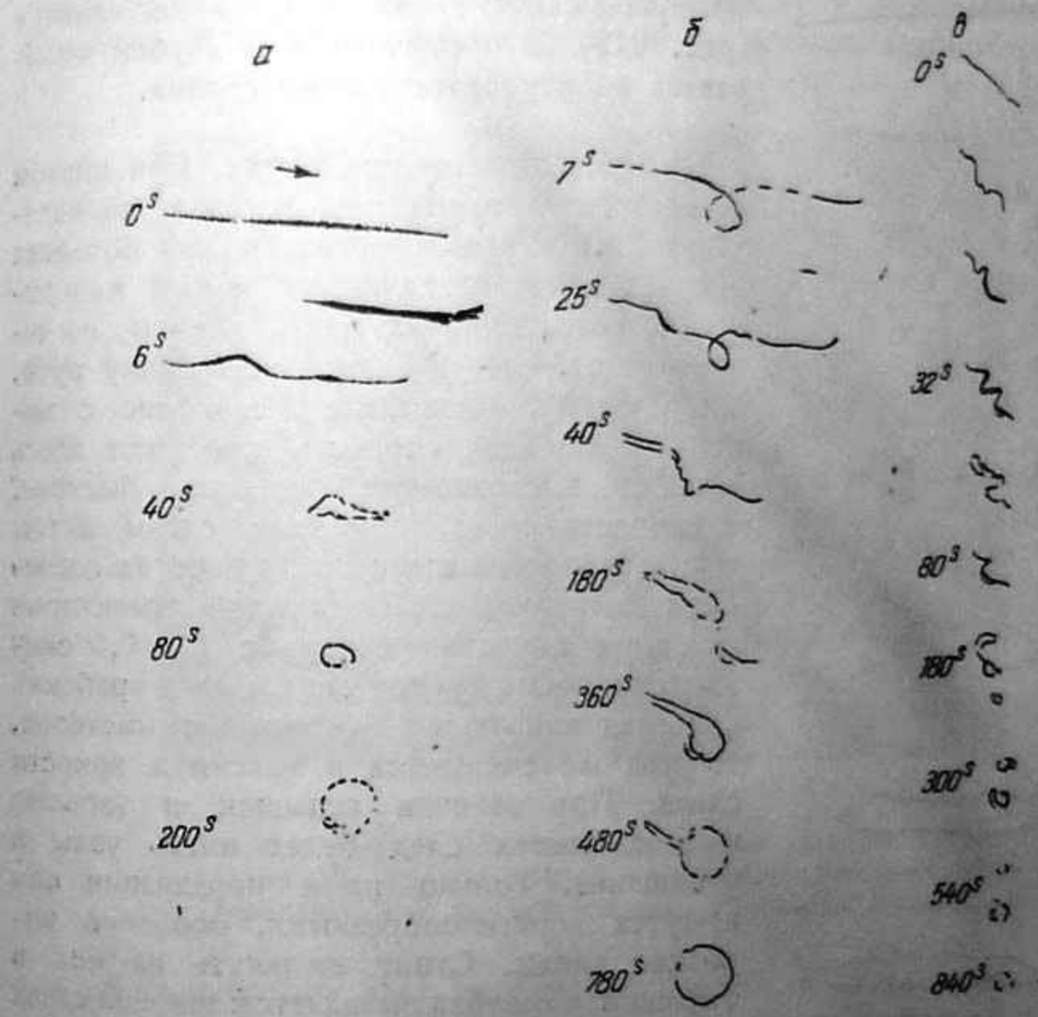


Рис. 217. Изменения формы следа и образование сферических сгустков:

а — метеор —2 вел. 30/XI 1942 г.; *б* — болид —10 вел. 4/I 1943 г.; *в* — болид —9 вел. 12/VIII 1944 г.

видимости от появления до исчезновения — *продолжительностью видимости* τ_s (обычно 1—2 *сек*, у болидов до 100 *сек* и более). В телескоп можно определить угловую ширину d_s следа по сравнению с известными расстояниями широких звездных пар. Из-за диффузии d_s быстро увеличивается, след слабеет, смещается (дрейфует), искажается воздушными течениями, и, наконец, исчезает (рис. 217). Если след виден свыше 1 минуты, то внутри его вдоль оси, где закончилась рекомбинация, появляется темный канал и весь след

напоминает полупрозрачную трубку, полую внутри («трубка Траубриджа»). Затем она деформируется и след стягивается в то место, где он был всего ярче, образуя «сгусток» (рис. 218). Более слабые части следа исчезают и сгусток виден дольше всего, иногда доходя до 1—3° диаметром. Очень редко след виден полчаса и более. Тогда он напоминает плывущее самосветящееся облако или «линзу» (рис. 218). Это стягивание в клубок вызывается электростатическими силами.

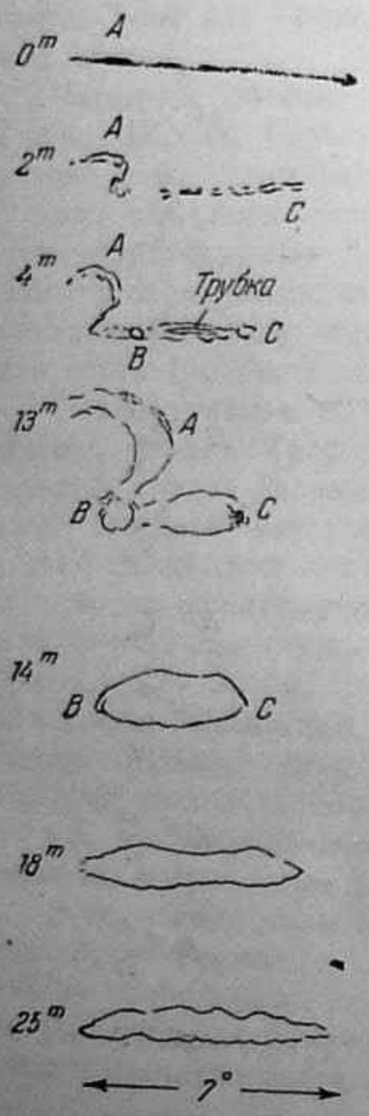


Рис. 218. Изменение формы следа болида 15 сентября 1945 г., — 10 вел. Общее смещение 10°,5 в направлении $a = 150°$.

§ 289. Образование следа. При низком стоянии радианта метеоры проходят по касательной к атмосфере на очень больших высотах почти параллельно земной поверхности, траектории их очень длинны, свечение слабое, след занимает всю длину пути, они бледные, «мохнатые», широкие с малой τ_s, так как скорость диффузии здесь выше и высвечивание проходит быстрее. С самолета и на горах эти следы видны лучше, что указывает на богатство их свечения синими лучами. При крутой траектории максимум яркости метеора с $p = 0{,}5$ смещается к концу пути, а так как след «рабски» копирует кривую изменения яркости метеора, то туда же смещается и максимум яркости следа. При наличии вспышек и взрывов в этих местах след будет иметь узлы и утолщения. Только из-за иррадиации они кажутся веретенообразными, особенно короткие следы. Стоит взглянуть на них в телескоп и ошибка выявляется: ширина следа в первые мгновения везде равномерная. Но уже через несколько секунд след делается как бы зубчатым, искривляется действием больших и малых воздушных течений — дрейфа и турбуленции.

Точка появления следа A_s трудно определима: след появляется без резкой границы, конец его B_s более определенный (до 2—3°). Дугу $A_sB_s = \lambda_s$ назовем *длиной следа*. У крупных метеоров $\lambda_s < \lambda$, и метеор продолжает полет, уже не оставляя следа. Образование следа видно по немногим снимкам и телескопическим наблюдениям: от яркого ядра стремительными струями расходятся перпендикулярно к траектории *страты*, быстро сливающиеся в одну массу — след. Многие наблюдения указывают, что ширина следа равна ширине головы

метеора (около 40 *м*). Поскольку явление происходит выше начала образования воздушной подушки, то ионизация здесь может быть ударной, метеорное тело расталкивает встречные молекулы воздуха почти упруго и как бы является относительно воздуха излучателем скоростных (20—145 *км/сек*) частиц. Электроны в силу меньшей массы быстрее тормозятся и остаются *ближе к траектории*, чем ионы и нейтральные частицы, отбрасываемые к периферии следа. Подобное разделение зарядов приводит к быстрой деионизации близ

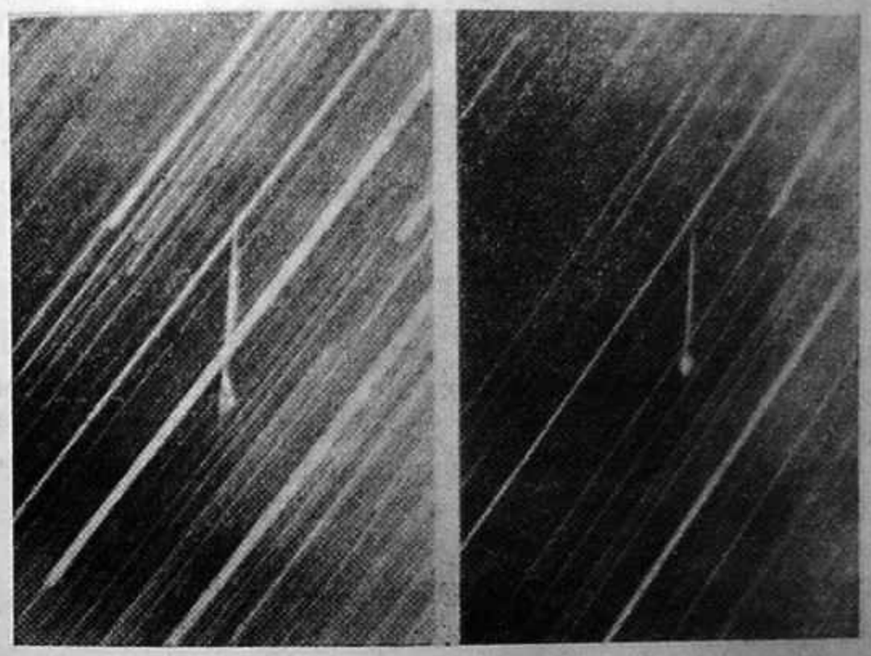


Рис. 219. Первая базисная фотография газового следа метеора 18 октября 1949 г. (Ашхабад — Ванновское). Параллакс 9°,5, высота вспышки со следом 83 *км*.

оси следа и потому дает трубку Траубриджа, а на периферии удлиняет время деионизации; концентрация электронов близ оси следа в цилиндре, более узком, чем весь след (d_s порядка 0,5 *м*), показывает согласие с данными радионаблюдений. Ашхабадские наблюдения (рис. 219) также показывают, что у ярких метеоров следы видны на высотах 70—60 *км* и даже до 52 *км*, где у метеора уже заведомо возникла ударная волна. Таким образом, последняя также должна играть роль в образовании следа. У медленных красных и ярких метеоров, долго летящих и низких, за которыми можно следить в бинокль, часто виден слабый туманный сизоватый след, тянущийся за хвостом и быстро исчезающий; он уже головы метеора и как бы исходит от ядра. Возможно, что это результат термической ионизации наиболее горячей частью метеора. Эта ионизация заведомо не имеет места при вспышках, где след уплотнен, так как по спектральным данным при взрыве температура снижается. Точно так же скорость частиц взрыва

недостаточна для ударной ионизации, поэтому приходится считать, что роль коротковолновой радиации особенно велика в образовании следа.

§ 290. «Голубые следы» метеоров обнаружены при высокогорных наблюдениях в 1948 г. [377], затем вновь наблюдались в 1951 г. Они видны лишь иногда в предутренние часы: появлению метеора предшествует бледный слабо-голубоватый след, длиной несколько градусов, после чего становится видимым обычный метеор. Ширина голубых следов 1—2°, длительность $\tau_s = 1$—2 *сек*, иногда они кажутся лучистыми, как бы со стратами, длиной 2—5 *км*. Высоты их из односторонних определений $H = 160$—120 *км*. Радионаблюдения 1947—1948 гг. в Ашхабаде на $\lambda = 4$ *м*, базисные тригонометрические наблюдения в бинокуляры и литературные данные по ионосфере указывают согласно, что иногда на этих высотах возникают условия, благоприятные для видимости крайне слабых «высоких» метеоров. Но здесь нужны дальнейшие исследования.

§ 291. «Фиолетовый ореол» сопровождает полет очень ярких метеоров (см. рис. 215). Его наличие указывает на значительную роль ультрафиолетовой радиации, по-видимому, заставляющей окружающий воздух в радиусе нескольких километров флуоресцировать (резонансное возбуждение), как и при некоторых взрывах.

§ 292. Размеры и объем следов. Голубой след при диаметре 3,0 *км* и длине 40 *км* занимает огромный объем порядка 280 *км*^{3}. Обычные следы при $d_s = 0{,}04$ *км* и $L_s = 40$ *км* занимают всего несколько сотых *км*^{3}, хотя область, пронизываемая стратами, при длине их 1 *км*, охватывает 125 *км*^{3}. Типичный сгусток с $D = 3$ *км* занимает 14 *км*^{3}. В литературе описан метеор 1876 г. со следом длиной 120° и болид 22 февраля 1909 г. с $\lambda_s = 122°$ (Деннинг).

§ 293. Природа следов. Общие соображения. Возникновение метеорных следов, как и самого явления метеоров, возможно также в атмосферах других планет. Уровень изобарической поверхности, соответствующей на Земле $H = 87$ *км*, на Марсе, например, из-за меньшего градиента силы тяжести, будет на втрое большей высоте, несмотря на меньшее примерно в 12 раз общее давление атмосферы у поверхности.

Из уравнения $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} KT = 1{,}6\,E$, где E — энергия в электронвольтах (1 *эв* $= 1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *эрг* $= 11\,600°$ K), для атома водорода $m = 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ *г* находим $E = 1$ *эв* при $v = 13{,}8$ *км/сек*, для атома N и O соответственно $E = 14$ и 16 *эв*. При упругом ударе скорости частиц воздуха, отбрасываемых метеорным телом при встрече, могут доходить до 145 *км/сек*, что даст энергию, в 100 раз большую, так что одна такая частица принципиально смогла бы ионизовать сотню других частиц воздуха.

Возбуждение и ионизация атомов, как известно, происходит лишь при неупругом соударении, поэтому так невелика доля энергии движения тела, идущая на эти процессы. Быстрые неяркие метеоры имеют след, излучающий за время видимости больше энергии, чем дало видимое свечение, следовательно, на ионизацию может идти энергии больше, чем на видимое излучение. Но в целом метеор как бы недоиспользует свои качественные возможности и предпочитает растрачивать энергию на низкосортную ее форму — теплоту. Визуальные наблюдения над образованием страт, их жемчужно-серебристый цвет, отличный от цвета самого метеора, и след, возникший на месте их пробега, указывают, что отбрасываемые частицы также ионизуют воздух. Процессы взаимодействия заряженных и нейтральных частиц бывают также упругими и неупругими, последние — прямыми (с уменьшением энергии) и обратными (с ее увеличением), причем меняется квантовое состояние — происходит возбуждение и ионизация. На расстояниях, больших длины свободного пробега, образование следа обязано фотоионизации, как, например, в газовых туманностях. Уравнение Эйнштейна для порога фотоионизации $eV_i = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ показывает, что длина волны λ должна быть менее $\frac{1235}{V_i}$ $m\mu$, где V_i — потенциал ионизации в вольтах. Поскольку плотность электронной концентрации в *канале* следа на несколько порядков выше, чем в окружающей ионосфере, являющейся электропроводящей, то канал является как бы гибким проводником, по которому может течь ток. Так как это происходит в электростатическом поле ионосферы и в геомагнитном поле Земли, при наличии ветров и местной турбуленции, то общая картина электрических процессов в следе довольно сложна. Поэтому нужно иметь много точных оптических наблюдений над следами.

§ 294. Яркость следов настолько невелика, что даже сумерки и лунный свет делают их невидимыми. В первые мгновения, однако, при наблюдении в телескоп след представляется блестящей плотной белой полосой, сквозь которую звезды не просвечивают, но уже через несколько секунд *плотность* следа δ_s падает настолько, что след не затмевает даже слабых звездочек. Простым глазом иногда след виден, как раскаленный прут, повисший в воздухе, а после начавшихся искривлений напоминает застывшую молнию. Только в первые мгновения след можно сфотографировать, дальше он ослабевает настолько, что доступен только глазу, биноклю или иному светосильному прибору (телескоп с большим увеличением и малым полем зрения непригоден для изучения следов). Часто следы выходят между отрезками пути метеора в перерывах от обтюратора.

фотографируя через 10 секунд в течение 1,5 минуты, Оливье получил для яркого леонида 16 ноября 1932 г. стягивание его следа в сгусток. С 1952 г. Уиппл в Нью-Мексико получает снимки ярких следов камерами Супершмидт [755].

Быстротечность явления крайне затрудняет фотометрирование следа. Можно попытаться определять интегральную яркость следа в целом, сравнивая его с внефокальными изображениями звезд и получая сначала поверхностную яркость m_B (в зв. вел. с одной *кв. мин.* дуги), а затем умножая на площадь следа. В. Г. Фесенков [742] и Н. Н. Сытинская [738] предлагали специальные фотометры для измерения слабых m_B, Е. Н. Крамер в 1950 г. в Ашхабаде применял поляроид, вмонтированный в бинокль. Интегральная звездная величина m_s плотных следов некоторых болидов может быть -6 и даже -8 величины, так что такой след даже создает некоторое размытое освещение на земле и из-за иррадиации кажется шириной до 10—15′ вместо 1—2′; обычные следы персеид при $\lambda_s = 8^\circ$ имеют m_s порядка -2 вел., «голубые» при такой же λ_s и ширине $d_s = 1^\circ,5$ имеют $m_s = +1$ или $+2$ вел. У слабых леонид след ярче самого метеора иногда на 1—3 вел. Термические следы гораздо слабее: $m_s = +2, +4$ вел.; газовые сгустки могут иметь от $+2$ до $\sim +6$ вел. при исчезновении. Видимая поверхностная яркость у плотных следов нередко доходит до $m_B = +1$ зв. вел. *мин*$^{-2}$, у персеид 0 вел., она на порядок ниже, у метеоров $+6$ вел. по телескопическим данным $m_B = +10$ и даже $+12$ зв. вел. *мин*$^{-2}$, что лежит близко к пределу различимости; у голубых следов $m_B = +12, +13$ зв. вел. *мин*$^{-2}$ лишь втрое выше поверхностной яркости фона ночного неба (в Ашхабаде $m_B \sim +14$ зв. вел. *мин*$^{-2}$). У газовых сгустков $m_B = +10$ зв. вел. *мин*$^{-2}$ и при исчезновении их яркость на 30% превышает яркость фона неба. У термических следов может быть $m_B = +10$ зв. вел. *мин*$^{-2}$. Из-за фотографического накопления света на снимке след может сравняться по плотности с самим метеором. От m_B в указанных единицах легко перейти к другим единицам, например, *стильбам*, пользуясь соотношением $\lg B_s$ (стильбы) $= -0,4\, m_B - 2,60$ или по видимой звездной величине m_s и диаметру d' (в минутах дуги) по выражению

$$\lg B_s = -0,4\, m_s - 2 \lg d' - 2,50. \qquad (155)$$

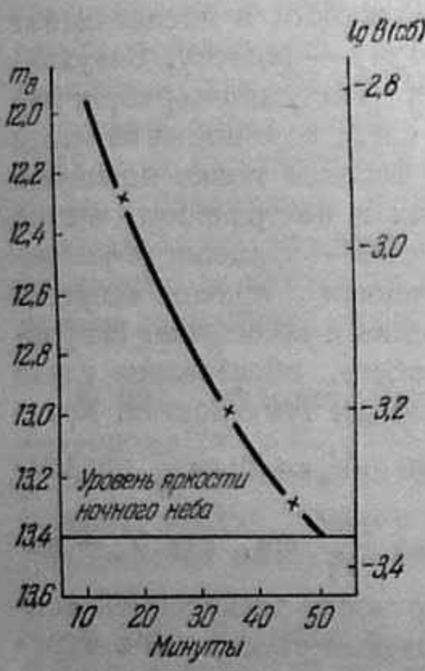


Рис. 220. Изменение яркости B газового следа болида 11 октября 1948 г. (в звездных величинах с квадратной минуты дуги $-m_B$ и в стильбах). Время — в минутах от образования следа (по В. Г. Фесенкову).

Таким образом, метеорные следы имеют B_s от 10^{-3} до 10^{-8} *сб* (рис. 220).

§ 295. Убывание яркости следа зависит от рекомбинации, диффузии и развеивания его ветром, поэтому кривые спада яркости разных следов вида $B_s = B_{0s} e^{-K\tau_s}$ мало схожи и K меняется в пределах от 1,8 до 0,007: в одном случае след $m_s = -3$ вел. в течение $\tau_s = 6$ *сек* исчезает полностью, в другом случае при $m_s = 0$ вел. след виден 150 *сек*. На значительную роль диффузии в ослаблении следа указывает В. Г. Фесенков [742], исследуя след 11 октября 1948 г. в Прибалхашье, видимый в течение $\tau_s = 50$ *мин* (!). О. В. Добровольский [736] ввел понятие о функции высвечивания, как отношения наблюдаемой его яркости к той, какая была бы при наличии только одной диффузии. Для цилиндра убывание средней яркости B_s происходит как D_s^{-3}, для сферы как D_s^{-5}, т. е. в основном падение яркости по О. В. Добровольскому идет за счет диффузии. Коэффициент газокинетической диффузии оказывается много меньше наблюдаемого $\frac{D_s^2}{2}\frac{dD_s}{dt}$, где $\frac{dD_s}{dt}$ — скорость диффузии (расширения следа). В Николаеве в 1928 г. и в Сталинабаде в 1938 г. было замечено, что некоторые следы видны особенно долго; они были названы «стойкими». В Ашхабаде была обнаружена группа «особо стойких» следов (§ 297), например, след болида 15 сентября 1945 г. был виден свыше 31 *мин*. К концу видимости он превратился в линзу диаметром 11 *км* и толщиной 4 *км*, дрейфовавшую горизонтально и мало менявшую яркость (рис. 218). По В. Г. Фесенкову [742] за полчаса высвечивание составляет всего 10%. Как и при радионаблюдениях, причину этого следует приписать малости коэффициента рекомбинации χ, вообще меняющегося в следах в пределах $1 : 10^5$ и, вероятно, являющегося усредненным из χ для нескольких процессов.

§ 296. Продолжительность свечения следа τ_s зависит от многих причин, в том числе особенно от условий видимости. Обычно $\tau_s \approx 2$ *сек*, редко свыше 10 *сек*, в исключительных случаях несколько минут. В Англии 15 февраля 1909 г. след болида, наблюдавшегося 200 очевидцами, продержался 3 часа. Подобные особо стойкие следы не раз вводили в заблуждение наблюдателей: какие-то «метеорные облака» в 1937 г. описал Шпангенберг и в 1938 г. Мохоровичич; иногда их принимали за кометы. В первом приближении τ_s тем больше, чем больше v и I метеора. Для обычных нестойких следов по

389 наблюдениям 1942 и 1944 г. в Ашхабаде имеем следующую зависимость τ_s и плотности δ_s от звездной величины m:

m (зв. вел.)	—3	—2	—1	0	+1	2	3	4	5
τ_s (*сек*)	9	7	6	4	4	3	1,5	<1	0
δ_s (баллы)	5,0	4,2	4,0	4,0	3,7	3,5	3,0	2,5	0,0

Также хорошо видна обратная зависимость по 556 следам 1942—1945 гг.

τ_s (*сек*)	<1	1	2	3	4	5	6	7	⩾8
m (зв. вел.)	2,2	1,8	1,5	0,9	0,4	—0,1	0,0	0,0	0,2

При увеличении яркости на 2 зв. вел. число метеоров уменьшается в четыре раза, а число следов в пределах m от 0 до —6 вел. сохраняется неизменным: это значит, что увеличение яркости влечет возрастание процента следов (рис. 221). Влияние скорости видно из того, что чем

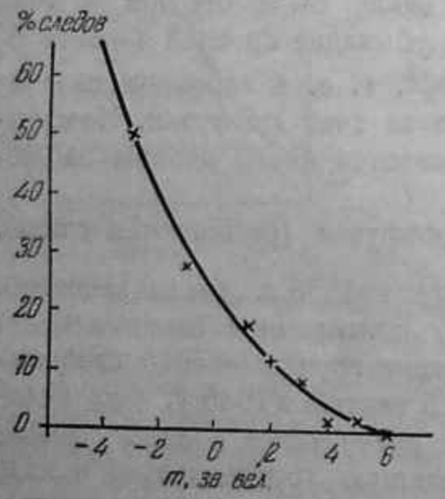


Рис. 221. Процент метеоров со следами в зависимости от их звездной величины m (наблюдения Персеид 1925 г. И. С. Астаповича, Николаев).

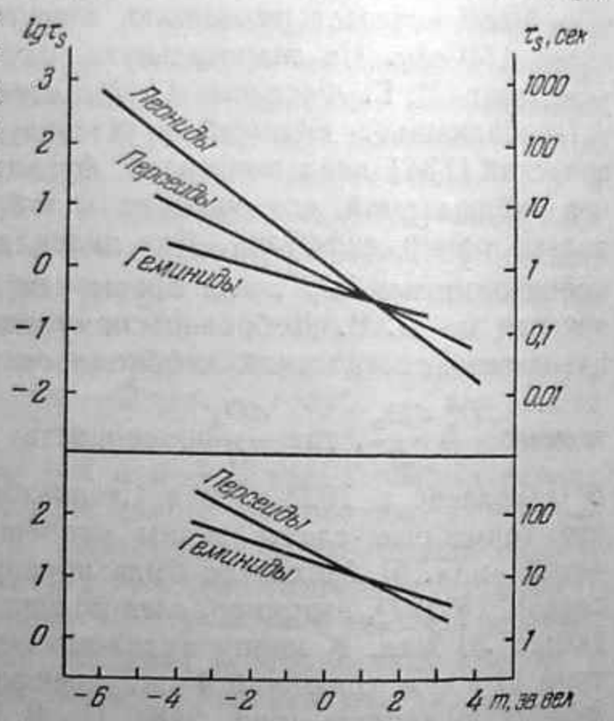


Рис. 222. Длительность свечения метеорных газовых следов в зависимости от яркости и скорости метеоров. Вверху по 3700 визуальным наблюдениям, внизу — по 700 радионаблюдениям на частоте 30 *Мгц* (по Миллману, 1950 г.).

выше v, тем более слабые метеоры способны дать след (рис. 222); по нашим данным оказывается следующее:

Поток	Леониды	Ориониды	Персеиды	Прочие
Ср. скорость (*км/сек*)	72	65	61	45—28
Ср. яркость метеоров со следами, m (зв. вел.)	—1	—2	—3	—4,5

У телескопических метеоров следы встречаются в 2% случаев, тогда как у обычных метеоров в 12%. В 1934 г. И. С. Астапович [163]

нашел эмпирически для персеид $\tau_s = 0{,}1\sqrt{I}$, если I брать в *м · св*, а τ_s в *сек*. То же обнаружил Миллман в 1935 г. Для следов вообще мы находим $\tau_s = 5{,}4 - 2{,}4\,m$, т. е. практически отсутствие следа у метеоров слабее 2,3 вел. Измерениями 1947 г. (радиометоды и базисные наблюдения) в Ашхабаде установлено [155], что обычные нестойкие следы высоки ($H_s \approx 115$—105 *км*); 98,4% следов прекращают свечение ранее 7 *сек*, мода падает на 2 *сек*, остальные 1,6% следов являются стойкими на $H = 83$—87 *км*. По В. В. Федынскому [739]

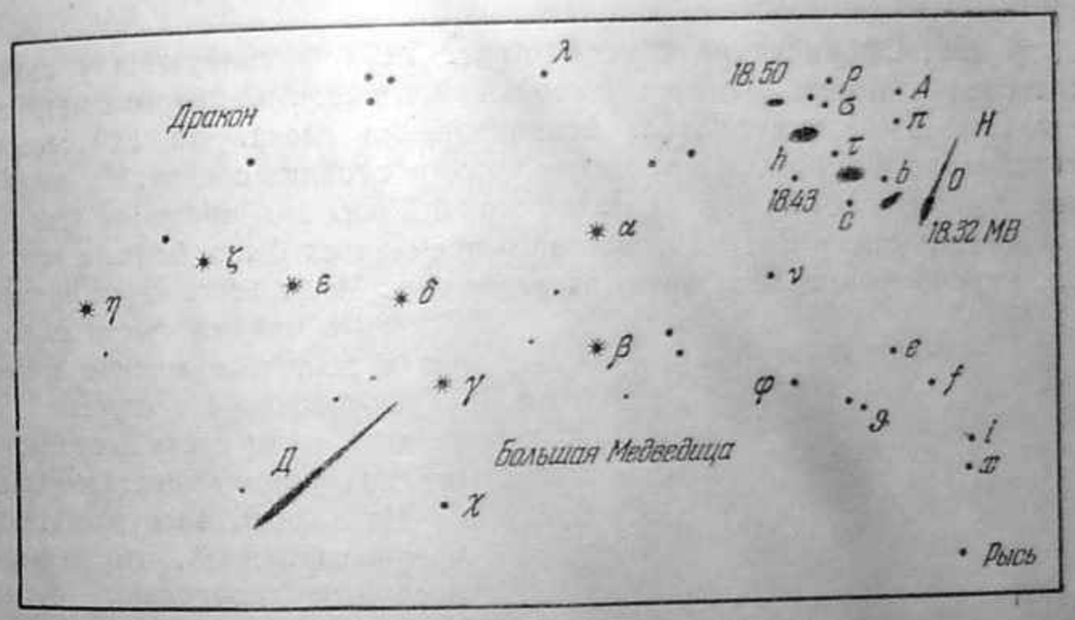


Рис. 223. Базисные наблюдения газового следа болида 20 августа 1925 г. из Долинской (*Д*, С. С. Трикотский) и Николаева (*Н*, И. С. Астапович). Высоты начала и конца следа 98,1 и 78,4 *км*, длина 34,3 *км*, наклон к горизонту 25°,3. В Николаеве отмечен дрейф за 18 минут на 9°, скорость дрейфа 70 *м/сек* к *ЮЮВ*.

ширина следа d_s также зависит от I и изменяется в шесть раз при изменении силы света в 10^2 раз. Он находит, что для возбуждения свечения следа нужна УФ-освещенность от метеора не ниже 2,8 *лк*. Параллакс следа получается довольно хорошо (рис. 223).

§ 297. Стойкие следы. В течение 1077 часов наблюдений в 1942—1945 гг. из 16 676 метеоров оставили следы 2000, из них 93 были видны свыше 10 секунд. В 1946—1948 гг. наблюдалось еще 26 таких следов. Из этих 119 следов 13 как бы образовывали отдельную группу со средней $\tau_s = 9{,}1$ *мин* против 0,6 *мин*. всех 119 следов. Этих особо стойких следов с $\tau > 150$ *сек* всего 0,06%. В среднем на одного наблюдателя обычный след появляется 1 раз за 1,8 часа наблюдений, стойкий — за 11,7 часа и особо стойкий за 105 часов, в периоды действия потоков (Персеиды, Ориониды, Леониды) —

втрое чаще. Стойкие следы по тем же измерениям 1947 г. имеют высоты 90—85 *км*. У них также τ_s пропорциональна m:

Ср. яркость (зв. вел.)	>0	$-1, -2$	$-3, -4$	$-5, -6$	<-7
Ср. τ_s (*сек.*) . .	25	55	40	175	566

Общая сумма видимости всех 119 следов 10 816 *сек*, или свыше трех часов. Радионаблюдения над длительными эхо подтвердили распределение τ_s, полученное из визуальных данных [740, 741].

§ 298. Сферические сгустки (рис. 217) формируются у стойких следов обычно в точках наибольшей яркости или взрыва метеора в течение 1—2 минут после возникновения следа. На 119 следов их оказалось 20, причем в основном у особо стойких следов. Их линейные диаметры были от $D_s = 0{,}2$ до 4,6 *км*. До полуночи они не возникали, между 0 и 1 *час* местного времени их было больше всего, а к утру формирование вновь затруднялось. Чаще всего сгусток возникает в нижней части следа, где и держится дольше всего.

Образование сгустка в верхней части следа идет быстрее, но сгусток «живет» меньше.

Из данных электростатики можно заключить, что деформируемый проводник будет стягиваться в сферу, если он помещен свободно в среду с иной диэлектрической постоянной. Таким образом, для возникновения стойкого сгустка нужно, чтобы взрыв метеора произошел в оптимальной области.

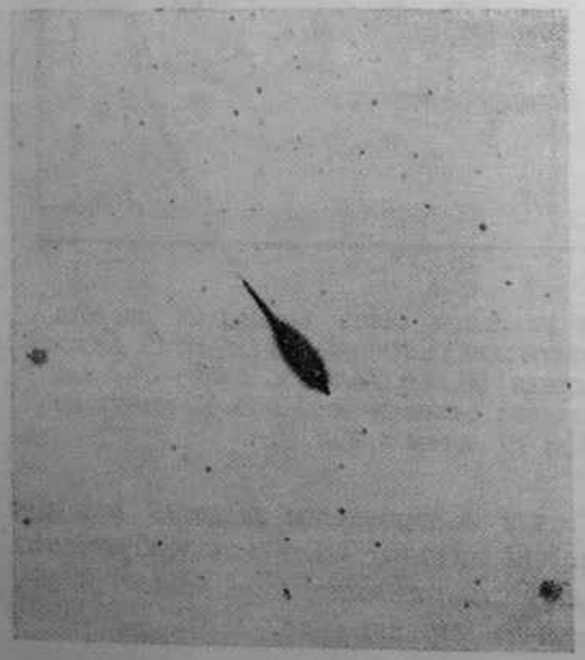


Рис. 224. Фотография метеора 12 августа 1907 г. с газовым следом (С. Н. Блажко, Московская обсерватория). Видны страты, перпендикулярные к траектории.

§ 299. Диффузия следа. В момент возникновения граница следа очень резка и в телескоп фиксируется с точностью до нескольких метров при увеличениях до 20 раз, но уже в первые секунды видно расширение следа со скоростью $\frac{d(D_s)}{dt} = \Delta_s$. Если найти Δ_s для первой и для второй половины свечения, то разницы не будет, т. е. для данного следа на данной высоте Δ_s будет постоянной. В верхней части следа она равна 12, в средней — 9 и в нижней 5,5 *м/сек*; согласно теоретическому выражению $\Delta_s = K\sqrt{T}/\rho$, где ρ — плотность, T — температура воздуха, а K — некоторый коэффициент. Поэтому в верхней части след расширяется быстрее. Скорость Δ_s определяется несколькими причинами, в том числе даже скоростью дрейфа v_d следа, например, при среднем $v_d = 0$, 50, 100 и 150 *м/сек* имеем $\Delta_s = 4$, 6, 8 и 11 *м/сек* соответственно. Всего в восьми случаях из 60 у нас было $\Delta_s > 15$ *м/сек*. По температурным причинам Δ_s максимальна вечером и осенью и минимальна к утру и весной. Сталинабадские наблюдения 1934—1938 гг. по В. В. Федынскому [739] дали среднее $\Delta_s = 7{,}2$ *м/сек*, Траубридж [752, 753] полвека назад нашел 100 *м/мин* по малому числу наблюдений. На обычных фотографиях иррадиация следа, его диффузия и сам метеор неотделимы (рис. 224).

§ 300. Цвет следов в общем a priori должен быть голубоватый, так как при увеличении зенитного расстояния яркость m_s убывает быстрее, чем квадрат расстояния. Из-за атмосферного поглощения след болида 12 сентября 1945 г., пролетевшего над Аравийским побережьем и наблюдавшегося в Ашхабаде за 1220 *км* на высоте $h = 6°$, был желтоватым. Часты оттенки белые, серебристо-белые, жемчужно-белые и бело-голубые. Замечательно, что следы метеоров ярче —3 вел. имеют оранжевую окраску, исчезающую через 15—30 секунд, после чего след становится белым. Может быть, здесь имеет место высвечивание термически возбужденных атомов.

§ 301. Суточная и годичная вариации. Из ашхабадского ряда наблюдений следует, что весной и утром следы возникают «менее охотно», а возникшие — сохраняются хуже и τ_s у них меньше. До и после полуночи следы возникают в два раза реже, оптимум падает между 23 и 3 час. ночи. В 1942 г. было найдено, что так как встречные метеоры дают следы не пропорционально их числу, то отсюда следует, что их скорости v_g меньше, чем было бы при постоянстве v_h; «апекс-эксперимент», как известно, это подтвердил через несколько лет. В течение года наибольшее число следов падает на август (79 следов), октябрь (10), ноябрь (7), прочие месяцы по 2—4, минимум в феврале — марте (по 1). Здесь видно влияние больших потоков. Учтя их, все же находим годичный максимум осенью и минимум весной. Суточную и годичную вариации испытывает не только число следов, но и их τ_s, Δ_s и даже скорость дрейфа v_d.

Кроме того, намечается влияние 11-летнего периода солнечной активности, впервые найденное Ф. Брохом (1904 г.), подтвержденное в Ашхабаде в 1947 г. [732] и в Чехословакии (Боушка и др.). При равномерных наблюдениях в течение года в 1942—1945 гг. в Ашхабаде из 119 стойких следов Персеиды дали 65, Ориониды 8, Кассиопеиды 7, Леониды 4, семь больших потоков — по 1, прочие 28 следов дали спорадические метеоры. Яркости метеоров менялись от +2 до —15 зв. вел. В течение ночи следы метеоров одного и того же

потока изменяются; они могут быть совсем разными даже у двух одинаковых и одновременных метеоров, но пролетевших в разных местах неба, очевидно, за счет местных неоднородностей в атмосфере.

§ 302. Новые исследования. В 1953 г. Бумба [745] специально исследовал стойкие следы с $\tau_s > 1$ мин. Оптимальные высоты оказались ~ 90 *км*, подтвердилась пропорциональность τ_s яркости и скорости метеора; кроме того, число n стойких следов обратно пропорционально τ_s. Для спорадических метеоров найдено уменьшение τ_s при возрастании v, что трудно понять; τ_s минимально летом и максимально в конце зимы (и осенью из-за потоков). В том же году, принимая радиоотражения от 3400 метеоров на станциях, удаленных на 100 *км*, за 5 час. 21 мин., работы Маннинг, Виллард и Петерсон [306] нашли только 73 общих метеора, откуда вывели, что средняя длина следа $L_s = 25$—30 *км*. В 1954 г. Уиппл [755] опубликовал измерения первых базисных фотографий следов, полученных камерами Супершмидт. С помощью особого приспособления каждые две секунды камера скачкообразно смещалась, так что след фотографировался на новом участке пленки и видны последовательные его деформации. Первые пять измеренных фотографий подтвердили известные ранее визуальные данные: скорости дрейфа доходили до $v_d = 83$ *м/сек*, причем они быстро меняются в пределах высот $H = 80$—110 *км*. По Уипплу половина энергии их движения принадлежит общеатмосферным течениям, а остальное — вихревым, охватывающим по высоте толщу 3—10 *км* и область около 50 *км* в поперечнике. Х. Д. Гульмедов (Ашхабад) по 35 следам нашел в 1956 г. среднюю толщу (по высоте) воздушных потоков до 5—10 *км*.

ГЛАВА 28

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПОЛЕТЕ МЕТЕОРОВ

§ 303. Введение. Движение метеорных тел в атмосфере связано с диссоциацией молекул, ионизацией атомов, следовательно, с возникновением и разделением зарядов разных знаков и перемещением этих зарядов. Коэффициент рекомбинации χ в метеорных следах оказывается примерно в 10^3 раз меньше, чем в невозмущенной ионосфере на той же высоте, так как ионы одного знака оказываются изгнанными из области, охваченной полетом метеора, и не могут рекомбинировать. Такое возникновение и перемещение зарядов не может не создавать электромагнитного поля, распространяющегося от метеора и его следа. Достигнув поверхности Земли и отражаясь от нее, это мгновенное поле может вызвать некоторые явления. Линейная плотность ионов даже у обычных метеоров 4,5 вел. порядка 10^{12} $см^{-1}$ по радионаблюдениям, а у болидов —10,5 вел. должна быть около 10^{18} при полной ионизации газа. Перемещение зарядов создает эквивалентную мощность токов порядка многих ампер, могущих вызвать индуктивно электрические и магнитные явления у земной поверхности (рис. 225). Наблюдения показывают, что действительно такие явления возникают; для краткости будем называть их *метеороэлектрическими* и *метеоромагнитными*. В целом они пока исследованы недостаточно.

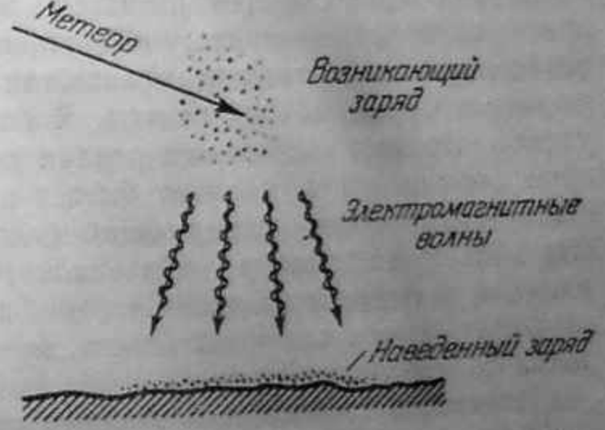


Рис. 225. Метеороэлектрические явления (схема).

§ 304. Метеороэлектрические явления. Около 4 час. вечера 29 ноября (9 декабря) 1662 г., час спустя после заката Солнца в 40 *км* от Кириллова-Белозерского в селении Новые Ерги при ясном небе пролетел болид, наблюдавшийся также и в Кириллове-Белозерском («был шум, яко гром», и след «стоял облаком мутным

долог час»). В Новых Ергах затем «камение падали с великою яростию великое и малое горячее». Сам болид был «скоростию аки молния», а затем «огнь на землю падал по многим дворам, и на путех, и по хоромам, аки кудели горя и люди от него бегали, а он катается за ними, а никого не ожог, а потом поднялся вверх во облак», после чего дошла баллистическая волна («гром ... яко глагол велий, страшен, недолго») и возникла гиперсейсма («кабы и земля тряслась, и хоромы тряслись»). Д. О. Святский обратил внимание [71], что здесь полет болида вызвал огни Эльма или шаровые молнии. Это замечательное явление даже породило своеобразный обряд: распушенный кудель поджигали и пускали по воздуху, гадая по его полету. Наибольший из упавших метеоритов был послан в московский Кремль, но впоследствии был затерян.

Далее, 12 ноября 1761 г. в 4 час. 45 минут утра при полете громадного болида во Франции близ Дижона многие видели «огонь вокруг и близ себя» [1,5].

27 ноября 1885 г. в Мазапиле близ г. Мексико во время дождя Андромедид произошло падение железного метеорита, сопровождавшееся появлением мелких искорок. Директор Закатекасской обсерватории Бонилла [765], затем метеоритолог Фаррингтон [36] лично опросили очевидца: «Вдруг кораль (загон) покрылся фосфоресцирующим светом и повисшими в воздухе маленькими светящимися искрами, как от ракеты. Я еще не успел прийти в себя, как увидел, что этот светящийся воздух исчез и тогда на почве осталось лишь столько света, сколько бывает при трении [серной] спичкой... Мало-помалу фосфоресцирующий след исчез»; на этом месте в яме был обнаружен метеорит «Мазапиль». Юлий Цезарь упоминает, что однажды в феврале во время «второй стражи» вдруг появилась большая туча, выпал каменный дождь, причем концы пик пятого легиона казались «воспламененными».

Интересно сообщение о мощных явлениях при падении метеорита в Мадриде днем 10 февраля 1896 г. По свидетельствам очевидцев, при его полете, еще до громовых ударов и гиперсейсмы, зажигалось и гасло электрическое освещение городской сети. Известно, что разряды обычной молнии заставляют «мигать» свет электролампочек, звонить телефоны (позвякивания особенно сильны и часты при прохождении грозы). Е. Л. Кринов, обследовавший явления при падении Сихотэ-Алинского метеорита, крупнейшего после Тунгусского, сообщает [763], что в 15 *км* от места падения «находившийся во время падения метеорита на телефонном столбе монтер В. И. Ефтеев... в момент вспышки ощутил резкий электрический толчок от проводов, несмотря на то, что линия была выключена». Таким образом, налицо возбуждение тока индукции метеором. Известно, что во время больших полярных сияний в кабелях связи наведенные токи достигают такой силы, что пользоваться аппаратурой становится небезопасным, из телеграфных аппаратов выскакивают искры, при этом эквивалентные токи в *E*-слое достигают миллионов ампер. Также описаны многие случаи выбрасывания искр телефонными аппаратами и радиоприемниками при близких разрядах молний под действием индукции. Следовательно, имеется аналогия в действии этих трех явлений.

§ 305. Образование озона. Еще в древней Греции было замечено, что после полета очень ярких болидов «запахом серным дымится окрестность» (Вергилий). Это — запах озона, как известно, возникающего даже при небольшом разряде. Ряд свидетельств об этом запахе, замечавшемся на большом протяжении, был получен позже, например, Хладни приводит болиды 29 ноября 1637 г., 1700 г. (на Ямайке), 10 августа 1717 г., 22 февраля 1719 г., 4 июля 1803 г. и 10 апреля 1817 г.; некоторые метеориты даже после падения имели такой же запах. Громадный болид 31 марта 1676 г. как солнечным светом осветивший Южную Европу, летел «с шипящим шумом» и оставил тот же запах. Последний раз это явление наблюдалось у нас в Воронежской области в нескольких пунктах при полете болида 13 июля 1952 г. Заметим, что озон образуется при спокойном истечении статического электричества с земных предметов при возникновении огней Эльма. Как известно, последнее явление возникает при чрезмерной электрической насыщенности (прохождение заряженного облака, электризация песчинками или снежинками, гонимыми ветром, накопление электричества на вершинах гор) и обычно сопровождается шипящим, шелестящим или свистящим, часто потрескивающим звуком.

§ 306. Истечение электричества при электрическом пересыщении (огни Эльма и др.) чаще имеет место при хорошей погоде, в горах чаще летом, на равнинах зимой [764]. Оно пропорционально разности диэлектрических постоянных тела и воздуха. Истечение положительного заряда дает розовато-белый язычок с фиолетовым краем, отрицательного — слабое голубое сияние. Описанию мазапильского падения соответствует этот второй случай. Обмен электрическими зарядами между почвой и воздухом происходит тремя путями: ионным током проводимости, молнией и точечными разрядами; последние в более интенсивной степени дают огни Эльма. Перенос электричества на 1 $км^2$ за год по Уортмеллу [779] соответственно составляет ± 60, -20 и -100 кулонов. Болиды, возможно, дают около -1 *кул*/$км^2$. Обычные электрометры, даже очень чувствительные, из-за большой инерции не в состоянии зарегистрировать мгновенные изменения геоэлектрического поля при полете болида; здесь необходима аппаратура, применяемая при записи индукции от разрядов молний [767], типа фульхронографов, клидонографов и др. Со своей стороны, большие полярные сияния также могут вызвать свечение воздуха у поверхности Земли, ранее неверно принимавшееся за «низкое» сияние; при этом также слышен свистящий звук и запах озона. Имеются фотографии подобного «светящегося тумана». Необходим перепад

напряжения $V = (10—15) \cdot 10^3$ *в/см*, чтобы истечение стало хорошо заметным. Нормальное геоэлектрическое «поле хорошей погоды» имеет $V \cong 140$ *в/м*.

§ 307. Метеоромагнитные явления. В 1934 г. было обращено внимание [163] на то, что, вызывая электрические явления, болиды должны вызывать и магнитные явления. Действительно, Массена [777] еще в 1868 г. отметил отклонение магнитной стрелки компаса при полете яркого болида. По Кетле, еще Гаусс и Гумбольдт «рекомендовали физикам внимательно следить за магнитной стрелкой в эпоху последнего появления метеоров» (Леонид 1833 г.). Такие наблюдения в 1833 и 1867 г. велись Чаллисом (Англия) и другими во время метеорных дождей, но с отрицательным результатом из-за непригодности для этой цели приемной части приборов. По той же причине безрезультатными оказались наблюдения Шеффера и Гудолла персеид 11—13 августа 1931 г. По их мнению, метеоры скорее, чем даже Солнце, могут дать магнитный эффект. 25 апреля 1939 г. сотрудники Тюменского музея Кирпищиков и Вершинин при полете красного грушевидного болида на СВ на высоте 15° отметили отклонение к востоку северного конца стрелки компаса, лежавшего на земле; после полета болида стрелка заняла обычное положение. Обычные вариометры из-за большой инерции (десятки секунд), несмотря на высокую чувствительность, не могут дать записи мгновенных вариаций, поэтому необходимо применить безынерционный прибор. В 1946 г. А. Г. Калашников [179] построил индукционный магнитометр, позволивший действительно записывать метеоромагнитные импульсы (рис. 226).

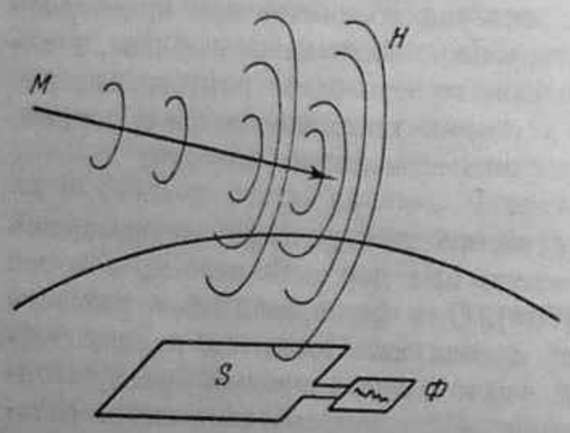


Рис. 226. Метеоромагнитный эффект (схема). Движение метеора M вызывает перемещение электрических зарядов, создающих магнитное поле H, которое вызывает в контуре S поток индукции, измеряемый флюксметром $Ф$.

Индукционный магнитометр состоит из большой (до 200 *м* диаметром) «петли» — катушки изолированного провода с несколькими десятками витков, подключенной к чувствительному флюксметру, измеряющему поток магнитной индукции. Большая площадь петли позволяет измерять очень малые магнитные потоки, в 100 раз меньшие, чем измерявшиеся до сих пор (до 10^{-2} гаммы $= 10^{-7}$ *эрстед* на *мм* шкалы).

А. Г. Калашников [762] полагает, что метеоромагнитный эффект вызван как метеором, так и дрейфом ионного облака, созданного

метеором; зарегистрированные эффекты разряда молнии (вызванные током в ее канале) и северного сияния, по Калашникову, объясняются увеличением ионизации. Однако в 1958 г. Хоукинс этого не получил при $3 \cdot 10^{-8}$ *эрстед*.

§ 308. Метеоромагнитные наблюдения. Первые наблюдения индукционным магнитометром были проделаны под Москвой в ночь максимума Драконид 9/10 октября 1946 г. (рис. 227). Общее возмущение, охватившее максимум потока, достигло 40 гамм. Полярное сияние 17 февраля 1947 г. дало +4 и —5 гамм, далекий разряд молнии — десятые доли гаммы (близкие разряды выбрасывали указатель за шкалу). Леониды 15—16 ноября 1948 г. показали изломы на линии записи (рис. 228), какие бывают при быстром (в течение 1—2 секунд) равномерном увеличении или уменьшении магнитного поля, при источнике поля, напряженность которого меняется обратно пропорционально расстоянию. Этим источником может быть линейный ток с ускорением в следе метеора. Слабые метеоры дают «уголки» — растянутые пики; на них несколько похожи индустриальные помехи, но число этих уголков увеличивается в 2—5 раз в периоды максимумов потоков (рис. 229). Визуально и фотографически в среднем за час число таких вариаций составляет около 30, из них только часть индустриального происхождения. В 1949 г. Р. А. Зевакина, наблюдая в период δ-Акварид, 28—30 июля, увеличения числа пиков не замечала (метеоры потока мало активны), но персеиды и леониды производят хороший метеоромагнитный эффект с максимумами 12 августа и 17 ноября 1949 г.; в 25% случаев пики совпали с наблюдавшимися метеорами. Когда метеорный след был слаб, пик не возникал. Число визуальных метеоров оказалось меньше числа пиков, видимо, из-за пропуска их при наблюдении. Квадрантиды 3 января 1950 г. дали вновь максимум пиков, совпадающий с оптическим максимумом потока.

Рис. 227. Микровариации геомагнитного поля во время метеорного дождя Драконид 9 октября 1946 г. (по А. Г. Калашникову).

Естественно, что метеоромагнитные наблюдения можно вести в любую погоду и днем. В 1950 г. вторая петля Геофизического института АН СССР временно была уложена в районе Гарма (Таджикистан) и наблюдения были проведены совместно со Сталинабадской обсерваторией. Чем ярче был метеор, тем более уверенно он

отмечался на магнитограмме. Очень важным оказывалось направление полета: так как поток индукции перпендикулярен и к траектории, и к каждому радиусу-вектору этой траектории, то при вертикальном движении метеора поток лежит в горизонтальной плоскости самой петли и магнитного эффекта дать не может. Поэтому три петли во взаимно-перпендикулярных плоскостях позволили бы определять радиант и скорость метеора. Полет яркого метеора вызывает отклонение указателя на 1 *мм* шкалы; увеличив чувствительность еще на 1 порядок, можно было бы наблюдать метеоры +3 вел. По А. Г. Калашникову, метеорные вариации могут быть также периодическими с частотами 0,01—1 *гц* и амплитудами до 0,1 гаммы. Более

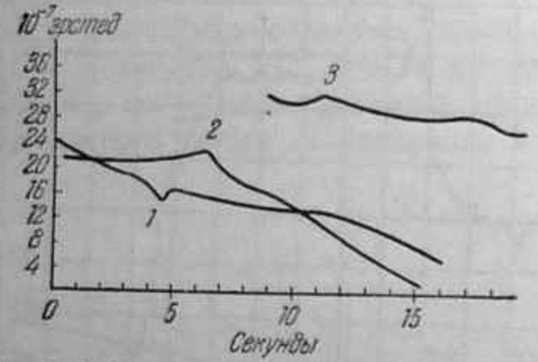


Рис. 228. Микромагнитограммы индукционной установки с флюксметром (по А. Г. Калашникову). Импульсы *1* и *2* вызваны полетом двух ярких метеоров, импульс *3* — индустриального происхождения.

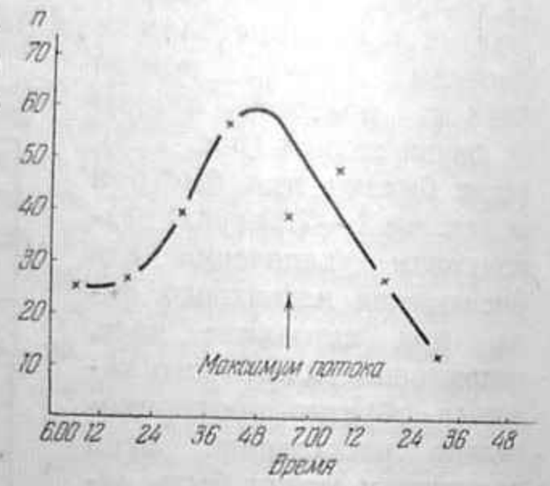


Рис. 229. Изменение числа n метеоромагнитных импульсов во время максимума потока Леонид 16 ноября 1948 г. (по А. Г. Калашникову).

подробное изучение магнитограмм ярких метеоров указывает на две фазы: при появлении метеорного следа в нем перемещается заряд, завивающийся вокруг силовых линий геомагнитного поля и образующий «пик», затем возникшее ионное облако дрейфует в геомагнитном поле как целое, отчего в облаке возникает конвективный ток индукции, создающий свое поле, отмечаемое на записи в виде медленного изменения напряженности пика. Чтобы получить наблюдаемый поток магнитной индукции 10^{-7} *эрстед*, достаточно, чтобы 1 : 2000 часть энергии движения массы 1 *г* при скорости 70 *км/сек* переходила в энергию поля. Это близко к энергии ионизации, создаваемой метеором.

Произведем количественный подсчет. Следуя С. М. Рытову (1953 г.), допустим, что тело, несущее заряд $+e$, движется параллельно земной поверхности на высоте h со скоростью v.

Тогда вертикальная компонента E электрического поля в точке земной поверхности, над которой он находится, есть $E=\frac{2e}{h^2}$,

а магнитное поле будет $H=\frac{2ve}{ch^2}=\frac{v}{c}E$. Выражая v в *км/сек*, e в кулонах, E в *вольт/см*, высоту в *км*, получим

$$E=180\,\frac{e}{h^2};\qquad H=\frac{v}{c}E_{\text{абс}}=0{,}6\,\frac{v}{c}\,\frac{e}{h^2}. \tag{150}$$

Для того чтобы получить от метеора наблюдаемое $H=10^{-7}$ *эрстед*, нужен заряд $e=3$ *кул*. Он создаст поле $E=0{,}15$ *в/см*. Пусть крупный болид несет в 10^6 раз больший заряд, чем данный метеор. Тогда $e=3\cdot10^6$ *кул*, $E=\frac{e}{20}=150\,000$ *в/см*, $H=\frac{e}{3\cdot10^7}=0{,}1$ *эрстед*. Таким образом, H достаточно, чтобы вызвать отклонение стрелки компаса, а E — чтобы вызвать описанные электрические явления.

В 1954 г. Кольский описал [776] обнаруженный им с помощью широкополосного приемника электрический эффект, вызванный взрывом: это было не действие электромагнитной волны, но следствие местной вариации электрического потенциала. В 1955 г. Такакура [778] нашел электромагнитное воздействие взрыва на частотах 6—90 *Мгц* (ширина полосы пропускания 0,4—0,2 *Мгц*); его не было на более высоких частотах (190—3300 *Мгц*). На частоте 6 *Мгц* импульс принимался на катодный осциллограф, где пиковая мощность его достигала нескольких сотен электрон-вольт. Если излучение вызвано изменением момента P расширяющегося ионизованного газа, то при объемной плотности концентрации n объемный заряд есть $ne\,dV$; пусть вектор S направлен из центра объема V к его элементу dV, тогда $P=\int\limits_V neS\,dV$ в практических единицах, а напряженность поля $E=-\ddot{P}/4\pi\varepsilon c^2d$, где d — расстояние до наблюдателя. Отсюда находим $\ddot{P}=1{,}6\cdot10^3$ *кул · м/сек*^{2}; таким образом, наблюдаемый Такакурой эффект мог быть вызван (при $n=10^{10}$ электрон/*см*^{3}, $V=10^3$ *см*^{3}) потерей скорости 10^{13} электронов на $\Delta V=1$ *км/сек* в течение 1 *мксек*. Если же эффект произведен ионизацией ударной волны, то так как при потенциале 2 *эв* скорость электрона $v=10^3$ *км/сек* теряется в течение 1 *мксек* (длительность наблюдаемого импульса), требуется торможение $j=10^{11}$ *м/сек*^{2} всего 10^{11} электронов в объеме 10 *см*^{3}, т. е. сотой доли объема взрыва. Следовательно, электромагнитные явления здесь не что иное, как следствие ионизации.

Общеизвестна связь магнитных вариаций с полярными сияниями. По инструментальным записям наблюдаемое полярное сияние сопровождается быстрыми изменениями магнитного поля. Появление отдельного яркого луча вызывает иногда заметное отклонение стрелки. Таким образом, полярные сияния, происходящие в той же области, где возникают метеоры, производят не только «авроэлектрические» явления, описанные выше, но и «авромагнитные» явления, аналогичные метеорным [18, 170, 555].

§ 309. Радиометеорные явления. Мы писали выше, что при полете метеоров в определенных условиях по радио на акустическом диапазоне можно иногда слышать свисты и трески метеоров: свисты наблюдаются на фоне работающей станции и являются доплеровским эффектом, а трески — на «чистом» фоне и излучаются самим метеором, а также и его следом. Явление было обнаружено в Ашхабаде в 1944 г. [162] и «воспринималось в виде быстро следующих коротких щелчков... в конце полета, когда, например, уже был виден метеорный след». Тогда же, в 1944 г., Ю. Н. Хлюстов [770] в Арктике независимо обнаружил, что «после того как метеор пролетал первую треть видимого пути,... появлялся усиливающийся шум, сопровождаемый треском, как при искровых разрядах. После окончания полета метеора в радиоприемнике отмечался быстро слабеющий шум». Позже в 1949 г. это *собственное радиоизлучение метеоров*, как мы его назвали, было инструментально зарегистрировано Миллманом и Мак-Кинли («некоторые яркие метеоры дают отражение независимо от импульсов передатчика») [309]; оно хорошо фотографируется и возникает спустя 1 секунду или позже после появления метеора. Ашхабадские наблюдения на экране катодного осциллографа в 1944 г. показали, что в то время как доплеровы свисты состоят из правильно повторяющихся периодических колебаний, трески представляют беспорядочный набор отдельных апериодически затухающих импульсов. По Ю. Н. Хлюстову, наибольшее число метеорных радиозвуков приходится на волны 25—40 *м* (более короткие приемник не принимал); по ашхабадским данным трески были только на средних волнах. В Ашхабаде в 1946—1948 гг. были организованы параллельные наблюдения на нескольких приемниках, настроенных на длинные, средние и короткие волны; очень яркие метеоры, —3 вел. и ярче, «прослушивались» часто на всех волнах, обычно только на длинных и средних. Более полное решение вопроса можно получить наблюдениями на панорамном приемнике, где на экране одновременно виден большой диапазон частот. В 1954 г. на экране такого приемника в Ашхабаде работающие радиостанции отмечались вертикальными черточками, а вспышки молний целыми областями излучения с большим набором частот. Однако наблюдений метеоров пока имеется слишком мало.

§ 310. Собственное радиоизлучение метеоров на основании наблюдений 1945—1948 гг. в Ашхабаде у слабых метеоров незаметно, так как лежит ниже уровня помех. У крупных метеоров трески заметны гораздо лучше, особенно у красных метеоров, может быть, из-за того, что они возмущают больший объем пространства. Субъективная громкость превышает громкость уровня радиопомех от едва заметной величины (5 фонов) *) до значительной

*) Фон — единица громкости, численно равная превышению мощности звука над пределом слышимости на 1 децибел при частоте в 1000 *гц* (см. § 345).

(30—50 фонов и выше). В общем за весь период наблюдений доплеров свист и писк отмечены в 17% случаев, треск, шорох, шелест и шипение в 57%; в остальных 26% случаев звуки могли быть атмосферного или индустриального происхождения. На средних волнах свист не отмечается. Несколько чаще, чем на других волнах, собственное радиоизлучение метеора отмечено на средних волнах, а излучение его следа (по Хлюстову) на коротких. Иногда более слабые и более далекие метеоры были «радиоакустичны», тогда как более яркие и близкие оставались «немыми»; иногда два одинаковых метеора примерно на равном расстоянии давали разный эффект. Это, вероятно, связано с неоднородностями в атмосфере; поведение газовых следов этих же метеоров в бинокль оказывалось также разным. 10 августа 1945 г. два раза при полете персеид —1 и —3 вел. наблюдалось электромагнитное воздействие метеора на настройку приемника 1—*V*—1 прямого усиления с обратной связью: как известно, при этом настройка на пороге генерации весьма чувствительна и «срывается» от малейшего импульса. На диапазоне 200—800 *м* такой «срыв» наблюдался от этих двух метеоров в *момент* их *вспышки*. При падении метеорита Первомайский Поселок 26 декабря 1933 г. в Ивановской области по радио его излучение в виде треска отмечено через громкоговоритель; при падении другого метеорита, Еленовка, 17 октября 1951 г. звук, как от грозового разряда, был слышен также очень многими по радио. 24 марта 1933 г. пролетел самый яркий за 25 лет в США болид, закончившийся падением метеорита «Пасамонте»; пилот Койл вел самолет по радиомаяку и в этот момент отметил «грохот атмосферика». Ряд наблюдений приведен в [162].

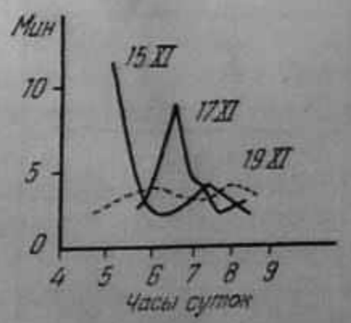


Рис. 230. Суммарная длительность атмосфериков (в минутах) во время действия потока Леонид 1928 г. (по Э. Иокояма, Электротехническая лаборатория, Токио).

§ 311. Мощность собственного радиоизлучения метеоров. На средних волнах обычные метеоры +1, +2 вел. излучают так мало электромагнитной энергии, что поле приема гасится уровнем помех. У метеоров —1, —2 вел. напряженность поля приема может достигать нескольких *мкв/м*, у болида —5 вел. даже десятков *мкв/м*. Учитывая ширину Δ полосы пропускания (около 10 *кгц*), можно думать, что мощность метеорного источника радиоизлучения (для —1 вел. при расстоянии 100 *км*) порядка $W = 1$ *квт*, для болидов может измеряться сотнями киловатт, или 10^{-3} общей энергии движения. Такие помехи действительно наблюдались (рис. 230). Если радиоизлучение метеора рассматривать как радиопомеху, то напряженность поля приема будет пропорциональна $\sqrt{W\Delta}$;

следовательно, нужны широкополосные приемники. Форма метеорного импульса на экране еще не указывает на истинный ход явления, так как воспринимающая цепь вносит свои искажения (учесть которые можно, зная фазовую и амплитудную характеристику, частотную характеристику усилителя и тип развертки).

Механизм радиоизлучения метеоров, возможно, состоит в том, что с физической точки зрения ионосфера частично является плазмой, т. е. физическим пространством, заполненным ионами обоих знаков, электронами и воздухом, в которую проникает поток ионов, создаваемый метеором. При этом возникают магнитно-гидродинамические волны; их уравнения, как частные случаи, содержат и обычные уравнения аэродинамики, и уравнения электромагнитной волны. Сжатие плазмы, относительное смещение ее частей, перенос зарядов, влияние внешних полей и др., создают в ней возмущения, передающиеся волнообразно, в частности в форме электромагнитных колебаний. При наличии ионизации, при возникновении и смещении зарядов, эти колебания возникнут и без плазмы, например, ниже D-слоя, как в опыте Такакура.

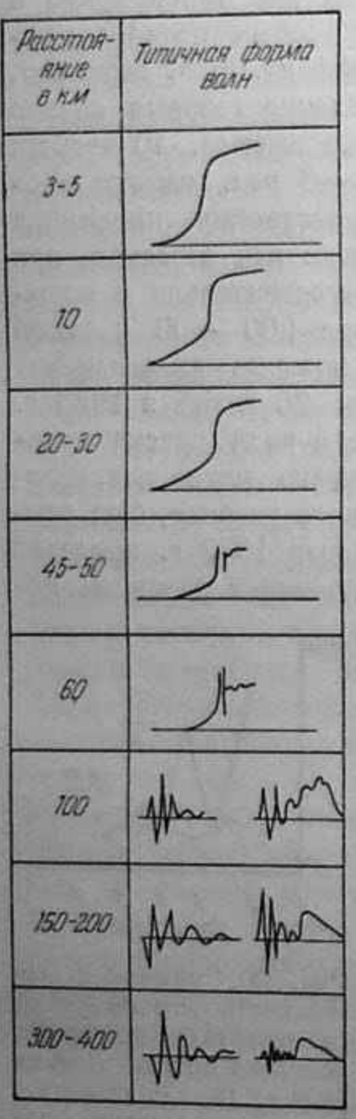


Рис. 231. Изменение формы электрического разряда с расстоянием (по Уотсон — Уатту).

§ 312. Распространение метеорного импульса, как и всякого электрического импульса, должно вызывать искажение его первоначальной формы (рис. 231). В дневное время на волнах 200—300 *м* он может вообще поглотиться там же, в ионосфере, где и возник. Если он образовался ниже, то может распространиться вдоль земной поверхности, но недалеко. Ночью ионосферу пройдут волны короче 20 *м*, где бы они ни возникли. На волнах 80 *м*, хорошо отражающихся ночью, метеоры будут хорошо слышны на больших расстояниях ночью, но окажутся «немыми» днем. Уже на расстоянии в несколько десятков километров форма напряженности поля, первично квазистационарная, превращается в колебательную (Нориндер); резкий скачок напряженности уже на расстоянии 45—50 *км* превращается в двойную волну, на расстоянии 100 *км* добавочных волн уже четыре, а основная смазывается (Эпплтон и Чепмен). Полярные сияния вызывают наиболее сильные помехи на волнах короче 40 *м*, где как раз чаще всего радиозвуки метеорных следов. По исследованиям Уотсон-Уатта, при разряде молнии в воздухе в возникшем канале происходят быстрые электрические колебания с длиной волны, примерно равной двойной длине этого канала. След метеора представляет собой такой же канал длины L_s и, если в нем также происходят электрические колебания, то при $L_s = 30$ *км* их частота будет 5 *кгц*, т. е. ослабевающий свист на акустическом диапазоне. Свободные колебания канала молнии регистрируются инструментально (Нориндер).

§ 313. Электрофонные явления на первый взгляд относятся к числу необычных явлений природы, связанных с полетом болидов. 20 августа 1925 г. в 18 ч. 32 м. миров. вр. над южной Украиной прошел из радианта в Жирафе яркий болид [756]. Он привлек внимание сначала звуком вроде «цшшш-ох!» или «тшшшш-и-й ох!», земля осветилась ярким светом, несмотря на светлые сумерки, после чего, обернувшись, наблюдатели заметили конец полета болида и плотный след, державшийся 18 минут. Эти звуки были отмечены в Николаеве, Елани и др. городах, на расстоянии до 247 *км* от траектории. Поскольку болид был сначала услышан, а затем увиден многими лицами в разных пунктах, то трудно было допустить наличие многократной психологической ошибки [172]. Обратившись к наблюдениям других болидов, автор обнаружил несколько десятков аналогичных случаев, обычно приписывавшихся заблуждению; наблюдения были опубликованы в 1929 г. [172]. Однако недоверие к этим звукам, одновременным с полетом болида, было так велико, что редакции журналов отказывались печатать наблюдения за ними, как заведомо ошибочные (поскольку свет распространяется быстрее звука).

Однако литературные и архивные источники свидетельствуют о том, что эти «аномальные» звуки наблюдались на протяжении всей истории астрономии. Первые сведения мы находим в летописи Ма Туан-лина: в 9 луну 817 года в И-хан (Китай) очень крупный болид «произвел шум, как от стаи летящих журавлей. Немного спустя был слышен род сложного взрыва из нескольких ударов», т. е. дошли обычные баллистические волны. Упоминания о последних весьма часты, так как болиды с «аномальными» звуками обычно ярки; таким образом, оба рода звуковых явлений независимы. Китайцы сравнивали звуки также с шуршанием шелковой материи, трепетанием полотна на ветру; в русских летописях упоминания о них обычны, как и в западных хрониках. Предвзятого мнения тогда еще не было и явления в разные века в разных местах разными лицами описывались так, как они наблюдались, тогда как «профессоры американских колледжей» не сделали о них ни одного сообщения, так как «физики не знают никакого электрического явления, которое могло бы произвести свист и шипение одновременно с появлением

метеора на больших расстояниях» (Уайли, 1932 г.) Поэтому ни Кирквуд в «Метеорной астрономии» 1867 г., ни Фаррингтон в «Метеоритах» 1915 г., ни Оливье в «Метеорах» 1925 г. об этих звуках не упоминают, хотя они и не могли не знать о них. Но уже гений Хладни (который был акустиком) не прошел мимо этого явления и он включил его в 1793 г. в круг своего научного рассмотрения, равно как А. Стойкович [2] в 1807 г. и И. Мухин [4] в 1819 г. Хофф, продолживший работу Хладни по каталогизации болидов, в 1835 г. писал, что *шум*, *шипение* и *свист* «обычно сопровождают метеор». Вреде [538] в 1804 г. негодовал, с каким недоверием было встречено его сообщение об этом звуке. Кемтц в 1836 г. говорил, что следует «быть внимательным к звукам разрыва, когда световое явление еще длится». Галле, изучавший болид 17 июня 1873 г., упомянул о том, что «эти, столь невероятные данные», отмечены двумя десятками очевидцев в разных местах. Сообщая о болиде 16 ноября 1902 г., В. Мейер говорит о его «шипении» с оговоркой: «только это совершенно невозможно». Деннинг привел ряд наблюдений о звуке, сопровождавшем или опережавшем видимый полет болида, но отрицал его, поскольку звук «должен запаздывать». Вейсс, изучивший десятки болидов, признавал наличие этих явлений, хотя и не мог объяснить. На последнем основании некоторые ученые их вообще отрицают (Б. Ю. Левин, 1945 г. и др.). Но обратимся к данным специалистов и очевидцев. Берверт в обзоре по метеоритике в 1913 г. сообщал о «шипящем шорохе» болида 12 июля 1910 г., скорость которого [771] по меньшей мере в сотню раз быстрее скорости звука. Г. А. Шайн указывал, что 29 ноября 1920 г. «был слышен даже свист и шипение при полете» болида. Л. А. Кулик, собравший несколько тысяч наблюдений болидов, указывал, что надо различать оба типа звуков. В. В. Федынский [769] уже в 1931 г. допускал возможность одновременности этих особых звуков со световыми явлениями. В 1933 г. Симон в опросный лист о полете болида включил пункт: было ли одновременно слышно «шипение и потрескивание». Фактов, подтверждающих гипотезу автора об электрической природе этих звуков [18, 163, 172, 514, 555, 756], накопилось далее столько, что П. Л. Драверт [761] предложил называть соответственные болиды «электрофонными» (1940 г.). Уайли в 1932 г. говорил, что «свистящие или шипящие» звуки «практически всегда» отмечаются у ярких метеоров на удивительно большом расстоянии (до 240 *км*), тогда как обычные звуки слышны лишь у нижнего конца траектории; как и Найниндже́р (1933 г.), он приписывает их «эмоции» по ассоциации с ракетой. Проф. Мохаммед-Хан (Хайдерабад, Индия), как и автор, слышал их несколько раз, притом одновременно с рядом других наблюдателей.

§ 314. Электрофонные болиды. В 1951 г. в СССР был опубликован [757] каталог 163 электрофонных болидов. Звуки описываются, как

шум (свист) стаи птиц, пущенной ракеты, сравниваются с треском щеток электромашины, или искр в предохранителе, с шорохом падения мелких песчинок на листья, с шуршанием прута, рассекающего воздух, с потрескиванием при электросварке, с раздуванием горна, с шипением горящего куска дерева, с шелестом материи, с шумом или порывом ветра, со свистом пламени на ветру, с шипением в воде раскаленного железа. Этот звук, как указывают более внимательные наблюдатели, исходит не столько от болида, сколько от окружающих земных предметов. Например, при падении метеорита Оханск, 30 августа 1887 г., пока летел болид, шелестели цветы на открытых окнах; при падении метеорита Телеутское Озеро 22 мая 1904 г. издали звук листья цветов, стоявших на подоконниках (П. П. Пилипенко); при полете болида 13 октября 1936 г. — листья мангового дерева в Хайдерабаде (Мохаммед-Хан), подобно тому как это происходит при точечном стекании статического заряда с земных предметов. Несколько раз отмечался негромкий, но отчетливый звук мгновение спустя *после* исчезновения болида: он напоминает легкую вспышку пороха «п-пых»! Чем ярче болид, тем интенсивнее выражены звуки, например, при полете Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. в Канске «послышался шум, как от крыльев испуганной птицы и в воздухе появилось сияние круговидной формы» (болид); при полете Алашанского метеорита (Монголия) 12 декабря 1905 г. внимание очевидца было привлечено «сначала резким визгом, оглушительно пронесшимся в воздухе, и затем, когда я взглянул вверх, к северу, огненным шаром, быстро летевшим от В к З по совершенно чистому небосклону» (Бадманжанов), после чего прошел гул баллистической волны. При полете крупного болида 1 декабря 1706 г. в Тобольске одновременно отмечено «шустанье» (скрежет). Электрофонные явления наблюдались при полете почти всех болидов, давших метеориты из новых падений: Хмелевка (1 марта 1929 г.), Кузнецово (26 мая 1932 г.), Первомайский Поселок (26 декабря 1933 г.), Ичкала (29 мая 1936 г.), Кунашак (11 июня 1949 г.) и многих других.

Звуки этих 163 электронных болидов были замечены представителями многих профессий, но описываются одинаково, как своеобразные шипящие и свистящие звуки, то одновременные с болидом, то на 1—2 *сек* предшествующие максимуму его яркости, т. е. слышные во время нарастания яркости. Явление наблюдается как в северном, так и в южном полушариях Земли, под тропиками и в Заполярье, на суше, море, в горах и на равнинах, в любое время года и суток, начиная от яркости —6 вел. и ярче. Средняя яркость 47 электрофонных болидов, для которых она была определена, соответствует —16 вел. (сверхболиды). На расстоянии 100—200 *км* яркости болидов —6, —12 и —18 вел. приблизительно соответствует громкость 20, 40 и 60 фонов. У более ярких характер звука меняется («скрежет, визг, жужжание»). В большинстве случаев траектории электрофонных болидов пологи ($h_R = 31°$), высоты

$H_2 = 20$—40 *км*, среднее 32 *км*, только 16% высот было более 55 *км*, а 76% ниже 35 *км*. Звуки отмечены на расстояниях 10—420 *км*, обычно 50—200 *км* (по кратчайшему расстоянию до траектории, а не до конечной точки), чаще в пунктах, находящихся в стороне перпендикулярно к проекции траектории на земную поверхность, чем на ее продолжении вперед или назад. Зависимость от направления магнитного меридиана не исследовалась. Скорости этих болидов от 16 до 74 *км/сек*. Газовые следы обычны, в восьми случаях были пылевые следы. Небыстрые болиды были с искрами, зависимости от цвета не заметно, но 60% было бело-голубых и 22% их отмечены оранжево-красными. Возможно, что быстрые болиды дают шипящие («чш-ш-ш») и порывистые («п-пых») звуки, а медленные — шелестящие звуки («с-с-с-с»). Звуки бывают как при полете каменных, так и железных метеоритов. Половина электрофонных болидов двигалась с юга, видимо, из области эклиптики. В нескольких случаях отмечено изменение звука при полете: переход от свиста к шипению, повышение высоты тона, в конце появление описанного «пыхающего» звука. Так как наиболее интенсивен звук при наибольшем нарастании яркости, когда болид еще может не быть замечен, то иногда создается впечатление, что звук появился до болида — следует сказать: до максимума яркости болида.

§ 315. Аналогия со звуками полярных сияний и разрядов молний. Электрофонные явления болидов нельзя не сопоставить с явлением так называемых звуков полярных сияний, долгое время бывших предметом дискуссий, но ныне окончательно установленных и даже записанных на пленку [773—775]. Явление состоит в том, что во время чрезвычайно мощных полярных сияний, особенно когда происходит быстрое изменение формы, становится слышен своеобразный шелестяще-шипящий шорох или свист, описываемый так же, как и звуки электрофонных болидов. Русский адмирал Врангель [735] у берегов Северного Ледовитого океана в начале прошлого века отметил, что «когда сияние достигло большой интенсивности, когда лучи перекрывали друг друга», слышалось «как бы слабое дутье ветра на пламя». Н. Т. Турчинович [768] в 1919 г. указывал на приоритет русских наблюдателей в открытии этого явления. Зарубежные авторы описывали эти звуки в тождественных выражениях; если бы явление было только кажущимся, то подобное совпадение было бы невозможным [768]. Жители Енисейска сообщали Гмелину Старшему, что этот шум похож на шум «искусственного огня (фейерверка); . . . их собаки, охваченные страхом, падают на землю», Кемтц в «Курсе метеорологии» пишет, что шум «имеет свое происхождение в мечущихся лучах», по Ханстеену — когда они проходят через зенит. По Ожильви (1882 г.) наблюдатель с завязанными глазами указывает максимумы громкости, которые совпадают с моментами вспышек сияния. В 1933 г. Астрофизическая обсерватория в Канаде

разослала специальный опросник [772]. 144 наблюдателя этих звуков дали 106 описаний: одни из этих звуков свистящие, другие — потрескивающие, в 10 случаях они исходили из приземных форм сияния. Чент [773] считал их связанными с родом электростатического разряда близ Земли. Тот же вывод сделал Гендерсон, изучавший их влияние на радиоприем. Звуки сияний 15 октября 1926 г. подробно описал В. А. Фаас в Гатчине; сияние охватило все северное полушарие Земли и было «рекордным»: звуки были слышны «совершенно легко» и независимо отмечены другими лицами, как гул комаров. В тот же физический момент этот звук отметил Йельструп в Норвегии, как «слабо свистящий»; он «точно следовал вибрациям сияния»; в зените г. Усть-Цильма корона сияния вибрировала с едва уловимой быстротой, в Перми магнитограф у О. В. Деминева показал возмущение на 2°26′, фотограмметрическая высота оказалась, по Стермеру, от 90 *км* и выше. Последний считал, что звук исходит от окружающих земных предметов под действием электростатических зарядов, индуцированных сиянием. Зимой 1928 г. звуки сияний отмечены многими в Ленинградской области, до 1932 г. — штурманом Б. Халиным — в Баренцевом море, в начале 1937 г. К. П. Станюковичем в Карелии. В 1931 г. Чепмен в статье «Низкие сияния и их слышимость» упоминает о 39 случаях звуков; с тех пор они наблюдались коллективами ученых (Стермер с сотрудниками и другие) и зафиксированы инструментально.

§ 316. Аналогия с «бронтофонными» явлениями. Во время близких разрядов молний одновременно со световой вспышкой иногда можно слышать короткий сухой звук, подобный треску рвущейся шелковой материи. За ним следует обычный удар грома. Обратив внимание на сходство этого явления со звуками болидов и северных сияний, автор обнаружил, что еще Вильям Томсон в 1863 г. сообщал о звуках, «слышимых в момент вспышки молнии на значительном расстоянии от канала молнии и до удара грома»; в 1893 г. Мунро указывал, что такие звуки («но отличные от звука искры») издают конденсаторы при разряде. Кейв в 1934 г. сообщает, что в метеорологической литературе [774] имеется масса описаний «свистящих» звуков, напоминающих шипение раскаленного железа при погружении в воду, разрывание материи, порыв ветра, свист хлыста, треск при замыкании проводов, не только одновременных с молнией, но и слегка ей предшествующих, так как они вызываются первыми разветвлениями — лидерами» (в момент ее формирования). Он объясняет это *индуцированным зарядом*, который может появиться «более чем в одной точке» вокруг. Однажды в поле «свист исходил от ближайших деревьев», хотя они были в стороне, противоположной молнии. Для краткости назовем эти явления «бронтофонными». В 1926—1936 гг. на обсерватории физики Солнца в Кэмбридже Уортмелл [779] произвел фотозаписывающим электрометром

6000 измерений напряженности земного электрического поля при разрядах молнии. Оказалось, что в эти моменты скачки напряжения геопотенциала доходят до 66 000 *в/м* как в положительную, так и в отрицательную стороны против обычного там градиента 100 *в/м*. При сложном разряде геопотенциал может менять знак 2—3 раза. До главного разряда идет «предразряд» с изменением поля до 10 *кв/м*; ближе 15 *км* в среднем градиент отрицательный, между 15—20 *км* положительный. Вертикальные разряды, но достигающие Земли, на близком расстоянии дают скачки одного знака, на далеком — другого. На расстояниях 2—3, 4—5, 10 и 15 *км* вообще скачки редко превышали 20, 10, 3 и 1—2 *кв/м*. Положительные разряды, не доходя до почвы, увеличивают высоту отрицательных зарядов.

§ 317. Обобщение данных наблюдений. Электрофонные явления болидов, полярных сияний и близких разрядов молнии субъективно одного порядка громкости. Исходя из того, что разряд молнии при высоте $H = 5$ *км* имеет место при заряде в 20 кулонов, следует думать, что при полете болида (за 500—200 *км*) возникает заряд порядка 10^4—10^5 кулонов, по-видимому, положительный, судя по метеороэлектрическим явлениям, указывающим на стекание отрицательного электричества с земных предметов. Это явление сопровождается мгновенным скачком геопотенциала (§ 308), свечением стекающего электричества, звуками, образованием озона, индукцией в линиях связи, отклонением магнитной стрелки и помехами радиоприема. Верхние слои атмосферы заряжены относительно почвы также положительно с общим стационарным зарядом порядка $5{,}4 \cdot 10^5$ кулонов. Таким образом, болиды могут, по-видимому, временно увеличивать местный заряд ионосферы на величину порядка полного заряда слоя *E*. Впрочем, давно известно, что полярные сияния создают токи, эквивалентные 10^6 и более ампер. Для поддержания вертикального тока в атмосфере между почвой и ионосферой силой 1360 ампер нужна мощность $2{,}9 \cdot 10^5$ *квт*, легко покрываемая за счет $0{,}1\%$ энергии движения метеоров при $v = 50$ *км/сек* и их общей массе за сутки только 10 *т*. Напомним, что Эпплтон и др. вообще считают, что *E*-слой непрерывно создается метеорами. По-видимому, именно метеорами поддерживается постоянный положительный заряд атмосферы относительно почвы.

ГЛАВА 29

БОЛИДЫ И ИХ ПЫЛЕВЫЕ СЛЕДЫ

§ 318. Введение. Благодаря значительным размерам метеорных тел, вызывающих болиды, развиваются такие геофизические явления, которые при полете обычных метеоров либо незаметны, либо вообще не имеют места. К числу таких явлений относятся термические, акустические (включая электрофонные и радиоакустические) и метеоросейсмические явления, уже рассмотренные нами выше, а также образование *пылевых* метеорных следов. Специальными наблюдениями в конусе зари в 1955 г. в Ашхабаде [787] было найдено, что обычные метеоры не дают пылевых следов, превращаясь в метеорный газ, тогда как для образования пылевого следа метеор должен быть достаточно большим (т. е. болидом), чтобы проникнуть в достаточно плотные слои атмосферы. Таким образом, с явлением болидов связаны процессы, которые можно назвать *астрогеофизическими*. Начнем с рассмотрения самих болидов.

В отличие от метеоров, болиды благодаря большой яркости наблюдаются на обширной площади и привлекают внимание неспециалистов (см. рис. 1). Из-за редкости явления астроном и геофизик либо вообще вынуждены отказаться от его всестороннего изучения, либо должны пользоваться материалом случайных очевидцев. С числом последних вообще растет объективность описания явления; по некоторым болидам число свидетельских показаний доходит до 1000. Естественно, что уклад жизни населения сказывается на статистике болидов; так, в Англии в конце прошлого века падения болидов происходили преимущественно по воскресеньям, подобно тому как в старой Сибири метеориты падали лишь вдоль сибирской железнодорожной магистрали, где плотность населения была выше. Во время первой и второй мировых войн полеты болидов принимались за самолеты и дирижабли; в США не раз пилоты резко меняли курс самолета, боясь «встречи» с болидами, которые из-за яркости, иррадиации и отсутствия ориентиров кажутся в 100—1000 раз ближе действительного расстояния.

§ 319. История вопроса. Первое письменное упоминание о болидах нам сохранили китайцы: оно относится к 91 г. до н. э., болид был «ярче Солнца». Там же в 34 г. н. э. описан звуковой болид и

второй — 27 марта 103 г. Болид 26 сентября 307 г. величиной «с Солнце», со звуком, оставил след, протянувшийся с ЮЗ на СВ. Описания звуков (в том числе электрофонных), следов и вида болидов, сделанные полторы тысячи лет назад, вполне соответствуют наблюдаемым и в наше время. Особенно тщательно китайцы записывали положение траекторий болидов в IX—XI вв. н. э., что дало возможность получить радианты Геминид, Таурид, Орионид, δ- и γ-Акварид и других потоков, совпадающие по дате и положению [780]. В то время действовали также потоки, ныне не наблюдаемые (например, α — β Б. Медведицы), радиант Персеид был в Кассиопее и т. д. [782].

Первое европейское упоминание о болиде относится к 580 г. (Франция); в декабре 584 г. хроника монастыря Сен-Дени описывает «огненный шар», который «пролетел по небу в средине ночи и ярко осветил большое пространство ..., казалось, что наступала заря» (Григорий Турский). В 952 г. «огненный камень, похожий на массу раскаленного железа, пролетел по небу от запада. Виден был змей (т. е. след)» (Фродоардова хроника). Ликосфен упоминает о «хазме» в 1344 г. Еще до этого в Италии видели днем 19 февраля 1106 г. падающие звезды, «то стремившиеся одна вслед другой, то падавшие на землю», т. е. поток дневных болидов. Подобное явление описано уже в «Махабхарате» (см. гл. 1). Болид 1507 г. в Италии произвел такое впечатление на Рафаэля, бывшего еще мальчиком, что тот впоследствии изобразил его на своей «Мадонне» в Фолиньо. Полету болида 24 декабря 1560 г. в Лилльбонне зимой при ясном небе был приписан взрыв порохового склада (метеороэлектрическая причина?).

В августе 1618 г. в Штейермарке у венгерской границы был отмечен болид, после полета которого выпали камни и красный дождь (от примеси метеорной пыли). Кеплер в «Эфемеридах» описал звуковой болид 17 октября 1623 г., наблюдавшийся во всей Германии и описанный также Исааком Хабрехтом и Шикардом в брошюре, изданной в Страсбурге. Только особо крупные болиды привлекали внимание в этот период; из 813 болидов, по Араго, 35 дали метеориты. Из-за полета болида 25 сентября 1641 г., сопровождавшегося грохотом и и гиперсейсмой, сдались напуганные защитники города Герлица (Германия). Галлей [400], Кавина и Монтанари изучили болид 31 марта 1676 г. (из радианта 215° + 35°), прошедший от Далмации до Корсики и «обративший ночь в день»; Дерфель графически исследовал путь болида 12 августа 1683 г., прошедшего над Саксонией (рис. 17), а Кирх – другого (19 июля 1686 г.), указав впервые, что в земной точке он казался стационарным; Галлей оценил его высоту в 30 миль (48 *км*). Шереметев описал болид 20 (31) июля 1704 г., прошедший путь длиной 1000 *км* от Украины до Швеции (рис. 16). Болид 19 марта 1719 г. затмил яркостью Луну и казался лишь «немногим слабее Солнца». Галлей нашел его параллакс, высоту, скорость ($H = 37 - 20$ *км*, $v = 2{,}7$ *км/сек*) и линейный размер (2,4 *км*). 22 октября 1725 г. впервые отмечен болид в США (в Мэриленде). В пылевом следе болида 8 марта 1746 г. (Эссекс, Англия) впервые наблюдалась иризация. Болид 15 августа 1755 г. в Голландии при солнечном свете осветил так ярко, что «все предметы бросали тень», а другой болид 15 января 1756 г. в Англии за 45 сек. прошел от зенита до горизонта с ЮЗ на СВ. Дж. Прингл вычислил траекторию болида 26 ноября 1758 г., прошедшего над Кэмбриджем и Глазго, указав, что его скорость (48 *км/сек*) — гиперболическая. Еще Бальби, профессор физики и медицины в Болонье, определил высоту болида 22 февраля 1719 г. в 16—20 тыс. «шагов», а Цанотти [814] — высоту болида 13 октября 1745 г. — в шесть итальянских миль (8,8 *км*). Много шума наделало появление «земной кометы» — болида 18 августа 1783 г., прошедшего от Шотландии до Италии на высоте от $H_1 = 106$ до $H_2 = 10$ *км*; его скорость упала с > 32 до 1,8 *км/сек*. При полете болида 4 октября 1794 г. Аморетти по интервалу звука определил расстояние r и по видимому поперечнику d' — истинный $D = r \sin d'$ (49 туазов = 88 *м*). Португальский болид 10 апреля 1786 г. совершенно затмил свет Луны. В 12 час. дня 13 января 1793 г. красный болид, как продолговатая туманная масса, прошел поперек диска Солнца (Англия). У болида 28 июля 1798 г. (Англия), прошедшего в $14^1/_2$ час., наблюдался черный пылевой след; из-за солнечного сияния сам болид виден не был; подобные случаи впоследствии отмечались неоднократно, в том числе и при падении метеоритов, например, 16 сентября 1843 г. в Эрфурте (Клейн Венден, вес 3 *кг*). 2 (13) декабря 1803 г. в 20 час. в Екатеринбурге Герман отметил звуковой болид; 10 декабря того же года русский адмирал Крузенштерн в Атлантическом океане описал другой болид с пылевым следом, который был виден несколько часов. Председатель Московского общества испытателей природы Фишер [804] описал болид 9 ноября 1814 г. в Москве, вращавшийся вокруг оси; были описаны и другие яркие болиды, наблюдавшиеся в России и в Монголии. 12/13 XII 1830 г. близ Хейлигенштадта (Прусская Саксония) наблюдались пачки болидов, с шумом шедшие с ЮВ; прошло не менее 40 болидов. При падении метеорита Рочестер 21 декабря 1876 г. поток болидов, числом до ста, прошел путь 1600 *км* от Канзаса до Нью-Йорка «с устрашающими звуками».

Мощные оптические и акустические эффекты отмечены, естественно, при падении метеоритов; например, полностью затмевали свет Луны болиды 24 июля 1790 г. (метеорит Барботан, Франция), 19 декабря 1798 г. (Бенарес, Индия), 14 мая 1864 г. (Оргейль, Франция) и др. В заключение заметим, что русскую былину о Тугарине Змеевиче [795] можно также рассматривать, как описание полета болида и его следа и выпадение метеорита: «Утром-светом прилетел Тугарин (Змея сын) ... налетела туча громовая, грозовая ... покатилась голова (Тугарина) на землю, как пивной котел, загудела земля-

матушка»; затем товарищи помогли Алеше Поповичу «голову Тугарина на богатырского коня взвалить. Как приехали они к Киеву, заехали на княжеский двор, бросили среди двора чудище» (т. е. метеорит). При этом отмечается, что Тугарин в полете кричал так, что «дрогнула земля, согнулись высокие дубы, воды из реки выплеснулись» (гиперсейсма). В другой былине о Змее Горыныче говорится, что «потемнело небо, а тучи на небе нет, ... а гром гремит, и грозы то нет, а огонь блестит; ... летит ... Змей Горыныч от трех головах, о семи хвостах (возможно, кратный болид, — *И. А.*), из ноздрей пламя пышет, из ушей дым валит, ... сыплет искрами горючими, жжет Добрыни тело белое», и, кроме того, «в когтях мертвое тело держит (метеорит?). ... Змей бросил мертвое тело наземь, зарычал громким голосом ... дубы с корнями вывернулись, трава на аршин в Землю ушла». Видимо, здесь описано падение метеорита типа Сихотэ-Алинского, сопровождавшееся звуковыми и метеоротермическими явлениями, а также пылевым следом. Те же мотивы имеются в китайском эпосе.

§ 320. Каталоги болидов. Китайские наблюдения метеоров и болидов в 1848 г. издал Био (на французском языке), сводку европейских наблюдений по более ранним спискам Шаля, Геррика и др. дал Кетле в 1861 г. [51]. Много упоминаний о болидах приводит Хладни в обеих монографиях [1,5] и его продолжатель Хофф; в 1869 г. Гайдингер исследовал особо болиды [543], и в 1861—1863 гг. Бухнер [802] издал двухтомную монографию о метеоритах и болидах. Борниц составил наиболее полный из известных каталогов болидов, там отмечено 4146 болидов за 1600—1888 гг., а также 3451 болид ярче Венеры за более ранние годы (с древнейших времен). К сожалению, этот каталог не был издан и потерян еще в начале XX в. В 1925 г. Т. Кёль привел данные по 978 болидам, наблюдавшимся в Скандинавии и Дании за период с 1876 г. В 1928 г. В. Фишер (США) собрал каталоги Кувье-Гравье, Араго, Кёля и др. для составления общемирового каталога болидов; в него вошло 1500 объектов, но работа не была ни закончена, ни опубликована.

С 1922 г. сбор материалов по болидам СССР начал проводить Л. А. Кулик; 1328 наблюдений 959 болидов предварительно обработал К. А. Любарский [792] в 1954 г. В 1925 г. сводный каталог 611 траекторий болидов издал Гофмейстер [365]; в его основе лежит каталог Ниссля, также до того не издававшийся. В 1941 г. данные о 250 болидах Норвегии за 1903—1941 гг. напечатал Эйнбу [803]. В 1956 г. была опубликована сводка 55 траекторий болидов и метеоритов СССР [781]. В 1931 г. Фишер и Олмстед [275, 439] опубликовали каталоги метеорных фотографий, полученных гарвардскими патрульными камерами. В то время на негативах получались метеоры ярче —2 вел., т. е. главным образом болиды. К 1941 г. число таких фотографий дошло до 1000. Уиппл совместно с Франческой Райт обработал их для получения радиантов больших потоков и их смещения и для статистики активности; Уиппл исследовал [370] свойства траекторий, а Яккиа — физические явления (вспышки, взрывы) при полете болидов [811].

§ 321. Суточная и годичная вариация болидов. Суточная вариация в основном отражает распорядок дня случайных наблюдателей; максимум ее падает на вечерние часы и нисколько не отвечает истинной картине явления, близкой к суточной вариации обычных метеоров.

Годичная вариация болидов своеобразна: наиболее часто они появляются в даты 1—2 января, 12—14 марта, 12—14 апреля, 29 июля, 2 августа, 26—29 сентября, 20—22 октября, 8—10 и 15—17 ноября, 10—13 декабря с годовым максимумом 28 сентября и 12 декабря (Кёль, 1925 г.). Фишер в 1928 г. нашел минимумы 27—31 марта и 20—24 июня, а максимумы 9—13 августа и 12—16 ноября. По К. А. Любарскому, годичные максимумы падают на август и май, минимумы на февраль и апрель, а также на летнее солнцестояние (белые ночи). Из высказанного заключаем, что некоторые даты повышенной активности болидов совпадают с эпохой действия больших потоков, другие самостоятельны. По Уипплу, из 76 фотометеоров 2—22 августа 74% оказались персеидами; Хоффлейт нашла, что половина из 217 гарвардских снимков принадлежит поточным метеорам. В 1952 г. было найдено [455], что в эпоху активности больших потоков число болидов возрастает на 20%; число спорадических болидов составляет 48%; треть остальных (18% общего числа) связана с малыми эклиптикальными.

§ 322. Радианты. В 1939 г. Уотсон нашел концентрацию радиантов болидов к эклиптике, что, впрочем, замечал еще Деннинг в начале века; на 10 групп таких радиантов в 1937 г. указал Кнопф. Уиппл и Райт по 179 фотографиям октябрьских метеоров 1891—1947 гг. нашли, что 46% их принадлежит потокам, в том числе 20% Орионидам, 17% Тауридам; 9—10 болидов дали новый поток 2—10 октября, максимум 6 октября $\alpha = 355°{,}6$, $\delta = +10°{,}1$ (1950,0). По Кнопфу, многие радианты болидов не соответствуют метеорным и обратно, тогда как другие радианты — общие. Радианты метеоритов из числа 66, исследованных И. С. Астаповичем [455] в 47% совпали с известными метеорными радиантами; случайных совпадений было бы только 9%. Следовательно, спорадических метеоритов оказывается 52%, болидов 50% и метеоров тоже 50% [455, 781]. 3 июля 1883 г. над Далмацией пролетел болид и два часа спустя — другой над Голландией и Германией; радианты обоих совпадали ($\alpha = 24°$, $\delta = 20°$). Скорпионидам мог принадлежать метеорит 19 (26) мая 1419 г. (Новгород Великий), ряд китайских болидов и много современных.

Таким образом, приходится заключить об активности Скорпионид (как и ряда других болидных потоков) на протяжении не менее тысячелетия.

§ 323. Траектории. В следующей таблице приведены некоторые замечательные траектории болидов; в некоторых случаях имело место падение метеоритов (табл. 9).

Если рассмотреть высоты H_2 только для случаев падения метеоритов, то можно видеть, что H_2 может иметь все значения от 0 до 50 *км*, причем наиболее часты H_2 в пределах 10—25 *км*. Астроном Графф наблюдал болид —4 вел., прошедший от высоты $h_1 = 35°$ до горизонта за 3—4 секунды. Имеется несколько надежных случаев свечения болидов до высот $H_2 = 0 - 4$ *км*. Ряд фотографических траекторий болидов указывает на искривления, вызванные вибрацией камеры от часового механизма или обтюратора (Уиппл [370]); в некоторых случаях отклонение происходит после взрыва (Сикора, Батлер) и особенно заметно, если полет метеора происходит по лучу зрения камеры (рис. 164). Медленные метеоры иногда к концу пути показывают волнистость, как если бы они двигались по винтовой линии; однако радиальные ускорения при этом должны в тысячи раз превосходить ускорение силы тяжести. Того же порядка ускорение торможения из-за сопротивления воздуха. Вращение Земли может вызвать более заметное искривление траектории в самом конце пути, направленное к западу: в максимуме на экваторе суточная аберрация $\Delta A = \operatorname{arctg} \frac{v_e}{v_p} = 0{,}464 = 2°{,}4$ (v_e — линейная скорость вращения на экваторе, v_p — параболическая скорость относительно Земли); при потере скорости $\Delta v = 0{,}9v$ искривление составит с первоначальным направлением 22° и иногда замечается даже простым глазом. У болидов искривление траекторий наблюдается гораздо чаще, чем у обычных метеоров, так как траектории первых длиннее, высоты H_2 ниже, полет длится дольше, торможение заметнее и яркость выше.

Болид 18 октября 1863 г. летел над Южной Европой 18 *сек*, пройдя за это время путь 1200 *км*. Ниссль обнаружил, что его высота постепенно увеличивалась. Оказалось, что болид прошел перигей и удалялся от Земли; первая половина его траектории, по крайней мере такой же длины, не была видна из-за облачности. Известно несколько траекторий длиной $L > 1000$ *км*. При прочих равных условиях по Эпику, А. Б. Северному и К. П. Станюковичу L зависит от яркости; например, по И. С. Астаповичу (1935 г.) $\lg L = a - bm_z$, где m_z — зенитная звездная величина, а для леонид и орионид $a = 1{,}71$, $b = -0{,}103$, или $L = 43 \sqrt[4]{I} H^{-\frac{1}{2}}$; на высоте $H = 85$ *км* болид, метеор и телеметеор силой света $I = 10^8$, 10^4 и 1 *м. св* соответственно будут иметь длину пути $L = 470$, 47 и 4,7 *км*.

Таблица 9

Атмосферные траектории некоторых замечательных болидов России и СССР

Дата	Мировое время	a_R	h_R	H_1 км	H_2 км	L км	v км/сек	α	z	Область
1290 VI 20	9^h	90°	20°	—	—	—	—	10°	+15°	Устюг Великий
1419 V 19 (26?)	22	0	20?	—	—	—	—	245	−13	Новгород Великий
1662 XI 29	13	46	20	—	—	—	—	265	−11	Новая Ёрга
1704 VII 31	16	340	4	100?	<50	1100	—	275	−25	От Украины до Швеции
1887 VIII 30	8^h46^m	307	27	—	9	20	8	213	−2	Метеорит Оханск
1900 VIII 23	19 14	356	14	85	—	207	30	297	−32	Метеорит Леоновка
1905 I 17	19 27	85	2	—	10	480	13	347	−14	Метеорит Томаковка
1908 VI 30	0 16	10	12	100	0	650	40	20	−13	Тунгусский метеорит
1916 IX 19	18 29	187	74	100	47	745	60?	120	+45	Московская обл.
1918 X 6	14 00	263	0	—	16	120	(27)	351	−1	Метеорит Саратов
1924 I 21	11 40	129	8	70	43	206	—	252	+28	Омская область
1928 VI 4	15 14	121	20	154	24	138	39	169	+60	Уфимская область
1929 I 25	15 30	107	23	>80	32	~120	40	290	+27	Чулак-Курган, УзССР
1929 II 28	23 27	62	39	>90	10	81	16	188	+18	Метеорит Хмелевка
1933 X 2	1 10	105	34	116	41	134	50	45	+52	Метеорит Старое Песьяное
1933 XII 26	15 00	315	60	112	7	122	40	26	+28	Метеорит Первомайский Поселок
1936 VI 13	16 58	350	20	>54	25	48	24	225	+18	Актюбинская обл.
1937 IX 13	11 15	315	30	—	>45	—	—	254	+1	Метеорит Каинсаз
1938 X 8	24 00	171	43	124	8	158	18	333	+84	Метеорит Жовтневый Хутор
1939 VI 23	13 00	50	45?	—	<50	—	—	101	+11?	Метеорит Червоный Кут
1947 II 12	0 36	180	55	110	12	120	17	285	+79	Сихотэ-Алинский метеорит
1949 VI 11	3 18	169	30	—	21	140?	16	211	+64	Метеорит Кунашак
1950 X 11	12 46	285,5	19,5	113	16	336	20?	281,5	+1,5	Метеорит Венгерово
1950 XII 29	13 15	236	36	>66	26	>84	35?	64	+49	Каракалинский р-н ТССР

§ 324. Сила света болидов. Яркие болиды видны на расстоянии прямой видимости до горизонта, т. е. при $H = 100$ *км* до расстояния $r = 1100$ *км* при $z = 90°$ или на площади до $3{,}8 \cdot 10^6$ *км*^{2}, т. е. на площади круга диаметром 22° дуги земного меридиана. Даже в пределах $r = 100 — 1000$ *км* изменение модуля расстояния $\Delta m = M — m = -5 \lg \frac{r}{r_0}$ при редукции от видимой звездной величины m на расстоянии r к абсолютной звездной величине на $r_0 = 100$ *км* составляет не более 5,0 зв. вел., что для больших болидов мало существенно. Практически большинство болидов отмечается при $r = 100 — 250$ *км* (так как при $r > 250$ *км* они закрываются земными предметами, пролетая низко над горизонтом); в этих пределах удобно пользоваться следующими условными соотношениями:

Видимая зв. вел. m . .	от —4 до —8	от —9 до —13	от —14 до —18	от —19 и ярче
Сила света I (*м. св.*) .	10^6—10^8	10^8—10^{10}	10^{10}—10^{12}	$> 10^{12}$
Класс объектов	Болиды	Большие (и дневные) болиды	Сверх-болиды	Исключительные болиды

Известно, что на расстоянии $r = 10$ *км* освещенность при вспышке обычной атомной бомбы в 100 раз превосходит солнечную; это значит, что болид —26 зв. вел. на $r = 100$ *км* имеет такую же силу света I, как и атомная бомба (т. е. $7 \cdot 10^{14}$ *м. св*), однако такие болиды наблюдались (например, Тунгусский 30 июня 1908 г.); вспомним, что метеоротермические явления начинают ощущаться при $m = -20$ вел. и ярче, т. е. у исключительных болидов; полет сверхболидов обычно заканчивается выпадением метеоритов; большие болиды видны при полном солнечном свете и сопровождаются гиперсейсмами, звуковыми и электромагнитными явлениями (индукция), а при —6 зв. вел. начинается заметное освещение местности ночью. При расстоянии $r = 100$ *км* болид, одинаковый с Луной по видимой яркости, имеет силу света $I = 1{,}4 \cdot 10^9$ *м. св.*; исчезновение на небе Луны в фазе четверти происходит при $I \geqslant 45 \cdot 10^9$ *м. св*, а полной Луны — при $I > 150 \cdot 10^9$ *м. св.* (сверхболиды). Метеорит Хмелевка в полете имел $m = -21$, -22 вел. и $I = 2 \cdot 10^{12}$ *м. св.* На стр. 481—483 приводятся определения силы света некоторых болидов (табл. 10) и наблюдения некоторых дневных болидов, сделанные в СССР (табл.11).

§ 325. Наблюдения болидов в телескоп. 18 октября 1863 г. Ю. Шмидт (Афины) в течение 13 секунд следил в кометоискатель за болидом, оказавшимся состоящим из роя отдельных тел (рис. 172, *г*). Хазенауэр 19 июля 1905 г. случайно видел в телескоп яркий метеор, голова которого периодически пульсировала и оставляла широкий желто-белый след. Маддрилл 15 сентября 1905 г. сумел в течение

Таблица 10

Сила света (I) некоторых болидов СССР

Дата	Мировое время	h_R	H_1 км	H_2 км	L км	v км/сек	α	δ	m (зв. вел.)	I (*м. св*)	Примечание
1916 X 18	3^h04^m	15°	—	10?	100?	—	214°	31°	Дневн.	$\geqslant 10^{10}$	Метеорит Богуславка, пылевой след; >250 *кг*
1925 VIII 20	18 32	18	>100	78	370	74	73	+64	—12	10^{10}	Болид электрофонный, след 18 мин; Южная Украина
1925 VIII 23	23 38	—	—	12	—	—	—	—	—10	$8 \cdot 10^6$	Крым (фото Г. А. Шайна)
1925 IX 20	18 19	18	—	9	79	12	293	—14	—10	10^9	Моск. обл. Падение метеорита?
1931 IX 4?	11 30	20	—	>9	40	20	335	+23	—12	10^9	Ангарская Стрелка
1932 IX 11	18 45	—	—	18?	180	60	347	—6	—12	10^9	Шепетовский р-н; возможно падение метеорита.
1933 V 5	21 56	30	100	(82)	28	60?	327	+35	—5	10^7	Памир, Дарваза
1937 VIII 11	19 12	22	101	74	74	60	38	+40	—5	$4 \cdot 10^6$	Каширский район
1937 VIII 11	23 03	48	122	58	85	60	132	+82	—4	$5 \cdot 10^6$	Рязанская обл.
1938 VIII 6	17 32	13	110	79	133	27	212	+12	—6	10^7	Омская обл.
1943 VIII 20	17 12	13	126	52	333	66	2	+9	—15	10^{10}	Центральные Кара-Кумы. Возможно падение метеорита
1944 V 10	19 20	45	123	36	72	45	310	+80	—15	$8 \cdot 10^{10}$	ЮЗ Туркмения. Вероятно падение метеорита
1948 VII 12	15 50	9	>100	79	546	40	129	—19	—15	$8 \cdot 10^9$	Вероятно падение метеорита
1950 VI 23	16 24	33	93	26	122	27	245	—16	—9	10^8	Узбой, Туран. Падение метеорита? (рис. 236)
1953 X 21	22 59	65	90	60	30	30	32	+20	—11	$2 \cdot 10^8$	Фото см. фронтиспис

Таблица 11

Дневные болиды, наблюдавшиеся в России и СССР

Дата и момент (местн. вр.)	Район видимости, наблюдатель	Описание
1902 VIII 19 17^h	Севск, Брянской обл., Д. О. Святский	Болид 3—5 сек., $d = 15'$, хвост «радужный», от него искры.
1908 VI 30 $7^h\ 15^m$	Сибирь, многие лица	Тунгусский метеорит. Яркая голубая вспышка при взрыве отмечена внутри домов за 400 *км*. Полет болида, $D = 3$ *км* при свете Солнца.
1916 X 18 11 47	Богуславка, Дальний Восток, многие лица	Болид огненно-красного цвета с темным густым пылевым следом. Падение метеорита.
1918 X 6 16	Самара, Т. В. Успенский	Ярко-белый с зелено-желтым хвостом, при ярком солнечном свете. Быстрый, бесшумный, при безоблачном небе. Метеорит Саратов.
1918 VI (?) 11	Запорожье, УССР, А. Васюков	Рой из десятка звездоподобных метеоров протяженностью 0°,5, медленный, $\tau = 2{,}6$ *сек*.
1918 летом 18	Близ Уфы, Х. Габидуллин	Красноватый, круглый, как шарик, длинный путь за несколько секунд.
1920 VII—VIII веч. заря	Поволжье, Н. А. Ростовцев	Равномерно освещенный круглый диск без лучей, легкий след, очень медленный, $\tau = 4 - 6$ *сек*. Белый.
1925 III 23 15 55	Трубчевск, М. Зискин, Верещерин	Круглый болид $d = 10'$, красный. Короткая вспышка за облаками.
1925 XII 20 15 34	Новгородская обл., А. Смирнов	Путь 120° длины, $\tau = 5 - 6$ *сек*, $20' - 25'$ светло-голубой, яркость равна молодой Луне, каплевидный, к концу отделились четыре круглые части.
1926 VIII 12 19 15 ±	Николаев, УССР, Е. П. Астапович	Ярко-белый, каплеобразный, матовый, медленный, 4—5 сек., в конце рой белых искр, $m = -9$ вел.

Продолжение

Дата и момент (местн. вр.)	Район видимости, наблюдатель	Описание
1927 V 27? до заката Солнца	Забайкалье, С. С. Козозаев и др.	Обернувшись на шум, увидел яркий болид, $\tau = 2 - 3$ *сек*, быстрый, масса искр, длина 0°,5, желтый. Затем баллистические волны.
1927 X 6 ок. 13	Симферополь, А. Ф. Скребец и др.	Заметный диск.
1928 VII 22 12	Рязанская обл., Д. Ф. Малин	Огненный шар 0°,4 с хвостом 2°, медленный, выбрасывал искры вперед и назад.
1928 VIII 18 перед закатом Солнца	Близ Арзамаса, А. А. Бурнаев	Ярко-белый. Электрофонный.
1929 II 17 15	Шенкурск и др., многие лица	Большой болид, белый плотный след полчаса, звуки, гиперсейсма.
1929 XI 10 16 05	Камское Устье, Шугаев	Большой болид, $d = 0°{,}4$, огненный.
1930 X 31 14 30 ±	Верхнеудинск	Желтый, $d = 0°{,}5$, искры, без звука и следа, гораздо ярче Луны днем (ярче —10 вел.); хвост. Резкий.
1930 IV 20 13 30	Старое Борискино, Поволжье	Огненный болид с узким хвостом. Падение метеорита.
1943 VIII 21 8 09	ЮЗ Туркмения, более 300 очевидцев	—17 вел., желтый, переходящий в белый, зеленое ядро, $d = 8' - 10'$, средняя скорость, $H > 60$ *км*, R у β Дракона.
1944 V 19 13 00	Ашхабад, П. С. Моденов и др.	Белый, медленный, резко очерченный, около —12 вел.
1947 II 12 10 38	Сихотэ-Алинь, Дальний Восток	Яркость сравнима с солнечной (земные предметы дали вторые тени). Густой пылевой след, звуковые и электрические явления. Падение метеорита.

10 секунд проследить в 12-дюймовый телескоп за болидом ярче —4 вел; его диск оказался в 5—10 раз больше диска Венеры, но поверхностная яркость ниже, чем у этой планеты. В 1926 г. А. А. Шрейдер (Орел) случайно наблюдал в телескоп болид —6 вел.; края его были резки, диск имел заметные размеры. Г. Морозов в 1930 г. в Ленинграде в 7-дюймовый телескоп видел метеор —2 вел., состоявший из четырех частей. 23 июня 1944 г. автор в 8-кратный бинокль в течение 4 секунд следил за метеором —4 вел.: его оранжевый грушевидный диск имел $d = 5—6'$, хвост состоял из множества перемежающихся язычков.

§ 326. Прочие данные. Приведем некоторые статистические данные о болидах. Среди 424 сообщений о ярких метеорах, собранных от населения автором, яркими отмечены 71, очень яркими 59, осветили местность 11, дневных было шесть; для 196 болидов данные о яркости отсутствовали, остальные 81 распределялись так:

Зв. величина . .	—4	—5	—6	—7	—8	—9	—10	—11	—12	—14	—15	—17
Число наблюдений	26	19	13	6	6	1	2	1	4	1	1	1

Из 150 болидов звуковых оказалось восемь, со следами 54, дневных два, кратных пять, рой болидов один, стационарный болид один, дробление отмечено у двух, искривление траектории у четырех. Астрономы и любители астрономии дали 21% наблюдений (наименее яркие болиды). Отметим, что двойных болидов вообще на фотографиях около 1—2%; 11 марта 1940 г. Саже (Франция) получил фотографию тройного болида; как пример четверного, приведем болид 4 июля 1932 г. на негативе отделения Гарвардской обсерватории в Блюмфонтейне; пятикратный получен [807] Кулиным (София) 17 мая 1939 г. Первая фотография дневного болида получена в Австралии 7 сентября 1941 г. (рис. 232). На ней вышел белый грушевидный болид с заметным диском, как это обычно изображается на рисунках по визуальным наблюдениям. Наконец, 29 апреля 1939 г. по сообщению Моннинга [809] была получена фотография следа болида с самолета.

Рис. 232. Фотография дневного болида 7 сентября 1941 г. (Австралия). Болид указан стрелкой.

Рис. 233. Пылевой след болида 18 октября 1941 г., освещенный лучами зашедшего Солнца, и он же через 15 минут (фото Д. Г. Дебабова, Чукотка).

Заметим, что в некоторых случаях объем таких следов может быть весьма велик; так, например, у болида 24 марта 1933 г., одного из самых ярких в США на протяжении 25 лет, он достигал 4000 $км^3$, причем выпало несколько десятков очень мелких метеоритов (Пасамонте). В данном случае метеорное тело значительных размеров дало очень яркий утренний болид, но благодаря большой геоцентрической скорости метеорное тело почти целиком распылилось. В. В. Федынский [541] для болида —15 вел. 24 сентября 1948 г. (Тамбовская область), оставившего геликоидальный след на высотах 85—62 $км$, нашел плотность следа $\rho \leqslant 10^{-12}$ $г/см^3$, что в 10^3—10^5 раз менее плотности воздуха на тех же высотах. Таким образом, след представлял собою тончайшую дымку.

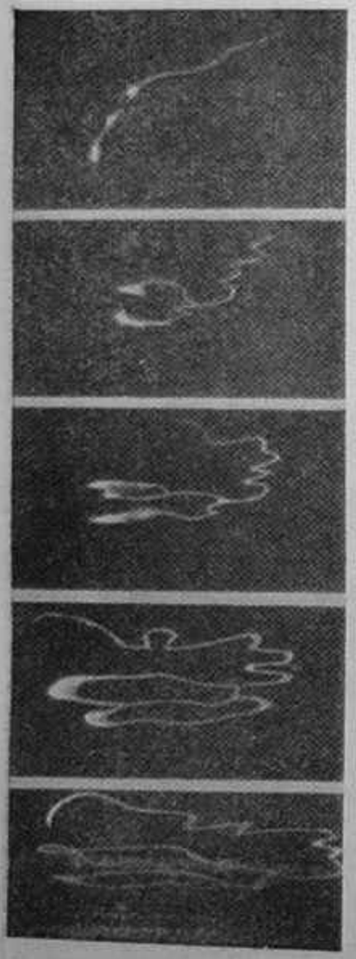


Рис. 234. Изменения формы пылевого следа болида 21 января 1924 г. (рис. А. Л. Слоницкого, г. Тара Омской области).

Перейдем к более подробному рассмотрению пылевых следов болидов.

§ 327. Пылевые следы болидов. Пылевой след болида — редкое явление природы (рис. 233—236), так как для его возникновения необходим полет крупного метеорного тела с умеренной скоростью достаточно глубоко в атмосфере, а для наблюдения — дневное или сумеречное время. Тогда частички этого тела, возникшие в полете при возгонке, пульверизации, испарении и дроблении в виде мельчайших пылинок, освещаемые как прямыми лучами Солнца, так и рассеянным светом, либо проектирующиеся на светлый фон неба, в целом дадут *пылевой след* [783]. Если размер пылинок менее 10 μ диаметром, то в пределах до 0,1 μ их называют иногда туманом, а при еще меньших размерах — дымом; к пыли классификация аэрозолей относит частицы крупнее 10 μ. Поэтому название «пылевые следы» несколько условное. Подобно тому как в зависимости от освещения обычное облако может казаться или темно-свинцовой тучей, или ослепительно-белым (рис. 237), так и пылевой след, проектируясь на фон зари, будет казаться черной полосой, если он находится в тени Земли, или будет весьма ярким, если он озарен Солнцем на темном небе (рис. 238). Яркость такого следа может быть так сильна, что он даст тени от земных предметов. Строго прямолинейный в момент полета метеора, уже через несколько секунд след делается зазубренным, начинает искривляться из-за атмосферных течений.

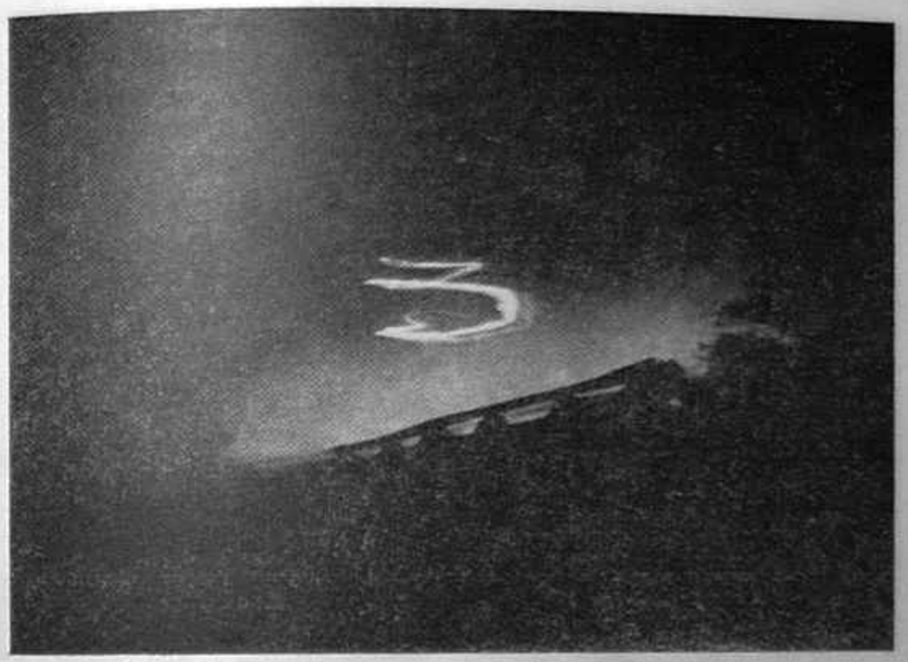


Рис. 235. Пылевой след болида 24 сентября 1948 г., искривившийся под действием воздушных течений (фото Ю. Петрова, Пензенская область).

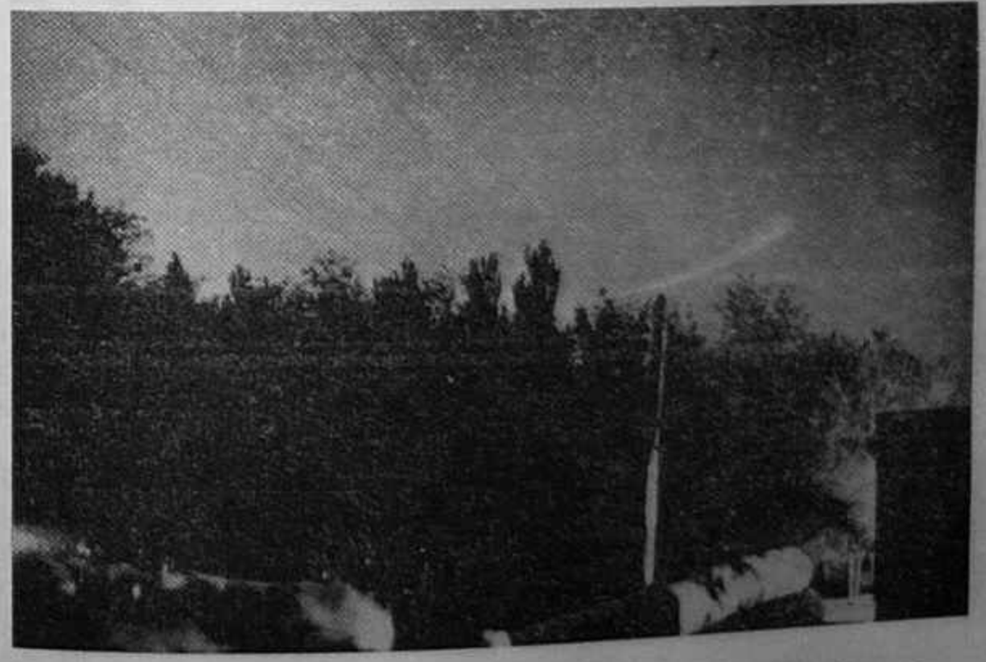


Рис. 236. Пылевой след болида на вечернем небе 15 мая 1957 г. (фото С. Х. Хусаинова, г. Кзыл-Орда Казахской ССР).

Рис. 237. На фоне зари облака в тонком слое (на краях) светлые, в толстом слое — темные (фото И. С. Астаповича).

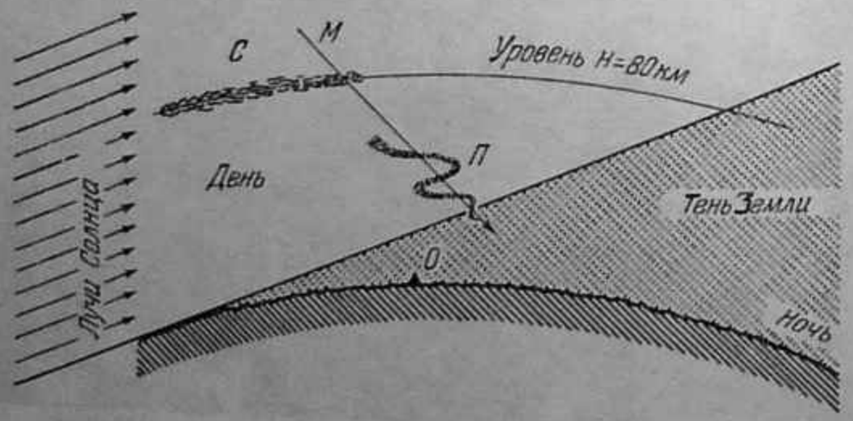


Рис. 238. Схема освещения прямыми лучами Солнца пылевого следа *П* метеора *M* и серебристых облаков *C* при наблюдении их в сегменте зари из точки *O* в тени Земли.

Он напоминает застывшую молнию или как бы трещину в небосводе, сквозь которую просвечивает нечто яркое (ср. рис. 233 и рис. 2 на стр. 17). Через несколько минут след расширяется,

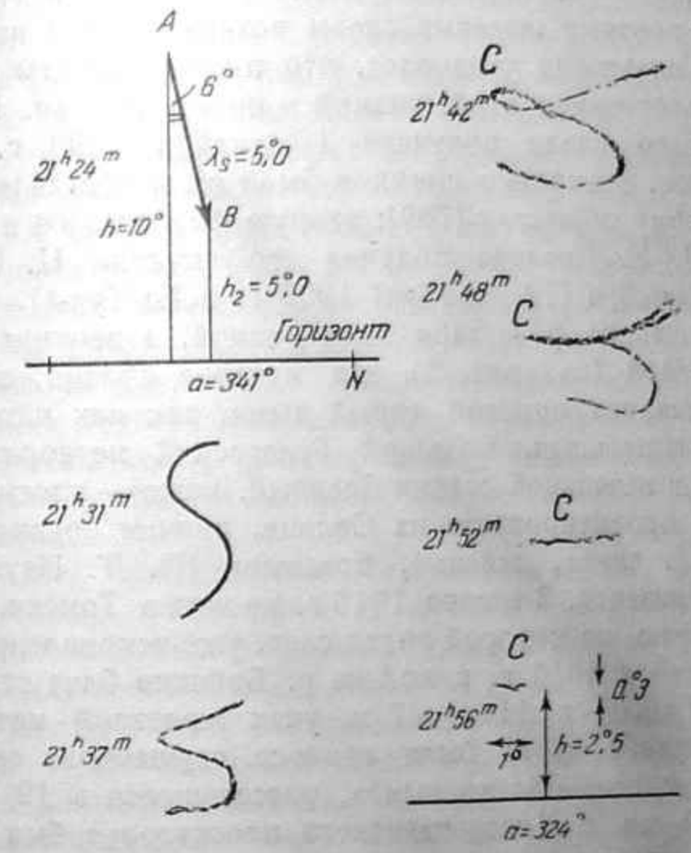


Рис. 239. Изменения формы пылевого следа болида 23 июня 1950 г. по наблюдениям Е. Н. Крамера и А. П. Саврухина (ААЛ, Ашхабад). Высота точки *A* — 47 *км*, точки *B* — 26 *км*, сгустка *C* — 38 *км*, скорость его дрейфа 64 *м/сек* к *ЗЮЗ*.

тускнеет, расползается, наконец, превращается в одно или несколько бесформенных облачков, а затем через полчаса — час, иногда через несколько часов, рассеивается совсем (рис. 239).

§ 328. Наблюдения следов. Первые описания пылевых следов встречаются в извлечениях Ма Туан-лина (XIII в.) из древних китайских летописей и в русских летописях XII в. (см. гл. 2). В Западной Европе особо были отмечены дрейф следа дневного болида 11 декабря 1741 г. (Англия), черный след дневного болида 4 ноября 1753 г. (Франция) и др.

В XIX в. было определено несколько траекторий болидов и найдены при этом высоты пылевых следов. Все они оказались ниже 80 *км*, обычно даже ниже 60 *км*, независимо от угла наклона траектории. Так как проникнуть до этих высот могут только крупные

метеорные тела, то и количество распыленного материала оказывается также значительным — порядка килограмма и более. Обычные метеоры пылевых следов не оставляют как по причине своей малой массы, так и потому, что они переходят в метеорный газ, а не в пыль [82]. Как правило, поэтому пылевые следы возникают при падении метеоритов. Кора плавления указывает, что пылевые следы могут возникать при пульверизации этой жидкой в полете пленки. Первая фотография пылевого следа получена 1 декабря 1898 г. в Полтаве В. А. Балясным: несколько снимков было им представлено Русскому астрономическому обществу [789]; вторую фотографию в монгольской экспедиции П. К. Козлова получил его спутник Ц. Г. Бадманжанов [790] 29 ноября (12 декабря) 1905 г. в Ха Туа-О, южное Гоби: его нижняя часть на фоне зари была темной, а верхняя, освещенная Солнцем, светлой (см. рис. 2), как кучевое облако; самая верхняя часть «представляла простой серый дым», так как плотность следа была здесь наименьшая. Большой Тунгусский метеорит [82] также оставил след, в начальной стадии бледный, ниже — плотный. В Кежме на Ангаре он проектировался на Солнце, причем появились «радужные полосы... синие, зеленые, красные» (Н. Т. Науменко), т. е. имела место иризация. 3 января 1916 г. Волков в Томске получил еще одну фотографию, на которой виден след, уже искривленный дрейфом.

5 (18) октября 1916 г. в долине р. Бэйчихэ близ ст. Хорватово-Гродеково (КВЖД) в 11 ч. 47 м. упал железный метеорит Богуславка. В верхней части была «полоса сгущенного серого дыма», ниже «черное густое облако дыма», рассеявшееся в 12 ч. 07 м. Из Китая, за 350 *км*, с Муданьцзянского плоскогорья был виден красный болид и «след при полете в виде дыма», в нижней части пути сквозь густой темный след моментами прорывались огненные струи. В воздухе метеорит распался на три части, две из которых, находящиеся в СССР в Комитете по метеоритам АН, имеют массу 199 и 57 *кг*. В г. Тара, Омской области А. Л. Слоницкий отметил след болида 21 января 1924 г., в течение 50 мин. образовавший четыре петли (рис. 234). 26 декабря 1933 г. произошло падение метеорита Первомайский Поселок. Вблизи Юрьева-Польского он проектировался на диск Луны (возраст 9 дней); при этом возник радужный венец, по размерам которого автор определил диаметр пылинок (порядка 1 μ). 13 июня 1936 г. перед закатом Солнца пролетел болид над Оренбургской областью, наблюдавшийся многими астрономами (редчайший случай!), съехавшимися для наблюдения солнечного затмения 19 июня 1936 г. Его след, видимый полчаса, имел $H_2 = 24$ *км*, а Бойс (Бюро стандартов США) фотометрически нашел, что по исключении света неба в первые минуты освещенность от следа была 0,4 фут-свечи, т. е. 0,037 *лк*. 24 ноября 1936 г. над Казахстаном наблюдался в течение часа мощный след крупного звукового болида. Д. Г. Дебабов [786] на мысе Чаплин (Чукотка) получил ряд снимков пылевого следа 18 октября 1941 г. над Беринговым проливом

(рис. 233). Эти следы замечены при закате Солнца; при восходе Солнца наблюдался пылевой след при падении метеорита Старое Песьяное в Курганской области 2 октября 1933 г. Каменный метеорит шел под углом $h_R = 54°$ со скоростью 15 *км/сек*, след возник на $H_{1S} = 82$ *км*, исчез вместе с болидом на $H_{2S} = 43$ *км*; как обычно, верхняя часть рассеивалась быстрее нижней, более плотной, поэтому возник «верх синий, середина алая и светлая»; по мере разрежения следа густой черный дым перешел в голубовато-белый. Таким образом, след был так плотен, что создавал собственную тень. На $H = 70$—80 *км* ширина следа была 0,4 *км*, на $H = 45$ *км* — 0,1 *км*, затем след рассеялся в ширину до 6—10 *км*, и его отдельные части к концу видимости разнеслись ветром на 40 *км* и более. Первоначальный объем следа (2,5 $км^3$) увеличился более чем в 100 раз. Судя по упавшим метеоритам, суммарная масса частиц следа составляла несколько килограммов; наиболее плотным след был при дроблении метеорита в конце траектории. «Кудрявое» (вследствие турбуленции) облачко в области задержки постоянно отмечается при падениях метеоритов.

Пылевой след при падении Сихотэ-Алинского метеорита, как потом выяснилось, состоявший из круглых шариков никелистого железа, тянулся до земной поверхности. След был широким, дымным, бурлящим и клубящимся и держался до ночи, т. е. около 8 часов. При полете желто-белого болида из него вырывались красные пламенные струи и тянулся темно-серый хвост, который в голове был черным. След полностью заслонил Солнце, которое стало просвечивать красноватым диском только после того, как он несколько рассеялся (вспомним, что печной дым тоже может закрыть Солнце, т. е. даже при малой толще уменьшить его яркость на 20 вел.). Через несколько часов след расширился до 10—15° и через него стало просвечивать голубое небо. Ночное небо в этом месте казалось значительно ярче, чем в других местах, а на следующие дни на месте следа образовывались облачные полосы конденсации, восстанавливавшие его очертания. Этому способствовала штилевая погода. Несмотря на массу метеорита (порядка нескольких сотен тонн), по наблюдениям за 300 *км*, в первой половине пути следа не было. Интенсивное дробление метеорита в воздухе на сотни кусков способствовало образованию следа; изучение поверхности метеоритов показывает (Е. Л. Кринов), что пульверизовалось не более нескольких процентов начальной массы метеорита.

23 июня 1950 г. болид —9 вел. потока Скорпионид прошел путь в 122 *км* под углом $h_R = 34°$ над Каракумской пустыней на $H = 93 - 26$ *км*; его след (рис. 239) наблюдался Астрофизической лабораторией в Ашхабаде в течение 33 мин., начиная с $H_{1S} = 47$ *км* и до конца пути [796]. Граница земной тени проходила на высоте 43 *км*. Таким образом, след освещался не прямым, а рассеянным солнечным светом. 24 сентября 1948 г. грандиозный след наблюдался из шести

областей, в том числе из Пензенской области, где он был сфотографирован Ю. Н. Петровым. По исследованию В. В. Федынского [541], воздушные течения придали следу форму спирали и в некоторых местах он казался в форме цифры 3 (рис. 235).

§ 329. Изучение пылевых следов начато в 1907 г. Траубриджем, отделившим пылевые следы от газовых и показавшим, что первые начинаются на $H_{1S} \cong 64$ *км*, тогда как вторые оканчиваются на $H_{2S} \cong 82$ *км*. Чаще всего высота $H_S = 40$ *км*. Первая фотография пылевого следа за рубежом была получена 24 ноября 1910 г. в Индии, затем 2 июня 1912 г. обсерваторией в Иоганнесбурге: блестящий след имел вид «серебряного пояса». Макс Вольф 22 мая 1911 г. видел метеор со следом $\lambda_S = 4°$, пересекшим γ Орла, вследствие чего эта звезда исчезла на 3,5 секунды. Пылевой след метеорита Зиммерн (Восточная Пруссия) 1 июля 1920 г. был отмечен до высоты 8 *км*. К 1920 г. Кальке [806] собрал данные о смещении 20 пылевых следов; Нагаока размеры пылинок таких следов оценил в 10^{-2}—$10^{-3}\mu$. В 1931 г. Шеффер заключил, что в первый момент диаметр пылевого следа составляет десятки метров.

24 марта 1933 г. на рассвете над США пролетел огромный болид. Было получено несколько снимков его следа (обычно из-за отсутствия ориентиров эти фотографии бывают сильно обесценены). Первые признаки пылевого следа заподозрены на $H = 100$ *км*, начало интенсивного свечения — на 56 *км*; здесь возникло облачко, видимое еще час спустя после восхода Солнца; в конце видимости объем следа достиг 400 $км^3$. 24 марта 1935 г. вертикальный болид над Северным морем оставил след (рис. 240, *в*), сфотографированный из двух пунктов в Голландии; метеорит Пантар (Филиппины) 16 марта 1938 г. дал след, просвечивающий сквозь перистые облака на снимке (рис. 240, *а*). Распространение пленочных камер увеличило количество этих редких снимков. В 1940 г. с самолета были получены два снимка следа, тогда же на первых цветных кинокадрах (на «кодахроме») след вышел чисто белым на голубом фоне неба. 28 сентября 1953 г. Бланшар близ Парижа снял след, превратившийся в течение часа в светлые облачка. На снимке он напоминает конденсационный след самолета, возникающий на пылинках выхлопных газов; такие следы ныне образуются за реактивными самолетами. При падении крупнейшего из известных каменного метеорита Нортон Каунти в Канзасе 18 февраля 1948 г. была получена вторая цветная фотография следа и кроме нее обычная (рис. 240, *б*). За последние годы получено еще несколько фотографий, но спектрограмм пылевых следов пока не имеется.

§ 330. Оптические свойства следов. Пылевой след образуется тогда, когда перед метеорным телом уже имеется плотная воздушная подушка горячего воздуха, плавящего метеорное тело. Часть расплавленного вещества впитывается в поры тела («зона импрегнации» и

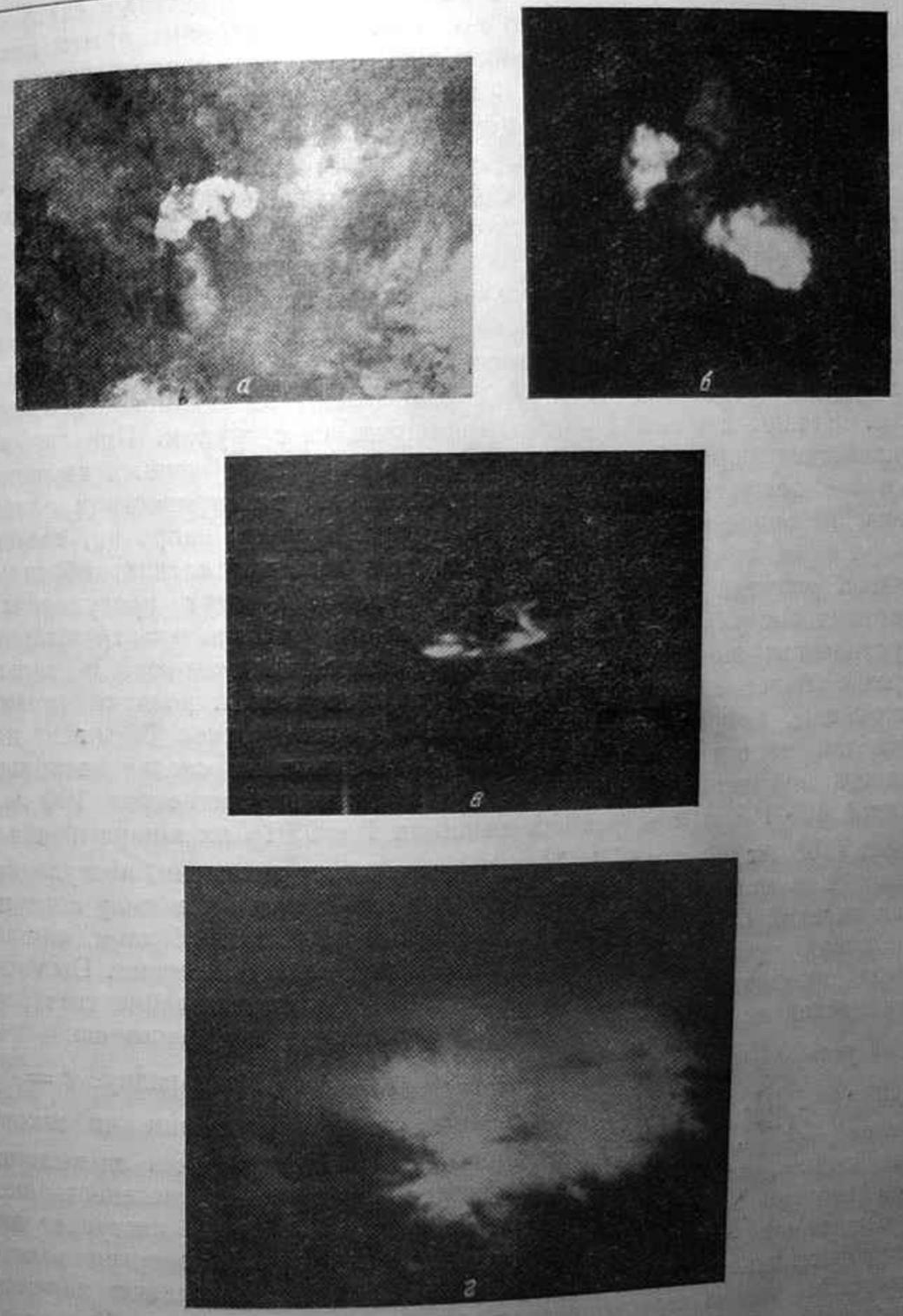


Рис. 240. Пылевые следы болидов:
а — 16 марта 1938 г. при падении метеорита Пантар (Ява), видимый днем сквозь перистые облака; *б* — 18 февраля 1948 г. при падении наибольшего каменного метеорита Нортон Каунти (вес около тонны) (по Найнигажеру); *в* — 24 марта 1935 г. над Шотландией, снят из Голландии за 500 *км* (по Блеекеру); *г* — 18 марта 1951 г. на фоне зари (по [810]).

«черные жилки» метеоритов), остальное пульверизируется и сдувается бризантным действием сжатого воздуха. Лабораторные опыты показывают, что при этом возникают пузырьки, наполненные воздухом, с тонкими стенками, которые лопаются, и части их (по закону минимальной энергии) стягиваются в мельчайшие шарики ([781], рис. 5). Механическое измельчение твердых тел не дает частиц мельче 10 μ диаметром, с особыми трудностями удается дойти до 1 μ, тогда как пульверизация жидкости происходит без труда и степень размельчения обратно пропорциональна вязкости, плотности и поверхностному натяжению. Наибольшее измельчение дают взрывы, так как ударная волна преодолевает силы сцепления. При охлаждении паров веществ, кипящих при высокой температуре, также может выделиться высокодисперсный аэрозоль. При $T > 500°$ дым из данного вещества (т. е. частицы с $a = 0{,}1—0{,}001\mu$) получается с трудом. При взрывах конденсация паров может происходить на раздробленных пылинках того же вещества. Если частицы заряжены электричеством одного знака, то они долго не слипаются друг с другом; напротив, явление *коагуляции* аналогично рекомбинации в ионных следах; обратный процесс распада есть *пептизация*. Пылинки могут коагулировать с ионами воздуха; опыт показывает, что при размере $a \approx 1\mu$ пылинки неустойчивы: коагулируя, они укрупняются и оседают, и только гораздо более мелкие пылинки могут носиться в воздухе годами. Устойчивы, например, дымы с концентрацией менее 50 *мг/м*³ или с числом частиц $n < 10^5—10^6$ на *см*³. В пылевых следах несколько килограммов вещества распределено в цилиндре диаметром 100 *м* и длиной $40 \cdot 10^3$ *м*; при размере пылинок 1 и 0,01 μ их концентрация C будет 0,03 *мг/м*³ и $n = 10^{-3}$ и 10^3 *см*$^{-3}$, следовательно, коагуляцией пылинок в метеорных следах можно пренебрегать, а в силу воздушных течений C и n уменьшаются еще более. Таким образом, «старение следа» происходит лишь за счет его развеивания ветрами. Пылинки следа производят поглощение, отражение и преломление света, но два последних явления практически сводятся к его рассеянию.

Пусть λ — длина волны света, а $\rho = 2\pi a/\lambda$, где радиус $r = \frac{a}{2}$. Если $\rho < 0{,}1$, то имеет место молекулярное рассеяние по закону Рэлея ($\sim \lambda^{-4}$). При этом независимо от того, прозрачна ли пылинка как стекло, или не прозрачна как уголь, она будет рассеивать вперед столько же света, сколько и назад. При $\rho \sim 1$ наступает дифракционное рассеяние Ми: из-за дифракции часть энергии начнет перебрасываться вепред в теневую область и возникают явления, известные нам из телескопической оптики и радиолокации. При $\rho = 6$ наступает переход к «крупным» частицам, преломление и отражение происходит по законам геометрической оптики (геометрическое рассеяние Френеля). Здесь стеклянный, угольный и зеркальный шарики будут вести себя по-разному: энергия полностью пройдет через первый шарик, ничего не отразив назад (кроме 6% за счет дифракции).

Угольный шарик поглотит энергию и только из-за дифракции пошлет ее немного в область тени. Зеркальный шарик даст назад основное количество энергии, впереди него будет тень, куда попадет лишь несколько процентов энергии из-за той же дифракции. Облако одинаковых частиц с $\rho < 0{,}1$ в малой толще будет голубоватым, в большой начнет давать тени. При $\rho > 10$ рассеяние происходит так же, как и от одного шара того же объема; даже не шарики, а палочки или лепешки, беспорядочно ориентированные, рассеивают, как этот шар, только несколько иного объема. Гораздо сильнее влияние полидисперсности, т. е. неодинаковости размеров a. Появляется добавочное рассеяние, искажающее теоретическую индикатрису рассеяния и уменьшающее поляризацию. Например, из-за пыли в воздухе небо близ Солнца кажется более ярким: здесь индикатриса направлена вперед и она тем больше вытянута, чем больше n. Пример рассеяния света назад дает «глория» — венец вокруг тени от головы наблюдателя, падающей на росу, облако или пыльную почву. Этим дифракционным явлением объясняется «Брокенский призрак» на облаке тумана. Дифракционные круги вокруг Солнца и Луны, наблюдаемые в пыльной атмосфере, в капельках воды или ледяных кристаллах облаков и замерзших окон — это примеры дифракционного рассеяния «вперед». Угловой радиус ϑ такого кольца в зависимости от его порядка k дает возможность по формуле Пертнера найти $a = \frac{k+0{,}62}{2} \frac{\lambda}{\sin \vartheta}$; например, красно-бурое кольцо при извержении вулкана Кракатау дало $a = 1{,}8\,\mu$. Дифракционные явления наблюдались при падении Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. и метеоритов Старое Песьяное 2 октября 1933 г., когда их пылевые следы проектировались на Солнце, и метеорита Первомайский Поселок — в проекции на Луну. Все эти метеориты были каменными; при $\vartheta = 6°$ и $k = 1$ имеем $a = 3{,}5\ \mu = 44\rho$, следовательно частицы этих пылевых следов — «крупные». Когда-нибудь, наблюдая пылевой след такого болида сверху, можно будет увидеть в нем глорию. Облако из «крупных» металлических шариков, которые оказываются блестящими, как велосипедные, проектируясь на Солнце или на Луну, даст более слабый ореол, но значительную тень; действительно, «железное облако» Сихотэ-Алинского метеорита дало поглощение света Солнца, как дым печной трубы — без ореола. При $a = 0{,}18\,\mu$ частицы угля в $\lambda = 0{,}5\,\mu$ поглощают 15—20% света, поэтому так велико поглощение дымом даже в тонком слое. Отсутствие окрашивания указывает на отсутствие в видимом спектре избирательного поглощения, что может быть следствием наличия частиц разных размеров. В итоге мы можем думать, что частицы метеорного следа являются крупными ($a \geqslant 1\mu$, возможно, до 10 μ и более), а потому должны рассматриваться как пылевые; дымовые меньше 0,1 μ и образованы они пульверизацией, а не испарением. Вероятно, в каждом следе и в разных его частях имеются частицы разных размеров, так как эти

следы — белые, непрозрачные и плотные уже при малом количестве материи; это имеет место при многократном рассеянии. Количество пылинок n можно найти по поглощению света: пусть Φ_0 — начальный световой поток, Φ — то же после прохождения пути L, тогда *коэффициент экстинкции* $\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi} = 2\pi n a^2$ и общее количество пыли в $г/см^3$ есть $q = \frac{2}{3} a\alpha$. В обычном тумане $a = 10\,\mu$, расстояние между капельками 4—5 *мм* и $q = 6$ *мг/м*^{3}, в густом тумане $a = 100\,\mu$, расстояние 20 *мм* и $q = 55$—60 *мг/м*^{3}. Наиболее непрозрачен туман при $r = \lambda$. С увеличением степени измельчения то же количество вещества дает большее рассеяние, однако некоторые дымы (например, от автомашин) прозрачны. В области геометрического рассеяния последнее не зависит от λ (что видно на обычных облаках). По В. В. Шулейкину, при сильном многократном рассеянии ослабление Φ идет по гиперболическому закону, а не по показательному, причем происходит осреднение спектрального состава и деполяризация. Свидетельством о наличии в метеорных следах «крупных» пылинок служит сравнительно быстрое (часы) исчезновение этих следов. Оседание пылинок с $a = 0{,}4$—$100\,\mu$ происходит по формуле Стокса со скоростью $v = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_m - \rho}{\eta}$, где ρ_m и ρ — плотности пылинки и воздуха, η — коэффициент вязкости $(1{,}8 \cdot 10^{-4})$. Частицы неправильной формы падают так, чтобы сопротивление было наибольшим, например, пластинки — плашмя, бруски — горизонтально. Для более крупных «надстоксовых» частиц сказывается инерция воздуха, сжимающегося перед частицей и замедляющей v (нам они не будут встречаться). С другой стороны, при $a \leqslant 0{,}1\mu$ размер пылинки делается сравнимым с длиной свободного пробега молекул воздуха и она начинает проскальзывать между ними, отчего сопротивление убывает и v далее уравнивается со скоростью броуновского движения, падение идет зигзагообразно; для окислов железа это найдено опытом (Винкель). Для шарика плотности 1 $г/см^3$ имеем:

Радиус шарика r, μ . . .	100	10	1	0,1	0,01	0,001
Скорость падения v (*см/сек*)	120	1,2	0,013	$22 \cdot 10^{-5}$	$11 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}

Таким образом, в разрушении метеорного пылевого следа основную роль играет не его осаждение, а развеивание ветрами, как уже отмечено выше. Для сравнения отметим, что комнатные пылинки (в луче солнечного света) имеют $a \approx 0{,}5\,\mu$. Постоянное загрязнение воздуха создают частицы с $a \approx 0{,}1\mu$. При испарении металлов в электродуге пылинки состоят из их окислов, обычно сильно заряженных. Действием ультрафиолетовых лучей пылинки также заряжаются. Участвуя в термической и динамической циркуляции и турбуленции воздуха, метеорные пылинки становятся составной частью атмосферы планеты.

ГЛАВА 30

ПАДЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

§ 331. Общие свойства траекторий. Нам уже известно, что геоцентрические траектории метеорных тел (относительно центра Земли) являются сильно распрямленными дугами гипербол, которые в первом приближении даже можно принимать за прямолинейные отрезки. Последнее применимо к обычным метеорам, но в случае проникновения в атмосферу более крупных тел кривизна траектории становится заметной и тем более, чем меньше скорость v и наклон траектории i при прочих равных условиях.

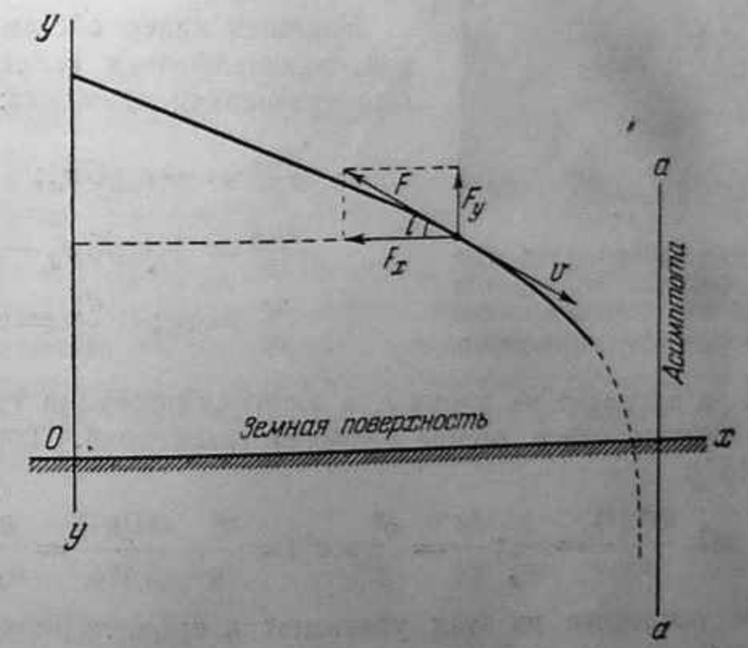


Рис. 241. Сопротивление воздуха при движении метеорного тела в атмосфере.

Напишем уравнения движения метеорного тела после того, как прекратилось его разрушение, т. е. при неизменной массе; оси координат (рис. 241) возьмем в вертикальной плоскости движения, ось OY направим к зениту, ось OX горизонтально в сторону движения и начало координат поместим в проекции на земную поверхность той

точки, где тело было в начальный момент $t=0$. Пусть закон сопротивления воздуха задан выражением $j=c_x\rho(y)vG(v)$. Имеем

$$\cos i=\frac{v_x}{v};\quad \sin i=\frac{v_y}{v}, \tag{156}$$

где v_x и v_y — проекции скорости; далее, по формуле (117),

Рис. 242. Доски забора, пробитые одним из каменных метеоритов Айова (1912 г.). Доказательство наклонного падения метеоритов.

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\frac{j}{v}\frac{dx}{dt};\quad \frac{d^2y}{dt^2}=+\frac{j}{v}\frac{dy}{dt}-g;$$

$$\frac{j}{v}=c_x\rho(y)G(v) \tag{157}$$

при начальных условиях:

$$t=0,\ x_0=0,\ y_0=H_2,$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_0=v_0\cos i;\ \left(\frac{dy}{dt}\right)_0=v_0\sin i$$

и при очевидных соотношениях:

$$v_x^2+v_y^2=v^2;\quad \operatorname{tg} i=\frac{dy}{dx}.$$

Напишем далее систему уравнений, эквивалентных вышеприведенным уравнениям движения:

$$\frac{dv_x}{dt}=-c_x\rho Gv_x;$$

$$\frac{dv_y}{dt}=+c_x\rho Gv_y-g;$$

$$\frac{dx}{dt}=v_x;\quad \frac{dy}{dt}=v_y. \tag{158}$$

Примем за аргумент не время t, а длину x проекции траектории, так как мы хотим найти общие свойства траекторий. Тогда можно написать [417]:

$$\frac{dv_x}{dx}=-c_x\rho G;\ \frac{d(\operatorname{tg} i)}{dx}=\frac{g}{v_x^2};\ \frac{dx}{dt}=\frac{v_x^2}{g}\sec^2 i=\frac{v^2}{g};\quad \frac{d(\operatorname{tg} i)}{dt}=\frac{g}{v_x}. \tag{159}$$

Возьмем последнее из этих уравнений и проинтегрируем его по времени от $t=0$ до ∞. Тогда получим

$$(\operatorname{tg} i)_\infty-(\operatorname{tg} i)_0=g\int_0^\infty\frac{dt}{v_x}=\frac{g}{v_{x_0}}\int_0^\infty dt=\infty$$

или $(\operatorname{tg} i)_\infty=\infty$, откуда $i_\infty=90°$. Это значит, что при движении в атмосфере по истечении достаточно большого времени метеорное тело стремится падать вертикально [417]. Таким образом, атмосферная траектория метеорного тела имеет как бы вертикальную асимптоту. До достижения этой асимптоты метеорит падает наклонно (рис. 242). Покажем сейчас, что эта асимптота находится на конечном расстоянии от начала координат. Проинтегрируем уравнение $dx=\frac{v^2}{g}dt$ по i от $i=i_0$ до 90° соответственно тем же моментам времени t. Тогда получим

$$x_\infty-x_0=\int_{i_0}^{\frac{\pi}{2}}\frac{v^2}{g}di=\frac{\bar v^2}{g}\left(\frac{\pi}{2}-i_0\right),$$

т. е. x_∞ — конечная величина. Здесь, как и выше, $\bar v$ означает некоторое среднее значение скорости v.

§ 332. Скорость падения также стремится к некоторому предельному значению v_k (гл. 23, формулы (118) и (119)), при котором сила сопротивления воздуха уравновешивается силой тяжести:

$$Mg=-\frac{1}{2}c_x\rho Sv_k^2;\ v_k=\sqrt{\frac{2g}{c_x\rho}}\sqrt[6]{\frac{16}{9}\frac{\rho_m^2}{\pi}}\sqrt[6]{M}.$$

При плотности метеорного тела $\rho_m=3{,}8$ *г/см*^{3} и $c_x=0{,}25$ у поверхности Земли, где $\rho=0{,}00129$ *г/см*^{3}, получим численно $v_k=35{,}5\sqrt[6]{M}$ *м/сек*. Опыты с бросанием тяжелых тел в воздухе, произведенные Мультоном (1915 г.) и Лэнноном (1924 г.), показали [815], что $v_k=36{,}3\sqrt[6]{M}$ *м/сек*. Здесь M выражено в граммах. Следовательно, ни один метеорит, масса которого $M\leqslant 10$ *т*, не достигает почвы со скоростью, превышающей 0,5 *км/сек*. Таким образом, конечные скорости падения обычных метеоритов умеренные. По глубине произведенных ими углублений в почве и другим данным были определены v_k следующих падений:

Метеориты	M (*кг*)	v_k (*м/сек*)	Источник
Миддльсбрау (Англия)	1,6	126	А. Гершель
Шелбёрн (Канада)	12,7	157	Фаррингтон
Сен-Михель II (Финляндия)	7,0	170	»
Хвиттис (Финляндия)	14,0	177	Бёргстрём
Сен-Михель I (Финляндия)	10,0	213	Фаррингтон
Марьялахти (Финляндия)	45	220	»

Для сравнения укажем, что свинцовая пуля с $M=10$ *г* имеет $v_k=40$ *м/сек*, дробинка 8—10 *м/сек*, градины диаметров 1,7, 0,1 и 0,01 *мм* соответственно 7,4, 0,78 и 10^{-3} *м/сек*. Гораздо более «обтекаемые» авиабомбы имеют следующие конечные скорости,

которые практически устанавливаются очень быстро, через несколько секунд после начала падения [819]:

Вес авиабомбы (*кг*) . .	8	16	30	74	164
Скорость v_k (*м/сек*) . .	151	162	192	231	276

При этом время падения связано с высотой зависимостью

$$H = \frac{1}{C \lg e} \lg \operatorname{ch} \left(\sqrt{gC}\, t\right). \quad (160)$$

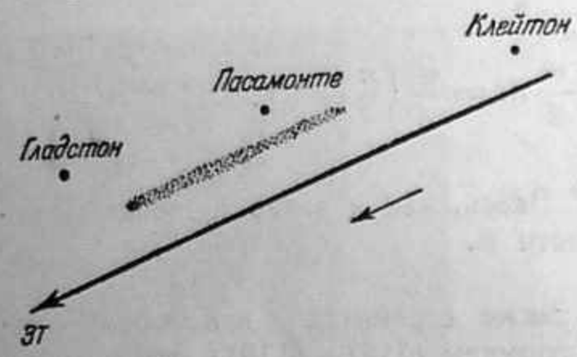


Рис. 243. Влияние ветра на положение точек падения 80 осколков метеорита Пасамонте, отнесенных к северу от проекции траектории болида. *ЗТ* — земная точка, угол наклона на траектории к горизонту $8^1/_2{}^\circ$ (по Найниджеру).

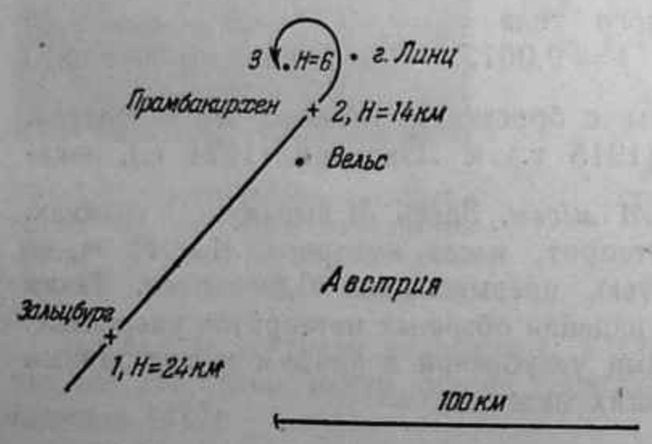


Рис. 244. Проекция бумерангообразной траектории метеорита Прамбакирхен (падение 5 ноября 1932 г.). В точке *1* наклон траектории резко изменился от 17 до 8°, в точке *2* от метеорита отделился кусок, после чего метеорит описал дугу *2—3*, радиусом 8 *км*. Упал в 2,5 *км* от проекции точки *3* (по Розенхагену).

Здесь C — некоторый параметр, в который вводится также изменение плотности воздуха с высотой H. Падение Сихотэ-Алинского метеоритного дождя 12 февраля 1947 г. дало много примеров того, что мелкие метеориты имели скорость, недостаточную даже, чтобы пробить снеговой покров, а крупные — образовывали кратеры. Метеориты промежуточных масс давали лунки, воронки; в некоторых случаях после удара о почву метеорит отскакивал.

Численный расчет движения метеорного тела на нижнем участке траектории может быть произведен методами баллистики с учетом начальной скорости, например по способу А. Н. Крылова, Вейтхен-Катта, Зейдлиц-Штюблера и др. Может быть учтен даже снос, производимый ветром. Влияние последнего, особенно на мелкие метеориты, чрезвычайно велико: они относятся в сторону на десяток и более километров, притом более мелкие из них сносятся сильнее (рис. 243). Поэтому по расположению упавших метеоритов еще нельзя судить о направлении траектории, особенно, если метеориты мелки. Последние образуются при вторжении относительно быстрых

тел, разрушающихся на большой высоте, и потому влияние ветра на них особенно заметно. Математически исследовали движение метеоритов в атмосфере Шлихтер (железный метеорит Альгома, Висконсин, США, имеющий форму диска при массе 4,1 *кг*), Вегенер (железный метеорит Трейза, Германия, падение 3 апреля 1916 г., 63 *кг*) и В. Г. Фесенков (Сихотэ-Алинский метеорит); кроме того, Розенхаген показал, что дисковидный каменный метеорит Прамбакирхен (Верхняя Австрия, падение 5 ноября 1932 г., 2,1 *кг*) на $H = 24$ *км* резко изменил угол наклона i с 17° на 8°, а с $H = 14$ *км* описал полупетлю геликоида в 240°, после чего прекратил свечение и врезался в почву под углом $i = 60°$, уйдя в пахотную землю на 25 *см* (рис. 244).

§ 333. Метеоритные дожди. Эллипсы рассеяния. Даже при проникновении одного тела в случае его дробления индивидуальные траектории его осколков могут быть очень различными. Например, при почти горизонтальном полете метеорита Саратов 6 октября 1918 г. наибольшее расстояние найденных кусков составило 130 *км*, у метеорита Каинсаз — 40 *км*, у метеорита Колд Боккевелд — 26 *км*, у метеорита Макао — 22 *км* и т. д. Это расстояние соответствует большой оси *эллипса рассеяния* (рис. 245). Составляющие одно

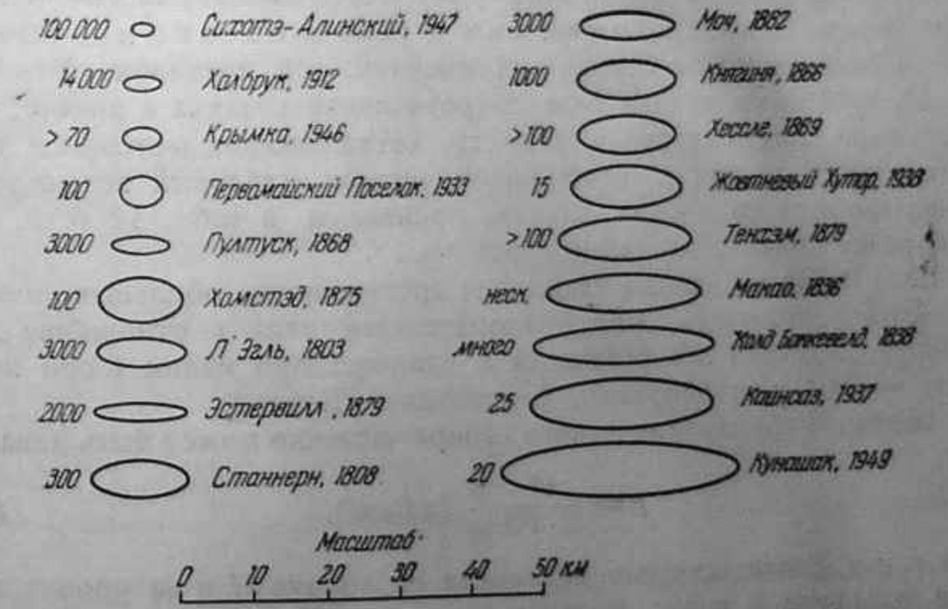


Рис. 245. Эллипсы рассеяния метеоритных дождей (слева указано число осколков).

целое (так называемые «складывающиеся») метеориты иногда падали на расстоянии нескольких километров один от другого, например, массы в 57 и 199 *кг* метеорита Богуславка в 2 *км*, массы 2200 и 36 *г* метеорита Первомайский Поселок в 2 *км* и т. д. Для падения метеорита Жовтневый Хутор 9 октября 1938 г. ($M \sim 66$ *кг*, шесть крупных осколков и семь мелких) Е. Л. Кринов восстановил

картину последовательности дробления в полете на высотах 17—7 *км*. В некоторых случаях при дроблении осколки отбрасываются вбок; на метеорных фотографиях видно, что угол с траекторией при этом тем больше, чем сильнее был взрыв. В случае метеоритов это приводит к тому, что эти осколки оказываются в стороне от проекции траектории или большой оси рассеяния остальных кусков, иногда на расстоянии до 3—5 *км*.

Во всех случаях, когда по расположению воронки или пробитых отверстий в зданиях, деревьях и т. д., можно было восстановить направление полета, последнее было близко к отвесному, хотя и не вполне ($i = 55$—$90°$). Это значит, что траектория была сравнительно удалена от вертикальной асимптоты (рис. 242). Более мелкие куски, находясь в тыльной части эллипса рассеяния, должны падать под более крутыми углами.

Выше указывалось, что температура упавших метеоритов, в тех случаях, когда ее можно было оценить тотчас после падения, оказывалась незначительной: метеориты падают обычно теплыми, редко горячими; железные метеориты благодаря большей теплопроводности падают горячими чаще.

Дробление метеорного тела в атмосфере может зайти так далеко, что в случае падения метеоритов имеет место *метеоритный дождь*; такие дожди бывают каменными и реже железными. Одиночные падения являются скорее исключением, чем правилом. Это указывает, насколько велика сила сопротивления воздуха в полете, превышающая силу сцепления веществ, составляющих метеорное тело. Метеоритные дожди с наибольшим числом отдельных экземпляров, наблюдавшиеся со времен Хладни, приведены в табл. 12 (стр. 503) (в порядке количества экземпляров *)).

Если привлечь данные также для других, менее обильных, дождей, то можно заключить, что с возрастанием угла i отношение осей эллипса рассеяния a/b стремится к единице; при малом i оно может быть $\sim 0{,}01$, как например, у метеорита Саратов.

Величина аэродинамического напора численно может быть дана так:

$$p = \frac{v^2}{8 \cdot 10^4} \frac{\rho}{\rho_0} \ (кг/см^2), \qquad (161)$$

где ρ и ρ_0 соответственно плотности на высоте H и на уровне моря а v выражено в *м/сек*. Возьмем умеренную скорость $v = 15$ *км/сек*. Тогда динамическая нагрузка на высотах $H = 0$, 15 и 35 *км* составит соответственно 2800, 280 и 28 *кг/см²*. Заметим, что земные горные породы имеют предельную допустимую нагрузку на сжатие K_b от нескольких десятков до нескольких сотен *кг/см²* и лишь наиболее прочные — порядка 10^3 *кг/см²*. Поэтому дробление наступает при

*) Из них Сихотэ-Алинский метеорит — железный, Эстервилл железо-каменный, прочие — каменные.

Таблица 12

Метеоритные дожди

Метеоритный дождь	Дата	Угол падения i	Высота H_2 (*км*)	Скорость v (*км/сек*)	Число метеоритов	Общая масса (*т*)	Эллипс рассеяния (*км*)
Сихотэ-Алинский, СССР	1947 II 12	54°	10	15?	Много тысяч	>500?	3,0 × 1,0
Пултуск, Польша	1868 I 30	44	42	27,5	100 000? (собрано 3000)	0,5?	8,0 × 1,6
Холбрук, США	1912 VII 19	25	<50	—	14 000	0,22	4,8 × 1,0
Моч, Румыния	1882 II 3	18	8	—	3 000	0,30	14,5 × 3,0
Л'Эгль, Франция	1803 IV 26	15	—	—	2000—3000	0,04	12,0 × 4,0
Эстервилл, США	1879 V 10	—	—	—	1000—2000	0,32	12,9 × 1,9
Княгиня, СССР	1866 VI 9	63	12	—	>1000	0,5	14,5 × 4,8
Станнерн, Чехословакия	1808 V 22	25	22	—	200—300	0,05	12,9 × 4,8
Хессле, Швейцария	1869 I 1	15	—	—	>100	0,02	14,5 × 4,8
Тенхэм, США	1879, весной	—	—	—	102	0,16	19,3 × 4,8
Хомстэд, США	1875 II 12	16	4	18	100	0,23	11,2 × 6,4
Первомайский Поселок, СССР	1933 XII 26	60	7	40?	97	0,05	6,0 × 4,0

$K_b < p$, т. е. H выше для менее прочных или для более быстрых метеорных тел. Какого-либо одного уровня высот, где дробление или резкое торможение наблюдались бы чаще, — не существует.

§ 334. «Цепные падения». С падением метеорита Пултуск связано явление, названное А. Брезиной «цепным падением»: он сообщает, что близ Леричи (залив Специя, Италия) в тот же час упал метеорит такого же состава. Леричи лежит на обратном продолжении траектории метеорита Пултуск, но на 1600 *км* южнее ее; таким образом,

оба метеорита могли двигаться по параллельным путям до встречи с Землей. Возможно, им же принадлежит еще один такой же метеорит из Носи-Бе (Мадагаскар). Известна «метеорная процессия» 200—400 болидов, прошедших 9 февраля 1913 г. несколькими группами на разной высоте вдоль дуги большого круга от Канады до Бермудских островов на расстоянии 8000 *км* (рис. 243).

Рис. 246. Траектория «процессии» болидов 9 февраля 1913 г. на географической карте в гномонической проекции. Указано положение кораблей, с которых произведены наблюдения. От Онтарио до «Ньюлендса» 7000 *км*, пройденные болидами за 10 минут.

Среди метеоритных падений прошлого, непосредственно не наблюдавшихся, следует назвать метеорит Гибеон (Намаленд, Ю.-З. Африка). Здесь на обширной площади с центром $\varphi = 25°{,}5$ ю. ш., $\lambda = 18°{,}0$ в. д. за период 1838—1930 гг. найдены 54 железные массы одинакового состава; наибольшая из них 1685 *кг*, суммарный вес более 16 *т*. Имеются и другие случаи групповых находок метеоритов тождественного состава, например, метеориты Толука в Мексике: основные экземпляры (наибольший 100 *кг*) найдены у Ксиквипилько (19°34′ с. ш., 99°34′ з. д.), а другие между $\lambda = 97°$—$104°$ и $\varphi = 17°{,}5$—$20°{,}5$. Число таких «парных», «тройственных» и т. д. находок не менее 50, судя по каталогу Прайора — Хея [831]. Расстояния между компонентами могут доходить до 500 *км*. На севере Чили была найдена замечательная группа гексаэдритов: не менее 12 экземпляров рассеяны на площади 240 *км* по долготе и 130 *км* по широте близ Антофагасты; главная масса находилась в середине группы, так что падение, по-видимому, было близко к отвесному (т. е. $z_R \sim 0°$).

Из всего сказанного, в частности, видно, как различны могут быть траектории падения метеорных тел, даже вышедших из одного радианта.

§ 335. Падение метеоритов. Это явление известно человеку еще в доисторическое время: в руинах Эльдер Пуэбло (Аризона) в 1928 г.

в каменном ящике был найден мезосидерит в 24 *кг*, тотчас распавшийся; в доисторическом могильнике индейцев Иллинойса в Хаване в 1949 г. обнаружены два кусочка железного октаэдрита; в 1911 г. в 80 *км* южнее Каира в додинастическом погребении Герзех было найдено окисленное метеоритное железо (бусы) и то же — в 1928 г. при раскопках погребения Ура (Ирак), имеющего давность около 5000 лет. В 1867 г. найден завернутым в полотно древними мексиканцами в развалинах храма октаэдрит Казас-Грандес весом 1,6 *т*; в 1921 г. в индейском погребении — атаксит Навахо (Аризона) в 1,5 *т*; на алтарях древнего могильника Литтл Майами (Огайо, США) в 1884 г. несколько палласитов (один со следами ковки) и в 1902 г. на алтаре другого могильника Хопуэлл Мундс (Огайо) — октаэдрит весом в 130 *г*. В СССР с 1843 г. известен хондрит Бердянск в 2365 *г*, вынутый из могильного кургана.

На конец 1952 г. общее число найденных метеоритов, падение которых не наблюдалось («находки»), составляло 819; кроме того, имелось 27 сомнительных находок. Среди находок преобладают железные, так как их легче обнаружить, кроме того, они крупнее, ибо дробятся в воздухе меньше вследствие большей прочности; имеется свыше 20 железных метеоритов массой более тонны, но нет ни одного каменного метеорита массивнее 1 *т*, так как они дробятся не только в полете, но и при ударе о почву. Поэтому необходимо различать общую массу падения от массы наибольшего метеорита, а кроме того, массу упавшего метеорита от массы, дошедшей до исследователя. Например, масса Тунгусского метеорита оценивается в $40 \cdot 10^3$ *т* [82], но в руки исследователей попала лишь метеоритная пыль из проб почвы, взятых с места падения еще Л. А. Куликом *). Масса Сихотэ-Алинского метеорита, наибольшая для наблюденного падения, оценивается в 500—1000 *т*, из которой после падения в нерассеянном виде уцелело менее 100 *т*, а наибольший экземпляр имеет массу 1,8 *т*; наибольшую массу в одном экземпляре имеет метеорит Гоба (Ю.-З. Африка), найденный в 1920 г.; около трети его окислилось после падения, остаток весит около 60 *т*. Этот метеорит, вероятно, двигался по очень пологой траектории и потому, потеряв скорость, почти не углубился в почву. Также на поверхности Земли лежали на мысе Йорк в западной Гренландии четыре метеорита массой в 36, 3,5, 3 и 0,4 *т* (ныне в музеях); они выпали в ледниковую эпоху на поверхность ледника, а когда тот стаял, мягко опустились на почву. Наибольший каменный метеорит (1 *т*) упал 18 февраля 1948 г. (Нортон Каунти, Канзас), в сопровождении свыше 100 более мелких. Метеоритов с наблюдавшимся падением, дошедших до нас, на конец 1952 г. известно 683, не считая 121 сомнительного случая. Таким образом, ныне

*) См. А. А. Явнель, Метеоритное вещество с места падения Тунгусского метеорита, Астр. журнал **34**, № 5, 794—796, 1957.

известно 1502 разных метеорита с числом экземпляров в каждом из них от 1 до многих тысяч, с общим весом всех собранных падений около 500 тонн. Мода распределения масс лежит на значении порядка 10 *кг*, так как более крупные падают реже, а более мелкие труднее найти. Средний вес одного падения 30 *кг*, при среднем расстоянии наблюдателя от места падения $r = 125$ *м*. В следующей таблице нами даны оценки r в зависимости от падающей массы M.

Масса M (*г*) . .	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Расстояние r (*м*)	0,3	0,6	1,3	2,5	5	10	25	80	250	10^3	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	10^5

Ежегодный прирост количества метеоритов в коллекциях порядка 10 (за последние 15 лет). Среди падений — 4% железных, 94,5% каменных и около 1,5% железокаменных (П. Н. Чирвинский, 1924 г. *)), причем средний вес одного каменного падения 20 *кг*, железного 33 *кг*, так как первые легче разрушаются. По весу процентное соотношение падений есть 6 : 88 : 6.

§ 336. Суточная и годичная вариация падений метеоритов определяется условием минимальной скорости v_g движения метеорита, т. е. положением антиапекса. Последний кульминирует на наибольшей высоте над горизонтом в северном полушарии весной, в 18 час. местного времени. Однако для того, чтобы упавший метеорит был замечен и поднят, нужно чтобы он упал в светлое время суток, наиболее оптимальные условия которого — летнее солнцестояние и полдень. Поэтому под действием обоих требований годичный максимум падений оказывается в мае, а суточный около 15 час. Более 100 метеоритов из Индии указывают «провал» на годичной кривой в июле (период дождей). Географическое распределение поднятых метеоритов определяется плотностью населения, уровнем его культуры и активностью исследователей. В действительности падения происходят равномерно по поверхности Земли (вероятно, с убыванием от экватора к полярным областям); по Найниджеру, на 1 $км^2$ за последние 15 000 лет приходится два падения. Отмечено не менее 30 случаев попадания метеоритов в строения. Из сопоставления этого и других фактов можно заключить, что на Землю в целом происходит одно падение метеорита крупнее 0,1 *кг* каждые четверть часа (около 30 тыс. в год). Несколько раз в столетие происходят падения, подобные Сихотэ-Алинскому, 2—3 раза в тысячелетие — типа Тунгусского. Среднее количество вещества, привносимое метеоритами за год, не менее 10^3 *т*, не считая продуктов разрушения в воздухе. Наименьшие известные метеориты (индивидуальные, полностью покрытые корой плавления) найдены в метеоритных дождях Хессле, Холбрук и Сихотэ-Алинском (в последнем случае Е. Л. Криновым

*) По Хею (1950 г.) это соотношение 6 : 92 : 2.

найден экземпляр в 0,17 *г*.); вне роя такие отдельные метеориты найти трудно; например, метеорит Аба (Япония) в 0,19 *г*. обнаружен при падении на трехлетнюю девочку 28 апреля 1927 г. Достоверных случаев попадания метеоритов в людей имеется несколько; за последние два века это были легкие ранения, но по летописным данным имели место также и смертельные случаи. Чаще отмечены попадания в домашних животных.

§ 337. Движение на низшем участке траектории соответствует проникновению метеорита в почву до его остановки. Рассмотрим сферический и ориентированный метеориты [816]. Пусть при образовании ямы сила сопротивления $R = F_1 + F_2$, где F_1 — часть, идущая на преодоление сил сцепления и трения, не зависящих от скорости v, а часть F_2 идет на сообщение импульса смещаемым частицам почвы. В случае сферического метеорита $\frac{dv}{dt} = -\frac{R}{M}$, $R = K_1 S + K_2 v^2$, где S есть площадь миделя, а K_1 и K_2 — параметры, находимые опытом. Пусть $u = \frac{K_1 S}{K_2} > 0$, тогда основное уравнение движения на низшем участке траектории будет

$$\frac{dv}{dt} = \frac{SK_1}{M}\left[1 + \frac{v^2}{u^2}\right]. \tag{162}$$

Пусть в момент t от начала углубления величина углубления есть Δ; тогда

$$v\,dv = -\frac{K_1}{M} S\left[1 + \frac{v^2}{u^2}\right] d\Delta;$$

интегрирование дает

$$\Delta = \frac{u^2}{2K_1} \frac{M}{S} \ln \frac{u^2 + v_k^2}{u^2 + v^2}, \tag{163}$$

т. е. глубина проникновения пропорциональна поперечной нагрузке $\frac{M}{S}$ и зависит от начальной скорости v_k. Глубину ямы при остановке метеорита Δ_k получим, полагая $v = 0$,

$$\Delta_k = \frac{u^2}{2} \frac{M}{S} \frac{1}{K_1} \ln\left(1 + \frac{v_k^2}{u^2}\right), \tag{164}$$

причем $\frac{M}{S} = \sqrt[3]{\frac{16}{9} \frac{\rho_m^2}{\pi}} \sqrt[3]{M}$, а v_k известно из (119). Для обычной почвы $K_1 = 30$—100 *кг/см²*, $u = 70$—170 *м/сек* (по старым данным артиллерийских стрельб сферическими снарядами [823]). При $c_\infty = 0{,}25$, $\rho_m = 3{,}81$ численно имеем

$$\Delta_k = 2{,}32 \frac{u^2}{K_1} \sqrt[3]{M} \lg\left(1 + 12{,}6 \cdot 10^6 \frac{\sqrt[3]{M}}{u^2}\right). \tag{165}$$

Еще в 1933 г. Фишер [670] заметил, что эмпирически Δ_k пропорционально $\sqrt[3]{M}$. Найнинджер приводит данные о Δ_k для разных групп метеоритов в зависимости от массы M, откуда можно (при $K_1 = 50$ *кг/см²* и $u = 100$ *м/сек*) найти:

Масса (*кг*)	$<22{,}3$	22,7—45,4	45,4—90,0	90,8—181,8
Число метеоритов	32	6	7	5
Средняя масса M (*кг*) . .	9,2	28,6	63,2	151,0
Среднее Δ_k (*см*)	50,8	80,0	107,5	233,6
Вычисленное Δ_k (*см*) . .	50,0	87,8	129	194
Разность (%%)	$+1{,}6$	$+9{,}8$	-20	$+16$

По Маневскому, при $v = 402$ *м/сек* снаряд $M = 2$ *кг* углубляется в глинистую землю ($K_1 = 34{,}5$ и $u = 112$) на 327 *см* с отклонениями 283—372 *см* ($\pm 13{,}5\%$). Так как Δ_k зависит от вида почвы, то при описании обстоятельств падения на ее тип надо обращать внимание. Обратив формулу (164) и измерив Δ_k, можно найти конечную скорость падения метеорита v_k. Очевидно, что железные метеориты должны углубляться в почву больше, что действительно и наблюдается.

Обратимся к ориентированным метеоритам с конической фронтальной частью. Пусть вектор силы R образует угол δ с касательной к траектории. Напишем уравнения движения в форме Эйлера:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{R}{m}\cos\delta; \quad \frac{v^2}{r} = \frac{R}{m}\sin\delta.$$

Поскольку

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{dv}\frac{dv}{dt} = \frac{R}{m}\frac{\sin\delta}{v};$$

$$\frac{di}{dv} = \frac{R}{m}\frac{\sin\delta}{v}\frac{m}{R\cos\delta},$$

то

$$di = -\operatorname{tg}\delta\,\frac{dv}{v}.$$

Разделив переменные и интегрируя по i от $i = i_0$ до i при изменении скорости v от v_k до v, а также вынося среднее значение $\overline{\operatorname{tg}\delta}$ за знак интеграла, получим

$$i = i_0 + \overline{\operatorname{tg}\delta}\ln\frac{v_k}{v}. \tag{166}$$

Отсюда следует, что при остановке ($v = 0$), поскольку вообще $\overline{\operatorname{tg}\delta} \neq 0$, угол i может быть как угодно велик. Практически это означает, что положение оси ориентированного метеорита на дне ямы неопределенно. Наблюдения за воронками продолговатых снарядов показывают, что их траектории плоские, а кривизна траектории растет к ее концу. На эти обстоятельства следует обращать внимание при падениях метеоритов.

§ 338. Форма лунки (воронки) может быть найдена из подтверждаемого баллистикой допущения, что объем ее V пропорционален энергии $\frac{Mv_k^2}{2}$. Пусть r есть радиус воронки на расстоянии Δ от отверстия. Если $\frac{Mv_k^2}{2} = CV$, то оказывается, что

$$-Mv\,dv = C\pi r^2\,d\Delta, \qquad \frac{r^2}{r_m^2} = \frac{K_1}{C}\left(1 + \frac{v^2}{u^2}\right),$$

где r_m — радиус метеорита; на дне воронки $v = 0$ и $r = r_m$, откуда $C = K_1$. Тогда уравнение кривой, производящей при вращении поверхность воронки, будет

$$r = r_m\sqrt{1 + \frac{v_k^2}{u^2}}\exp\left(-\frac{S}{M}\frac{K_1}{u^2}\Delta\right), \tag{167}$$

а радиус наружного отверстия есть $r_0 = r_m\sqrt{1 + \frac{v_k^2}{u^2}}$, откуда следует, что это отверстие тем больше, чем больше радиус метеорита, его конечная скорость v_k и мягкость грунта. Например, при $v = 50$—200 *м/сек* и $u = 90$ *м/сек* r_0 более r_m в 1,1—2,4 раза.

§ 339. Длительность углубления. Из основного уравнения движения в почве (162) определяем dt и интегрируем по v от $v = v_k$ до v, что дает

$$t = \frac{u}{K_1}\frac{M}{S}\left[\operatorname{arctg}\frac{v_k}{u} - \operatorname{arctg}\frac{v}{u}\right]. \tag{168}$$

Полная длительность t_k углубления до $v = 0$ и $\Delta = \Delta_k$ есть

$$t_k = \frac{M}{S}\frac{u}{K_1}\operatorname{arctg}\frac{v_k}{u} = \frac{2\Delta_k}{n}\operatorname{arctg}\frac{\frac{v_k}{u}}{\ln\left(1 + \frac{v_k^2}{u^2}\right)}. \tag{168а}$$

Например, при $u = 90$ *м/сек* два метеорита с $M = 9{,}2$ и 151 *кг* и $v_k = 163$ и 258 *м/сек* дадут $\Delta_k = 50$ и 194 *см* и $t_k = 0{,}0082$ и 0,0240 *сек*. Подобное резкое проникновение метеорита в почву вызывает своеобразный звук («клевок»).

§ 340. «Пробивная способность» метеоритов может быть найдена из рассмотрения сопротивления пластинки, пробиваемой метеоритом, при ее толщине d и сопротивлении срезыванию K_b. Сдвигающее усилие $P\Delta K_b$ пусть расположено по периметру P; оно вызывает ускорение $\frac{1}{g}\frac{dv}{dt} = -K_b\frac{P\Delta}{M}$ при скорости $v = \frac{d\Delta}{dt}$.

Исключив время t, разделяя переменные и интегрируя, получаем $d=\sqrt{\frac{M}{P_g K_b}}v_k$. Для железных пластин $K_b=5\cdot 10^7$; вышеупомянутый метеорит массой 9,2 *кг* и радиусом $r_m=8$ *см* на пределе может пробить такую пластину толщиной $d\sim 3$ *см*. Фактически толщина d, вероятно, ниже из-за тепловых потерь. На пробивную способность, а также на глубину воронки Δ_k также сильно влияет форма метеорита.

§ 341. Метеоритные кратеры. Мы видели, что конечная скорость падения v_k метеорного тела зависит от его массы M. При достаточно большой M величина v_k может достигнуть такого значения, при котором в момент остановки начнет разрушаться кристаллическая решетка метеорного тела. Последнее начнет вести себя, как сильно сжатый газ, так как силы молекулярного сцепления будут малы сравнительно с кинетической энергией движения. Упорядоченное движение молекул, образующих метеорное тело, при ударе переходит в беспорядочное, т. е. тепловое. Таким образом, при внезапной остановке метеорного тела (удар о почву) возникает мгновенный взрыв. Это явление происходит при $v_k=4$—5 *км/сек*; при меньших v_k происходит частичное парообразование и плавление, хорошо известное из опыта минувшей войны. Свинцовая пуля частично плавится уже при $v=750$ *м/сек*, при $v=1\,200$ *м/сек* начинается частичное парообразование.

Со скоростью $v_k=5$ *км/сек* достигнуть поверхности Земли могут лишь тела массой не ниже $M=8\cdot 10^3$ *т*. Метеориты с меньшей массой, например Сихотэ-Алинский, не произведут полного эффекта испарения, тогда как тела типа Тунгусского метеорита ($M\sim 40\cdot 10^3$ *т*) должны перейти в газ. В таком случае здесь применимы законы газовой динамики [825]. От точки падения в земной коре распространится мощная ударная волна, превращающая в сильно сжатый газ часть объема V; разрушение идет до тех пор, пока $E+\frac{u^2}{2}\geqslant E_k$; здесь E есть плотность внутренней энергии, равная $\frac{p}{2}(V_0-V)$, u—скорость газа за фронтом волны, равная $\sqrt{p(V_0-V)}$, причем V_0 есть начальный удельный объем, V — объем в данный момент, $E_k=\frac{v_k^2}{2}$ — энергия разрушения при минимальной v_k и p — давление на фронте волны. Обозначив показатель политропы газа через n ($n\sim 3$ согласно опытным данным Бриджмена), плотность газа через ρ_0 и метеорита через ρ_m, и задав параметр $\eta\approx\frac{1}{6}$, можно найти радиус зоны испарения R:

$$\frac{R}{r_m}=\sqrt[3]{\frac{3\eta}{2}\frac{\rho_0}{\rho_m}\frac{n+1}{n-1}\frac{a^2}{v_k^2}} \qquad (169)$$

Средняя плотность энергии в зоне разрушения есть $\bar{\varepsilon}=\frac{3}{2}\eta\frac{n+1}{n-1}\varepsilon_k$. Реальные горные породы имеют $\varepsilon_k=3$ *кал/г*, что дает критическую скорость $v_{кр}=5$ *км/сек* и $\bar{\varepsilon}=1{,}5$ *кал/г*. Известно, что взрывчатые вещества (ВВ) создают плотности энергии $\bar{\varepsilon}=1{,}0$—$1{,}5$ *кал/г*. Таким образом, действительно при скорости $v_{кр}=5$ *км/сек* метеорит будет вести себя, как равная масса ВВ, а при бо́льших скоростях будет ее значительно превосходить. Объем зоны разрушения может в десятки и сотни раз превосходить объем метеорного тела. Поскольку взрывом продукты разрушения выбрасываются, то астрогеофизическое новообразование на земной коре будет иметь вид впадины, которую условимся называть *метеоритным кратером* (см. рис. 4). Глубина его определяется теорией неупругого удара $v_{кр}=v_к\exp(-\pi r_m\rho_0 l/m)$, причем $\pi r_m\rho_0 l$ есть масса почвы в канале длины l, образованном метеоритом. Если $v_{кр}/v_k=0{,}01$, то $l=6r_m\frac{\rho_m}{\rho}=(6\div 18)r_m$ и вещество метеорита останавливается у границы разрушения, т. е. дна кратера. Практически найдено, что радиус кратера r и масса выброшенного вещества M_b связаны уравнением $M_b=Kr^3$; если выражать M_b в килограммах, а r в метрах, то $K\sim 1$, и тогда $r^3=2\left(\frac{v_к}{v_{кр}}\right)^2 M_b$.

Теория нестационарных процессов указывает, что при метеоритном взрыве средняя скорость выброса частиц вещества будет около 3 *км/сек*, причем 50% их будет иметь скорость более 3 *км/сек*, 10% — более 5 *км/сек*. Таким образом, при ударе метеорита о небесное тело, лишенное атмосферы, последнее больше теряет массы, чем ее получает. Это может быть причиной разрушения астероидов.

Первый метеоритный кратер на Земле был найден Барринджером в 1891 г. в Аризоне. В 1927 г. Вегенер и Мейер заподозрили метеоритное происхождение эзельских кратеров Каалиярв, доказанное затем И. А. Рейнвальдом. В 1929 г. автор объяснял бурелом и отсутствие осколков Тунгусского метеорита его полным испарением при падении, поскольку метеорит шел навстречу Земле и его скорость была очень большой. В 1931 г. в Хенбёри (Центральная Австралия) Олдермен открыл группу новых метеорных кратеров, а в 1932 г. Пильби — еще одну в Аравии (Вабар). На следующий год были обнаружены кратеры Гран-Чако в Аргентине. Близ г. Хевилэнда (Канзас) Найнинджер нашел кратер, заполненный обломками палласитов; скорость v_k падения метеоритов здесь была недостаточной для полного кратерообразования и этот кратер представляет собой переходный тип между метеоритной ямой и кратером, как и некоторые Сихотэ-Алинские кратеры. В послевоенные годы обнаружен ряд других кратеров, из них наибольший Унгава в Квебеке (Канада). Кроме того, заподозрено, но пока не доказано метеоритное происхождение ряда аналогичных образований, в том числе в древних геологических формациях (так называемые криптовулканические структуры).

Метеоритные

№	Название кратера	Год открытия, автор	Число кратеров	Размеры наибольшего кратера (м)		
				диаметр	глубина	высота вала
1	Каньон Дьявола, Аризона, США	1891 Барринджер	1	1207	174	40—50
2	Одесса, Техас, США	1927 Селлардс	2	162	5,5	0,5—1
3	Каалиярв, о-в Саремa (Эзель), ЭССР	1922—1928 Калькун, Вегенер, Рейнвальд	7	110	11	6—7
4	Подкаменная Тунгуска, СССР	1927 Кулик	?	?	?	?
5	Хэнбёри, Центр. Австралия	1931 Олдермен	13	220 × 100 (двойной)	15	(0,5?)
6	Вабар, Аравия	1932 Пильби	2	110	12	?
7	Хевилэнд, Канзас, США	1929—1933 Найнинджер	1	17 × 11	2	0,1?
8	Гран-Чако, Аргентина	1933 Спенсер	Неск.	78—65	5	1,2
9	Бокс-Холл, Центр. Австралия	1937 Мадиган	1	170	10—15	—
10	Далгаранга, Зап. Австралия	1938 Симпсон	1	23	4,5	—
11	Вулф-Крик, Зап. Австралия	1947 Ривес; Сов	1	850	50	27
12	Унгава, Квебек, Канада	1946—1950 Чабб	1	3390	248	108
13	Сихотэ-Алинь, СССР	1947 Шипулин, Ярмолюк и др.	122	28	6	1
14	Шингетти, Ауэллул, Адрар, Зап. Сахара	1920—1950 Лакруа, Монод	1	250	—	—
15	Тенумер, там же	То же	3	1800	100	—

на поверхности Земли

Таблица 13

Азимут радианта, a_R	Тип метеорита. Наиб. масса (кг). Число кусков	Примечания
СВ	Октаэдрит; 693; тысячи	Много тысяч рваных осколков, общая масса >30 *т*. Силикаглас, горная мука раздробленных пород, микрошарики Fe 1,2 *т/км²* на площади 250 *км²*
Z	Октаэдрит; 97; >1500	Известен с 1921 г. Куски метеорита сильно окислены
ЮЮВ	Атаксит-октаэдрит; 0,024; 30	На площади 0,25 *км²*. Горная мука. Мелкие осколки. Известен с 1927 г.
Ю	Железный. Раздробился	Микроосколки Fe, Ni. Магнетитовые шарики 30—60 μ. Энергия падения 10^{22}—10^{23} *эрг*. Наибольший с наблюдавшимся падением
ЮЗ	Октаэдрит; 299; 1500	На площади 1,25 *км²*. Неск. тонн рваных осколков, у крупных кратеров силикаглас
	Октаэдрит; 11; >10	Возможны другие кратеры, засыпанные песком. Рваные осколки; микрошарики Fe 0,5—25 μ
ЮЗ	Палласит; 450; много	Известен с 1885 г. (метеориты Бренхэм). В кратере 40 *кг* окисленного палласита, силикагласа нет (переходный тип к пробоине)
Ю	Атаксит; 1500; десятки	Рваные осколки, горная мука, силикаглас. Известен с 1576 г. (метеориты Отумпа по несколько *т*), до 160 *км²*
	Октаэдрит; 82; много	Обломки типа Хэнбёри, но без силикагласа
	Железный; много мелких	Сильно окисленные рваные осколки, силикаглас
ЮЗ	Октаэдрит?; 13?; много	Действие сильного взрыва. Наибольший кратер; найден с воздуха. Залит водой. Выбит в граните, возможны мелкие кратеры поблизости
ЮЗ	Неизвестно	Кратерное поле 2,4 *км²*. Переходный тип от кратера к пробонне. Микрошарики, разорванные куски, без силикагласа
С	Октаэдрит; 1745; тысячи	
ЮЗ	Атаксит; $>2 \cdot 10^6$	Четыре кратера расположены с СВ на ЮЗ на линии, от Ауэллула в 175 *км* (Ришат), 375 *км* (Тенумер), 570 *км* (Темининшат-Гхалламан); метеориты найдены в первом; наибольший третий кратер (Тенумер). Очень крупная масса атаксита утеряна близ Шингетти
ЮЗ	Не найдены	

Таким образом, общее число несомненно метеоритных кратеров составляет свыше 160 (табл. 13). Кроме них, имеются еще другие пункты земной поверхности, где найдены разорванные куски метеоритного железа, либо силикаглас, но кратеры неизвестны. Напомним, что *силикаглас* — сплавленные действием высокой температуры земные породы, в частности песок пустынь [23], а разорванные и перевитые куски метеоритного железа не встречаются помимо кратеров. Имеется также несколько кратеров, подозреваемых в метеоритном происхождении (табл. 14).

Таблица 14

Возможные метеоритные кратеры

№	Название	Год открытия, автор	Размеры, (*м*)	Тип метеорита	Примечания
1	Ургайлык-Чинге, МНР	1923 Перман	Неизвестен	Атаксит	Известен с 1913 г. Общая масса 80 *кг*, разорванные куски сильно окислены
2	Маунт Дарвин, Тасмания	1933 Спенсер	Разрушен ледником	Кам.?	Большое количество силикагласа (тасманит). Известен с XIX в.
3	Мургаб, Памир, СССР	1927 Клявин, 1951 Бахарев	70×16×?	Кам.?	Черноватый ожог и оплавление известняка и стекла. Упал, по преданию, 250 лет назад. Карст?
4	Телимзане, Алжир	1954 Карпов	1800×65?	?	Пласты подняты на 15°—60°, выбросы глыб из известняка

Кроме перечисленных кратеров имеется не менее 20 образований, в которых метеориты не обнаружены, но происхождение которых затруднительно объяснить иначе. К их числу Калькун (1933 г.) относит Венгерскую впадину, ограниченную Трансильванскими Альпами, Бун и Олбриттон — огромный кратер Вредефорт (Южно-Африканский Союз), диаметром 120 *км*, возникший еще в докаменноугольный период, ряд ископаемых кратеров невулканического происхождения диаметром 1,6—9,6 *км* в США, геологический возраст которых колеблется от силура до плейстоцена (400—0,5 млн. лет), а также кратеры Амак (Алеутские острова), Элегант (Мексика), Арнхэм Лэнд (Австралия), Флинн-Крик (Теннеси), Кёфельс (Тироль), Кабреролль (Франция), Сиерра-Мадера (Техас) и др.

Отметим, что при явлении кратерообразования давления могут иметь очень высокие мгновенные значения и должна начинаться (при $p \geqslant 10^5$ *ата*) атомная ионизация (Бриджмен), а при еще больших p атомы переходят в состояние вырожденного газа Ферми.

§ 342. Тунгусское и Сихотэ-Алинское падения являются самыми крупными из наблюдавшихся; каждое из них имеет большую литературу. Тунгусский метеорит [822] упал в 0 ч. 16 мин. миров. врем. 30 июня 1908 г. в верховьях Подкаменной Тунгуски в ненаселенном районе. Пылевой материал, простиравшийся на запад до Атлантического океана, вызвал необычную «белую ночь». Болид летел с юга на север, при солнечном свете, производя мощные световые, акустические и механические явления. Его траектория, длиной свыше 1000 *км*, имела очень малый наклон к горизонту, так что последние 60—80 *км* он прошел на «бреющем полете», причем мощная баллистическая волна произвела сильный бурелом тайги (разрушительное действие воздушной волны ныне хорошо известно даже при низком полете тяжелых самолетов, производящих зону разрушения до 200 *м* шириной). Возникла гиперсейсма, отмеченная приборами в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и даже в Иене за 5700 *км*. Удар о почву сопровождался явлениями, напоминающими взрыв атомной (урановой) бомбы; вертикальный фонтан взрыва, возникновение мощной взрывной волны, обошедшей Землю за 30 часов, метеоритная гиперсейсма, конденсация паров на продуктах взрыва, вызвавшая «черный» дождь. Помутнение атмосферы отмечено даже в Америке. Область взрыва охватила площадь круга в 15 *км* диаметром и доныне желтоватым пятном отличается с воздуха от темного покрова тайги; деревья получили здесь тонкий ожог. В центре полосы бурелома следов падения не видно, возможно, из-за заболачивания местности и испарения метеорита при падении. Не были проверены указания на три места падения осколков метеорита. Физическая картина падения осталась необследованной.

Сихотэ-Алинский метеорит упал в 0 ч. 38 мин. миров. вр. 12 февраля 1947 г. в Приморском крае, также при полном солнечном сиянии; несмотря на это, земные предметы дали вторые тени. Болид прошел с С на Ю под углом 50° к горизонту и наблюдался на площади поперечником 600 *км*, причем звуки были слышны еще дальше. Пылевой след оставался до вечера, на снегу замечен был серый налет. Место падения отмечено летчиками в маршрутном полете на третий день и наземно обследовано Ф. К. Шипулиным (Дальневосточная база АН СССР), а также В. А. Ярмолюком, Г. Т. Татариновым и В. В. Онихимовским (Дальневосточное геологическое управление) [826]. С мая 1947 г. по декабрь 1950 г. место падения было тщательно исследовано четырьмя экспедициями Комитета по метеоритам АН СССР [821]. В общем на площади 15 *км*^{2} с большой осью 5 *км* (в азимуте 344°) в головной части

найдено 106 воронок на площади 0,75 $м^2$, диаметром 0,6—28 $м$, и сотни отдельных индивидуальных падений, от 0,18 $г$ до 300 $кг$. Метеориты массой менее 1—2 $кг$ лежали, не углубившись в почву, более крупные — в лунках, при массе более 300 $кг$, расколовшись при падении; диаметр лунок при этом был 2,5—3 $м$. При большем диаметре начинался переход к кратерам: чем больше был размер воронки, тем меньше в ней оказывалось вещества метеоритов, зато последние были представлены искореженными осколками типа Хэнбёри, в более крупных кратерах — с цветами побежалости (следствие нагрева). При этом вещество кратеров (раздробленные земные породы) содержит массу микроскопических шариков, в том числе полых, типа шариков Аризоны и Вабара, на глубине до 1 $м$. Таким образом, при падении имело место местное плавление метеоритов, сильное раздробление и распыление. Парообразование, игравшее основную роль в образовании метеоритных кратеров больших размеров (см. табл. 13), здесь было, видимо, незначительным. Это станет понятным из того, что из небольшого кратера № 1 диаметром 27 $м$ и объемом 10^4 $м^3$ выбрасывались обломки на 500—600 $м$. Допустим, что $25 \cdot 10^3$ его пород было выброшено на высоту 100 $м$ (имеются указания на вертикальный столб выбросов высотой более километра). При сильных взрывах на кратерообразование тратится 10% энергии. Это дает работу падения метеорита $\frac{Mv^2}{2} = 2{,}5 \cdot 10^{18}$ $эрг$; полагая, что метеорит имел конечную скорость $v = 3600\sqrt[6]{M}$ $см/сек$, находим $v = 1100$ $м/сек$ и $M = 800$ $т$. Общая масса падения тогда превосходит 10^3 $т$ и будет на полтора порядка ниже допустимой массы Тунгусского метеорита ($40 \cdot 10^3$ $т$). Однако ряд явлений остался пока неисследованным.

§ 343. Энергия кратерообразования. Энергия падения Тунгусского метеорита, судя по сейсмическим и воздушным волнам и опустошению (на площади около 500 тыс. гектаров), радиусу ожога и бурелома, по сравнению с энергией взрыва урановой бомбы превосходит ее в несколько десятков раз и равна 10^{22}—10^{23} $эрг$. Это в $\sim 10^4$ раз больше энергии Сихотэ-Алинского падения. Учитывая потери, следует считать, что для образования Аризонского кратера потребовалось 10^{25} $эрг$. При скорости 30 $км/сек$ это соответствует железному метеориту в 80 $м$ поперечником. По мнению Миллмана [830], при образовании кратера Унгава жизнь была уничтожена на расстоянии не менее 100 $км$ в радиусе. При случайном взрыве 4500 тонн ВВ в Оппау 21 сентября 1921 г. образовался кратер 120 $м$ диаметром и 30 $м$ глубиной; энергия ВВ здесь порядка 10^{21} $эрг$. Для образования кратеров Каалиярв, Вабара и Хэнбёри требовалась, очевидно, меньшая энергия. Действительно, по Балдуину, взрыв 600 $т$ черного пороха (энергия 10^{20} $эрг$) образует кратер 48 $м$ диаметром, 16 $м$ глубиной с высотой вала 4,5 $м$; 10—12 $т$ пороха дают соответственно 15, 5 и 1 $м$. Для сопоставления напомним, что энергия известных землетрясений в Сан-Франциско 1906 г., Мессине 1908 г. и Ашхабаде 1948 г. составляла соответственно $17 \cdot 10^{23}$, $6 \cdot 10^{23}$ и $5 \cdot 10^{23}$ $эрг$.

Падения метеоритов с большими энергиями наблюдались не раз, судя по дошедшим до нас записям. Не говоря об уже описанном падении 25 июня 1290 г. у Устюга Великого, отметим сообщение А. Аргентова о том, что среди чукчей сохранилось предание, как «когда-то напала темная мгла, во время которой взвились на воздух олени, люди, юрты, бревна» в Чаунском крае, б. Колымского округа Приморской обл. («Зап. Сиб. отд. Геогр. о-ва» за 1857 г.). В якутской сказке, записанной И. А. Худяковым в Верхоянском округе, также говорится, что некогда «дьявол, сделавшись облаком», грянул с неба четырьмя сердитыми громами и погубил людей, жилище, скот. В Северной Америке у Батон-Ружа 5 апреля 1800 г. наблюдался необычайный болид со звуками и термическими явлениями, на месте падения «земля была взрыта», а каждое растение «сожжено или обращено в уголь». Однако падение научно обследовано не было, как и ряд других.

ГЛАВА 31

АКУСТИКА БОЛИДОВ И ПАДАЮЩИХ МЕТЕОРИТОВ

§ 344. Введение. Наблюдения указывают, что полет болидов и падение метеоритов иногда сопровождаются разнообразными звуковыми явлениями, регистрируемыми как ухом, так и приборами. Как известно, звуком называется волнообразно распространяющееся колебательное движение частиц упругой среды. Акустический диапазон нашего уха от 15—40 *кгц* до 15—20 *гц*; самый низкий тон органа имеет 16 *гц*; к старости верхний предел снижается. Вне этих пределов лежат *ультразвуки и инфразвуки*.

На акустическом диапазоне различимы 1500 градаций (тонов), притом разной интенсивности от едва слышимого (нижний порог) до едва переносимого (верхний порог). Соотношение этих порогов определяет *динамический диапазон* уха. В области наибольшей чувствительности ($f=1$—4 *кгц*) он огромен и изменяется в отношении $1:10^{12}$. Громкость звука в абсолютной мере характеризуется звуковым давлением $p=\sqrt{I}\cdot z$, где I — интенсивность, $z=a\rho$ — волновое сопротивление, a — скорость звука, ρ — плотность среды. При $f=1$ *кгц* звук едва слышен в воздухе, если $p=0{,}0002$ *бар*, чему соответствует поток энергии $w=10^{-16}$ *ватт/см²*. Мощность излучения при обычном разговоре ~ 10 *мквт* или 100 *эрг/сек*, шепот слабее в 10^4 раз, громкий крик в сотни раз сильнее. Фортиссимо баса $\sim 30\cdot 10^3$ *мквт*, контральто 10^3, оркестра до 70 *вт*, одного барабана 12 *вт*; последний дает на расстоянии $r=90$ *см* звуковое давление $p=10^2$ *бар* (при обычном разговоре оно равно нескольким барам). Звук одной и той же интенсивности, но разной частоты субъективно воспринимается неодинаково громко (аналогия с цветом). Мощные инфразвуки, например, имеют нулевую громкость. При $f=20$, 500 и 20 000 *гц* верхний порог соответствует 20, 4000 и 10 барам, а нижний при $f=20$, 100, 2000, 10 000 и 20 000 *гц* равен 20, 0,08, 0,008, 0,005 и 10 барам. Следовательно, громкость зависит не только от интенсивности, но и от частоты. Ухо уступает прибору нелинейностью своих свойств (например, сильные звуки заглушают слабые, комбинационные тоны воспринимаются, как реальные и дают «субъективные обертоны», которых нет, и др.); вместе с тем ухо очень чувствительно и легко воспринимает $p=10^{-3}$ *бар*,

т. е. 1 *дин/см²* или около 10^{-6} *атм* с амплитудой 10^{-3} длины световой волны (!). От звукового давления p отличают *давление звука*, т. е. постоянное давление P на тело, создаваемое потоком звука, подобное давлению света: $P=(\gamma+1)E$, где γ — отношение теплоемкостей, а E — плотность потока энергии. В 1906 г. В. Зернов в Москве опытом нашел $P=0{,}5$ *дин/см²* при $f=512$ *гц* для одного источника. Энергетически глаз чувствительнее уха в 10^4 раз.

§ 345. Шкала громкостей. Подобно тому как блеск звезд практически удобно оценивать в условной логарифмической шкале звездных величин, начиная от условного нуль-пункта, так и воспринимаемые громкости звуков оцениваются в аналогичной шкале *децибелов*. Пусть интенсивности двух источников звука будут I и I_0, тогда разница громкостей $L=\lg\frac{I}{I_0}$. При $I=10I_0$ имеем $L=1$ *бел* по определению. Так как ухо способно различать разницу в 10 раз меньшую, то был введен децибел (*дб*), равный 0,1 бела. Изменение энергии на 26% дает разницу в 1 *дб*. За нуль-пункт шкалы принят поток $w_0=10^{-16}$ *вт/см²* при $f=1000$ *гц*; этому порогу соответствует громкость 0 *дб*. Громкость всех прочих звуков выразится числом децибелов $N=10\lg\frac{w}{w_0}$; чем она больше, тем больше N. Едва переносимые ухом громкости имеют $N=130$ *дб*, практически все другие звуки занимают промежуточные значения. Следовательно, децибел есть единица измерения уровня громкости звука частоты 1000 *гц*. Равный по громкости звук иной частоты выражается в «фонах», совпадающих с децибелами при $f=10^3$ *гц*. Это оптически соответствует сравнению разноцветных источников света с каким-либо одним, взятым за стандарт. Чтобы иметь возможность сравнивать громкости звуков болидов с обычными и выражать их затем в числах, приведем для ориентировки следующую таблицу громкостей (в фонах):

Уровень громкости некоторых звуков (в фонах)

Шумы и звуки	Громкость	Шумы и звуки	Громкость
Нуль-пункт шкалы	0	Гудок автомашины ($r=10$ *м*)	72
Тихий шепот	5—10	Вагон метрополитена	75—100
Уровень шумов в ненаселенной местности	~15	Улица большого города	80
Собственные шумы уха	0—15	Большой оркестр ($r=5$ *м*)	80—90
Сельская комната ночью (окна открыты)	25	Раскаты грома ($r=3$ *км*)	80—90
Городская комната ночью (окна открыты)	30—35	Поезд метрополитена ($r=5$ *м*)	95
Отдаленный гром	30	Отбойный пневматический молоток	110
Далекая канонада ($r=20$ *км*)	30	Пассажирский самолет ($r=5$ *м*)	120
Жилая комната днем	45—50	Выстрел зенитного орудия ($r=3$ *м*)	130
Разговорная речь ($r=1$ *м*)	60	Удар грома ($r=0{,}1$ *км*)	130
Улица города	60—75		
Машинописное бюро	70—75		

При закрытых окнах звуки ослабевают на 15—30 фонов, тиканье часов повышает ночной уровень с 25 до 30—35; в городе уровень шумов в доме в 40—45 фонов обычен, до 38—40 фонов можно вести научную работу (С. П. Алексеев, 1950 г.); примус повышает шум до 70, швейная машина до 54, телефон до 58, счетная машина до 80, вентилятор до 90, радиоприемники до 80 — 105.

Восприятие громкости не пропорционально уровню ее и градуировка шкалы децибелов относительно истинной громкости такова:

Относительная громкость	10	50	100	500	10^3	$5\cdot10^3$	10^4	$5\cdot10^4$	10^5
Кажущаяся громкость (*дб*)	10	17	20	33	40	62	82	94	100

Чтобы оценить высоту тона, достаточно 0,15—0,20 секунд. Чувствительность уха повышается в тишине («слуховая адаптация») и падает при громких звуках, но быстро восстанавливается. Особо важен *бинауральный эффект* — способность определять направление на источник звука, обычно до $\pm 3°$ (в помещении гораздо грубее), особенно для резких ударов, притом низких частот. Звуковые волны могут заставить колебаться какой-либо предмет с более низкими частотами (унтертонами), например, вызывать дребезжание оконных стекол; при одновременном звучании более высокие тоны могут маскироваться более низкими. Звукоулавливатели повышают дальность слышимости лишь вдвое, но направление уточняют до 0°,5. Вертикальный угол вообще определяется плохо. Мощность звукового потока w, определяющая силу звука, выражается через циклическую частоту $\omega = 2\pi f$, амплитуду A колебания, максимальные p_m и скорость v_m смещения частицы воздуха так:

$$w = \frac{1}{2} A^2\omega^2 a\rho = \frac{p_m^2}{2\rho_0 a} = \frac{p_m^2}{84{,}4} = 20{,}8 v_m^2 \ эрг/см^2. \qquad (170)$$

Пределы w от $2{,}4\cdot10^{-8}$ до $2\cdot10^4$ *эрг/см²·сек*, а плотности энергии $E = \frac{w}{a}$ от $7\cdot10^{-13}$ до 0,7 *эрг/см³*.

§ 346. Распространение и поглощение звука. Авиамотор на расстоянии нескольких метров создает звуковое давление $p = 500$ *мг/см²* (~ 500 *бар*); порогу его слышимости $p = 0{,}01$ *бар* при $f = 100$ *гц* соответствовало бы расстояние $r = 250$ *км*, тогда как практически $r = 8$—10 *км*. Гром и орудийные выстрелы слышны лишь за 15—20 *км*, взрывы — до 50 *км*. Причиной этого является поглощение звуковой энергии в воздухе из-за ветра, турбуленции и акустических неоднородностей. Поэтому громкость звука ночью выше в 4—5 раз при средних f и до 100 раз при $f \sim 5$ *кгц*, так как по закону Рэлея короткие волны рассеиваются сильнее. Звук в направлении ветра прижимается к земле, с наветренной стороны уходит вверх.

Затухание амплитуды происходит согласно закону $A = A_0 e^{-\zeta r}$, где $\zeta = \frac{2}{3}\frac{\mu}{\rho}\frac{\omega^2}{a}$, причем $\frac{\mu}{\rho}$ есть *кинематический коэффициент вязкости* (~ 0,132 *см²/сек*). Рассеяние энергии звука подобно рассеянию света в мутной среде (Д. И. Блохинцев). Скорость звука дана формулой Лапласа $a = \sqrt{\gamma\frac{p}{\rho}}$, пригодной также для инфразвуковых волн. Ее можно геометрически складывать со скоростью ветра. Вблизи сильного источника (взрыв) она больше. Если полный импульс есть I, то теоретически на расстоянии r от точки взрыва скорость возмущения c равна

$$c = \sqrt{\frac{a^2}{2} + \frac{(\gamma-1)I}{16\pi r^2\rho} + \sqrt{\frac{a^4}{4} + \frac{(\gamma-1)^2 I^2}{256\pi^2 r^4\rho} + \frac{(\gamma+3)a^2 I}{16\pi r^2\rho}}}. \qquad (171)$$

Например, у канала молнии $c \geqslant 700$ *м/сек*. При плотности импульса $i = I/4\pi r^2 = 2{,}6$ *атм* получим:

r (*м*) . . .	1	1,5	2	3	4	5	10	20	50	100	130
c (*м/сек*) . .	4400	3000	2300	1600	1200	1000	700	500	380	330	330

Так как при больших амплитудах сгущения идут быстрее разрежений, то возникает фронт *ударной волны*. Эта волна не акустическая, так как не содержит колебаний, но она порождает акустические инфраволны, например, дульная волна при выстреле, с частотой $f = 15$ *гц*. Если Δp — скачок давления, и $\rho_1 v^2$ — количество движения воздуха, увлекаемого за 1 *сек*, то давление ударной волны на встречное тело, или *плотность импульса* $i = \Delta p + \rho_1 v^2$, при полном отражении давление равно $2i$, а скорость ударной волны $c = \sqrt{a^2 + \frac{\gamma+1}{2\rho}\Delta p}$. Таким образом, уже на небольшом расстоянии (порядка 0,1 *км*) ударная волна переходит в звуковую, распространяющуюся с лапласовой скоростью $a = 33\,190$ *см/сек*. Влияние температуры учитывается умножением на $\sqrt{T/273}$, влажности — на множитель $\sqrt{\frac{1+0{,}28e}{(1-0{,}378e)(1-0{,}393e)}}$, где e — относительное давление водяных паров. По изменению скорости звука с высотой можно находить $T = f(H)$, т. е. производить акустическое зондирование атмосферы методами аэросейсмики (рис. 247). В стратосфере при $e \sim 0$ мы будем иметь следующую скорость звука:

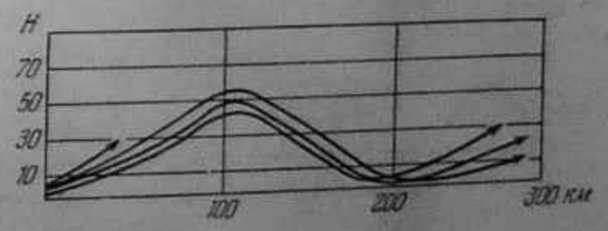


Рис. 247. Схема отражения звуковых волн в стратосфере.

T (°C) . . .	−80°	−60°	−40°	−20°	0°	+10°	+20°	+30°	+40°
a (*м/сек*) .	278	293	306,5	319,3	331,8	337,8	343,8	349,6	355,8

Ухо реагирует не на абсолютное значение давления, а на его изменения (градиент плотности); например, при сильном взрыве, несмотря на большую амплитуду, нарастание плотности более пологое, чем при слабом. В первом случае мы услышим глухой, хотя и сильный звук, во втором — гораздо более резкий короткий удар, «рвущий воздух». Прибор же, регистрируя не градиент, а давление, запишет обратное — сильную волну в первом случае и малозаметную во втором. Расширившиеся при взрыве газы охлаждаются, образуют волну разрежения, затем опять волну уплотнения, так что, несмотря на отсутствие периодического процесса, при взрыве возникает серия волн с интервалом времени между ними, условно называемым периодом волны (рис. 248). Такие волны возникли при взрыве Тунгусского метеорита (рис. 249) и, по-видимому, наблюдаются и при полете болидов. С расстоянием амплитуда уменьшается, период растет, градиент ослабевает, поэтому даже резкий звук на большом расстоянии покажется глухим ударом, иногда даже кратным, причем основную часть энергии несут инфраволны; они могут заставить сильно дрожать оконные стекла при едва слышимом звуке. Нарастание давления при выстреле винтовки происходит за тысячные доли секунды, зенитного орудия — за сотые, тяжелого орудия — за десятые, причем

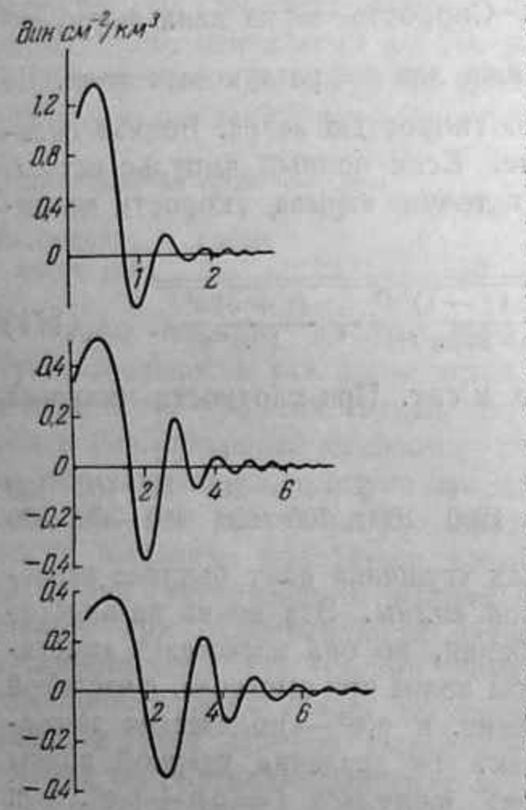


Рис. 248. Распространение волны сильного взрыва по теоретическим расчетам Скорера.

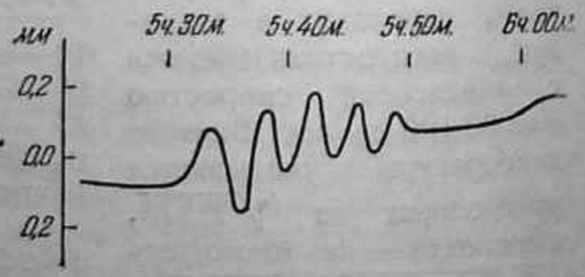


Рис. 249. Пакет волн при взрыве Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. (Слуцк, микробарограмма; время — мировое).

процент энергии инфраволн увеличивается, а градиент падает. По записи звука судят в звукометрии о калибре орудия; запись воспроизводит прохождение «дульной» волны выстрела.

§ 347. Баллистические волны возникают в воздухе при скорости $v > a$ (рис. 250), им соответствуют на поверхности воды «корабельные» волны и аналогичные явления в средах при движении электронов со «сверхсветовой скоростью» (эффект Черенкова). Поскольку каждая точка траектории является источником сферической

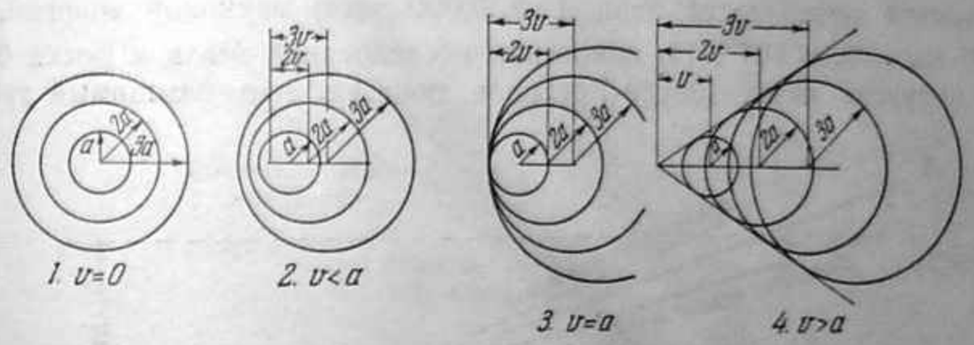


Рис. 250. Возмущения, вызванные движущимся телом в среде.

a — скорость распространения возмущения (звука), v — скорость тела. При $v > a$ возникает баллистическая волна.

волны, то при постоянной скорости огибающей этих волн будет коническая волна. Осью этого конуса является траектория, вершиной — породившее эту коническую волну тело, а угол раствора конуса 2α (угол Маха) определяется уже известным соотношением $\sin\alpha = \frac{v}{a}$. При полете снарядов энергия баллистической волны мала сравнительно с дульной, но так как баллистические волны имеют огромный градиент, то для уха прохождение их воспринимается резким ударом; у них резкий тембр из-за отсутствия инфрачастот. На расстоянии 20—30 *км* звук выстрела не слышен, но регистрируется прибором, баллистическая волна слышна, но прибором не отмечается. Из-за большого градиента на близком расстоянии баллистическая волна опасна, производя действие удара, проходящего через организм и вызывающего контузии. Головная и хвостовая баллистические волны сливаются в одну, но при больших v возникают описанные сжатия и разрежения на некотором расстоянии в самой волне и она как бы «расщепляется» на 2—3 смежные (рис. 248). Поэтому при полете одиночного болида иногда слышатся 2—3 отдельных удара, быстро следующих один за другим, и по их числу никак нельзя судить о числе выпавших метеоритов.

§ 348. Звуки болидов. Еще китайские летописи сообщали, что иногда полет болидов сопровождается громоподобными звуками; средневековье дало десятки подобных свидетельств, в новое время

сложилось и получило распространение неверное представление о том, что такие удары есть результат «взрыва» болида. Но метеорит — не бомба и взрывчатым веществом не начинен, тем более, что за сотню километров крайне слабый «взрыв» болида не может быть слышен, и, кроме того, громоподобные звуки слышны и при полете «спокойных» болидов, не дающих взрывов. Эти звуки начинают быть слышны лишь тогда, когда высота болида H делается менее 50—55 *км* (Деннинг, А. Ю. Маноцков [841]). Шредингер [852] в 1917 г. показал, что из-за разреженности воздуха с $H = 100$ *км* может дойти до земной поверхности лишь 1 : 300 000 часть звуковой энергии, а с 50 *км* — $0{,}9 \cdot 10^{-3}$. На основании исследований Маха и Босса более полувека назад Дюран-Гревилль показал, что слышимый гром

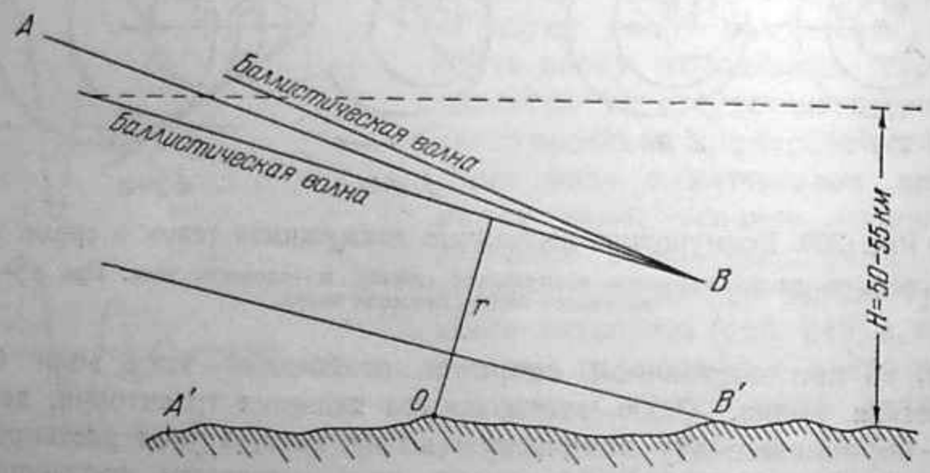


Рис. 251. AB — путь болида, O — наблюдатель; звук слышен по кратчайшему направлению.

и раскаты вызваны прохождением баллистической волны метеорита (рис. 251). Поэтому такие болиды следует называть «звуковыми», а не «детонирующими», как это делается в английской литературе.

Фабри указал, что первой до наблюдателя доходит волна по кратчайшему расстоянию от траектории. По мере того, как доходят волны от остальных точек траектории, мы слышим раскаты, постепенно замирающие, как и при обычном громе от молнии. В 1908 г. Маллок (Англия) изучал звуковые явления при полете снаряда по показаниям наблюдателей, у которых снаряд пролетал над головой. Так как скорость его убывала, то кажущееся направление звука на ближайшую точку траектории непрерывно менялось. Это явление ныне легко наблюдается при полете реактивных самолетов: звук слышен в направлении не на самолет, а перпендикулярно к фронту волны. При скоростях болидов $v = 10$—70 *км/сек* и $a = 0{,}3$ *км/сек* раствор конуса Маха $2\alpha \leqslant 4°$, т. е. практически баллистическая волна метеорных тел цилиндрическая и возникает почти одновременно во

всех точках траектории. Из-за этого направление на первый звук удара перпендикулярно к траектории, поэтому по направлению звука и интервалу времени Δt между светом и звуком можно найти кратчайшее расстояние $r = a\,\Delta t$ до нее. В стратосфере $a = 0{,}29$ *км/сек*.

§ 349. Акустическое поле болида. Изофоны. Область, через которую проходит звуковое возмущение, называется *акустическим полем* (рис. 252). У вертикально падающего болида оно имеет на

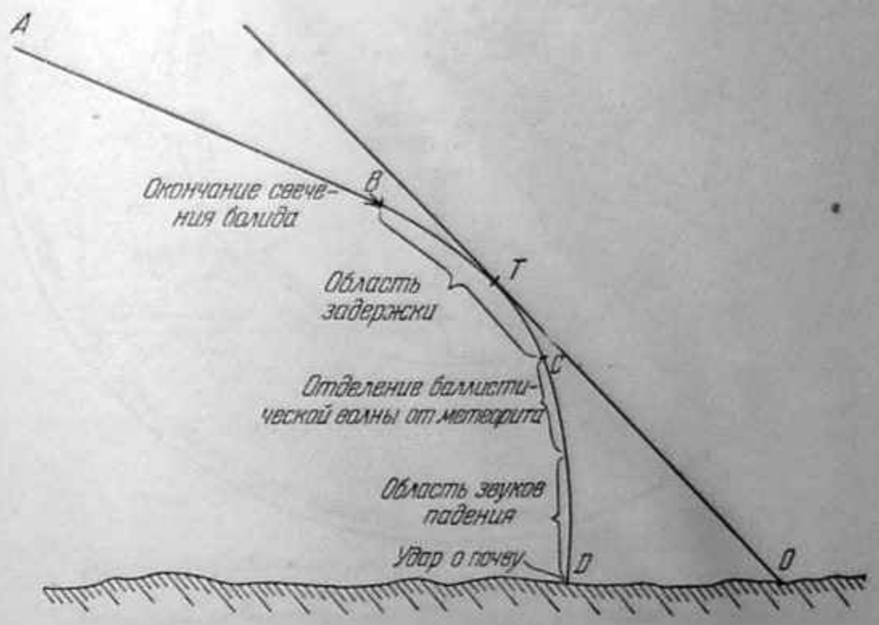


Рис. 252. Звуковое поле при падении метеорита.

поверхности Земли форму круга и линии равной громкости — изофоны — будут концентрическими окружностями. В тылу баллистической волны поле невозмущенное, звука нет. Болид, летящий горизонтально, даст на земной поверхности звуковую полосу с параллельными изофонами; осью этой полосы является проекция $A'B'$ траектории. При промежуточных наклонах траектории форма изофон зависит от угла наклона z_R, поэтому, получив из опросных данных карту изофон, можно приближенно найти даже азимут и высоту радианта болида, который оптически не был виден (из-за облачности или дневного света) [850]. Этим путем впервые в 1907 г. В. Н. Мамонтов [524] определил траекторию метеорита Телеутское Озеро (рис. 259), в 1908 г. А. В. Вознесенский [838] — Тунгусского метеорита, а в 1916 г. Вегенер [686, 853] — метеорита Трейза. Метеорит в несколько килограммов создает акустическое поле радиусом около десятка километров, массы порядка центнера производят звуки, слышимые за 100—200 *км*, на площади до 10^5 *км*^{2} (рис. 253), а гиганты, подобные Тунгусскому метеориту ($M = 40 \cdot 10^3$ *т*) — на

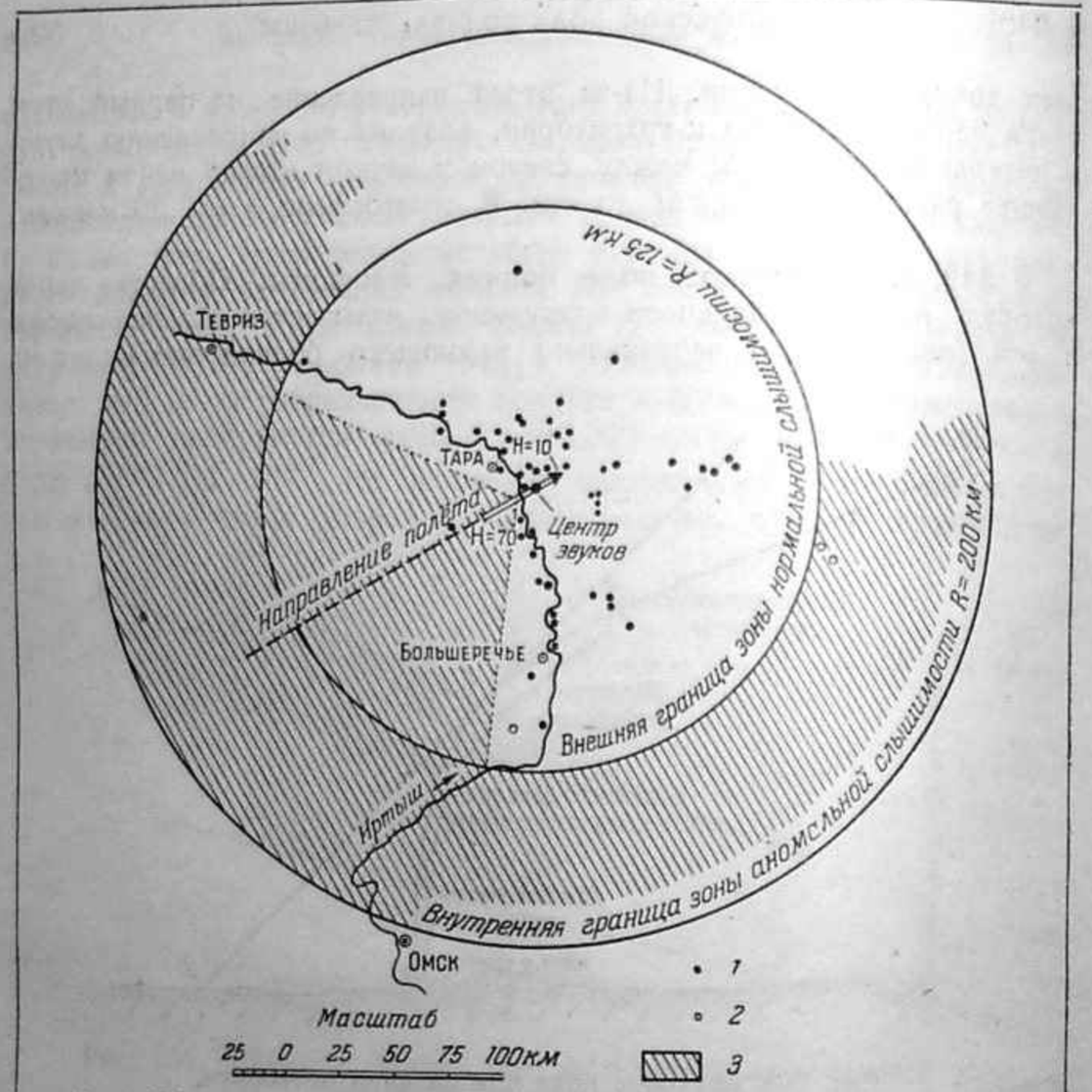


Рис. 253. Акустическое поле, вызванное полетом метеорита Хмелевка (Зап. Сибирь) 1 марта 1929 г. Наклон траектории к горизонту 39°. Мертвая зона звуков — в тылу баллистической волны.

Рис. 254. Распространение звуковых явлений при полете и падении Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.

M — место падения, *I* — линия симметрии расположения пунктов слышимости (точки), пунктир — изолинии громкости (в децибелах), *II* — их линия симметрии, *III* — то же для пунктов наблюдения баллистических волн (кружки), *IV* — для электрофонных явлений (звездочки).

площади в миллионы $км^2$ (рис. 254). Баллистические волны этого метеорита были последовательно, по мере распространения, записаны

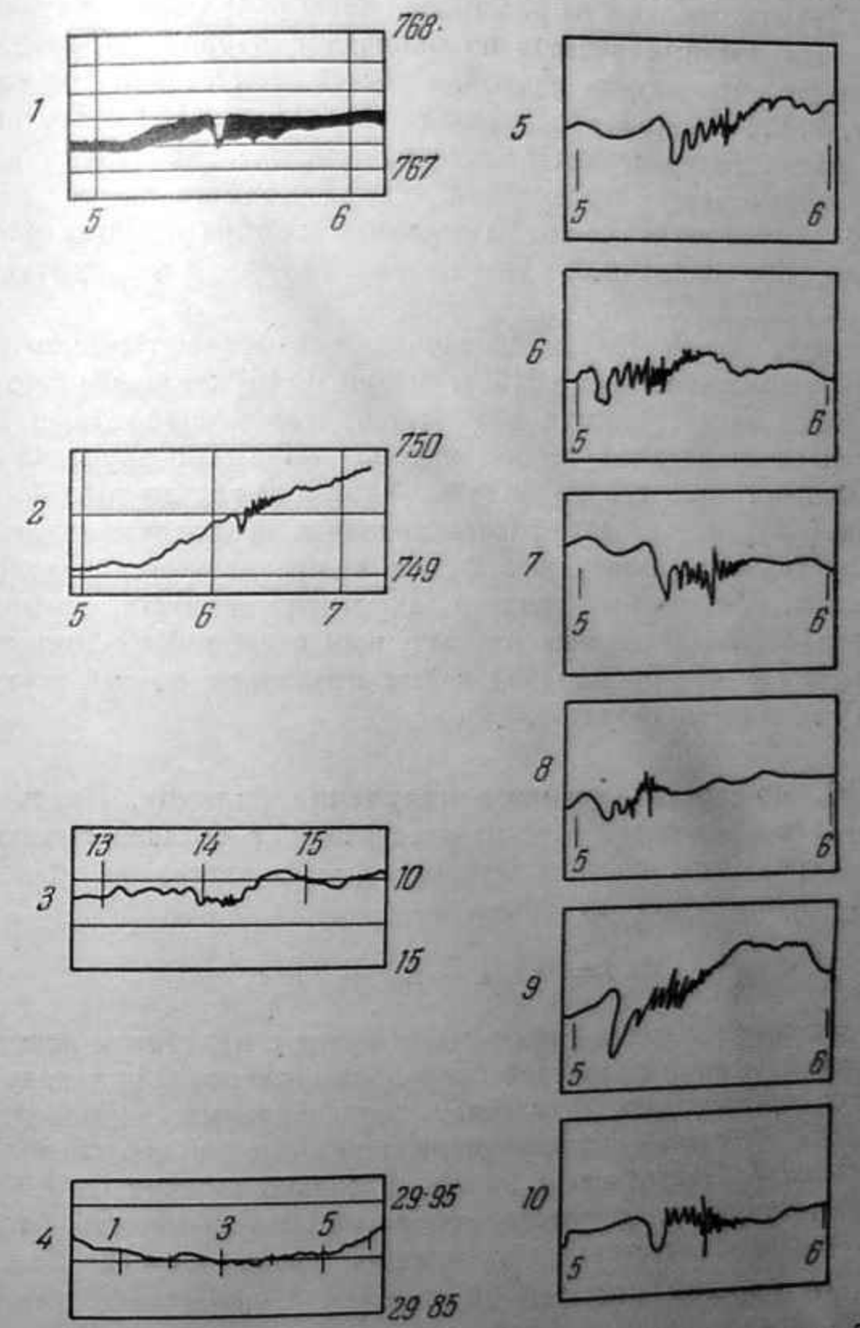


Рис. 255. Микробарограммы с записью воздушных волн от взрыва Тунгусского метеорита: *1* — Копенгаген, *2* — Загреб, *3* — Батавия, *4* — Вашингтон, *5—10* — Лондон и его окрестности. Записи английских микробарографов увеличены в 30 раз и на них видна баллистическая волна в виде узкой резкой черты (по Ф. У. Уипплу).

пятью микробарографами английских станций на расстоянии 50 000 *км* (рис. 255). Манометрический толчок при прохождении баллистичес-

ких волн болидов отмечался неоднократно. Для сравнения укажем, что подобные же толчки с амплитудой порядка 0,1 *мм* вызывает крупный снаряд, пролетая на расстоянии нескольких сотен метров. При уничтожении военных запасов по окончании первой мировой войны исследовались траектории звуковых лучей искусственных взрывов; в 1927 г. Ф. У. Уиппл [854] исследовал болид 2 октября 1926 г. и нашел, что его звуки распространялись точно так же, как звуки взрывов на нисходящих ветвях траекторий. Из-за повышения температуры выше 35—40 *км* звуковые волны отклоняются обратно вниз (рис. 247) и создают зону *вторичной слышимости* звуков, отделенную *зоной молчания* (рис. 253).

В 1918 г. Морф [849] исследовал влияние метеорологических условий на слышимость, в 1919 г. Фабри [846] окончательно доказал аналогию баллистических волн метеоритов и снарядов, в 1925 г. Эсклангон обобщил опыт первой мировой войны по акустике снарядов и распространил его на болиды [845], а за год до того А. А. Эйхенвальд [844] исследовал распространение в воздухе волн большой амплитуды: оказалось, что фронт волны движется в атмосфере вертикально. Подробный анализ акустики мощных взрывов дал Р. Скорер [832]. Наблюдения над падением авиабомб и осколков снарядов во время второй мировой войны позволили понять и уточнить акустику падения метеоритов.

§ 350. Мощность звукового излучения болидов. Пусть источник звука мощностью I ватт на расстоянии r создает громкость L фонов, а громкость, соответствующая $I_0 = 1$ ватту, на расстоянии $r = 1$ *км* пусть будет L_0. Тогда

$$\lg I = 0{,}1\,(L - L_0) + 2 \lg r, \qquad (172)$$

если волна сферическая и громкость убывает с квадратом расстояния. Для цилиндрической баллистической волны вместо $2 \lg r$ надо брать $\lg r$, если пренебрегать затуханием, определяемым дополнительным членом $\lg e^{-\zeta r}$, где ζ — коэффициент затухания звуковых волн данной частоты f. Постоянная L_0, однако, сильно зависит от f.

Пусть, например, на расстоянии $r = 50$ *км* громкость баллистической волны соответствует громовому удару $L = 72$ *фон*. При $f = 20$ *гц* порогом является 20 *бар* (10^{-6} *ваттт/см*^{2}). Учтя нелинейность восприятия, находим мощность потока $w = 0{,}1$ *вт/см*^{2}; если волна сферическая, то мощность точечного источника звука будет $W = 4\pi r^2 w = 3{,}1 \cdot 10^{13}$ *вт*. При цилиндрической волне с 1 *см* пути мощность излучения $W_1 = 2\pi r \cdot lw = 3{,}1 \cdot 10^6$ *вт/см*, а при длине пути метеора 10 *км* полная мощность $W = 3{,}1 \cdot 10^{12}$ *вт* или в 10 раз меньше, чем для сферической волны. Метеорное тело массой 100 *кг* при $v = 30$ *км/сек* и полете в течение 5 *сек* имеет энергию движения $4{,}5 \cdot 10^{17}$ *эрг* и среднюю мощность ее расходования

$W = 0{,}9 \cdot 10^{10}$ *вт*, т. е. на три порядка меньше вычисленного для звука. Это значит, что либо имеются частоты $f > 20$ *гц* (что уменьшит w в десятки и сотни раз), либо из-за большого градиента давления баллистической волны субъективное восприятие громкости завышено (до ста раз). Учтя эти факторы и приняв во внимание, что громкости $L = 95$ *фон* отмечены даже при падении в 10 раз меньших масс (что увеличит расхождение еще в 50 раз), мы должны будем заключить, что в звук должна переходить весьма значительная доля энергии движения.

Действительно, мы видели, что на излучение, ионизацию и разрушение метеорного тела тратится $< 10\%$ энергии движения метеорного тела, остальное должно передаваться воздуху. Последнее можно проверить опытом: 305-миллиметровый снаряд массой 150 *кг* при скорости $v = 500$ *м/сек* на расстоянии 400 *м* от траектории вызывает скачок давления $\Delta p = 0{,}1$ *мм* или 1 : 7600 атмосферного, откуда $p_m = 130$ *дин/см*^{2}, что дает силу звука $p_m^2/2\rho_0 a = 2 \cdot 10^2$, *эрг/см*^{2} и работу на 1 *см* пути $E_1 = 5 \cdot 10^7$ *эрг/см*. Энергия движения снаряда, расходуемая за 20 секунд на пути длиной 10 *км*, есть $E = 1{,}9 \cdot 10^{14}$ *эрг*, откуда $E_1 = 19 \cdot 10^7$ *эрг/см*. Этот грубый подсчет указывает, что баллистическая волна действительно несет бо́льшую долю энергии снаряда, остальная часть идет на нагревание воздуха. Следовательно, для болидов приходится принимать пороговое значение потока энергии $10^{-7} - 10^{-8}$ *вт/см*^{2}; на расстоянии 50 *км* пороговая мощность источника звука тогда должна быть 0,3 — 0,03 *вт/см*. Если бы метеоры могли пролетать ниже уровня $H = 55$ *км*, то при массе $M = 1$ *г* их еще можно было бы услышать на пределе восприятия с этого расстояния.

Впервые оценить звуковую энергию удалось для болида 25 января 1929 г., пролетевшего над ст. Чулак-Курган (Узбекистан) [836]. Оценки громкости были переведены в фоны и редуцированы к стандартному расстоянию $r_0 = 50$ *км* по формуле $\Delta L = 10 \lg \left(\frac{r}{r_0}\right)^2$, $L_0 = L + \Delta L$. Для более высоких точек оказалось $L = 51 \pm 2$ *фон*, для более низких 59 ± 2 *фон* (по 11 наблюдениям). Если разница вызвана более сильным затуханием на бо́льших высотах, и убывание происходило по закону $L = L_0 \frac{e^{-\zeta r}}{r^2}$, то $\zeta = 0{,}05$ *км*$^{-1}$. При мощности потока 10^{-9} *вт* была найдена мощность звукового излучения в несколько десятков киловатт, что, однако, как видно из сказанного выше, занижено примерно в 10^3 раз. Для болида 1 марта 1929 г. было обработано [511] 80 оценок громкости. Полагая, что низкочастотный источник звука мощностью 125 милливатт на расстоянии 1 *м* создает громкость 40 фон, найдена мощность звуковых волн этого болида $W = 15 \cdot 10^3$ *квт*; мощные удары грома сотрясали постройки и разрушали печные трубы. Дождь каменных метеоритов

около Хмелёвки, Тарской области (Зап. Сибирь) имел массу около 90 *кг*; за время полета $\tau = 5$ сек. при $v = 30$ *км/сек* метеорит в полете развивал мощность $W = 10^7$ *квт* [511].

§ 351. Звуки падения метеорита. После прекращения свечения, но при $v > a$ баллистическая волна еще существует, хотя раствор конуса Маха возрастает при $v = 2$ *км/сек* до $2\alpha = 17°$, а при $v = a$ $2\alpha = 180°$ коническая волна переходит в плоскую, перпендикулярную к траектории, отделяющуюся от метеорного тела; далее головная волна продолжает двигаться в прежнем направлении, а метеорное тело круто падает на Землю. Метеорное тело и волна достигают поверхности Земли в разных точках, например, при падении метеорита Кашин в 1918 г. эти точки были удалены на 15 *км*. Каменный метеорит массой менее 76 *кг* имеет конечную скорость $v_k < a$ и потому звуковая волна его обгоняет, что обычно и имеет место: сначала слышен удар и раскаты баллистической волны, потом свист падения. При бóльшей массе $v_k > a$ и баллистическая волна сопровождает метеорит до момента падения, происходящего «без предупреждения». Это явление хорошо известно из опыта последней войны (падение крупных авиабомб и снарядов Фау-2).

Струя завихрений позади тела по строению тождественна струей пара, выходящего из отверстия с шипением. Поэтому тем же шипением сопровождается полет крупных снарядов и падение метеоритов, слышимое за несколько километров (!). Более мелкие тела, например, пуля, производят более высокий *свист*. Эти звуки слышны после звука баллистической волны. При наличии быстрого вращения имеет место прецессия оси вращения, вызывающая как бы пульсацию или «стрекотание» звука с частотой нескольких герц. Тела неправильной формы имеют очень сложную аэродинамическую картину обтекания и при свободном падении могут производить жужжание, громыхание, завывание, дребезжание, клокочущие звуки. Наши наблюдения над падением осколков шрапнели в 1941 г. указывают на полную аналогию их звуковой картины с падением осколков метеоритов.

Если падающий метеорит движется так, что удаляется от наблюдателя, то этот звук из-за явления Доплера будет понижаться, иногда в течение 10 секунд и более. При приближении метеорита, напротив, тон повышается, тем более резко, чем ближе точка падения, что важно при розыске упавшего метеорита. По Эсклангону [845] в этом случае при $v = 470$ *м/сек* для тела, упавшего за 3 *км*, характер звука вроде: «у-у-у-у-ю-ю-и-и-и-и-е-е-а-а-у-у-у-пуф»; звукам до «и» соответствует повышение тона, последнему звуку в случае метеорита — «клевок». Общая длительность звуковых явлений при падении метеорита занимает несколько десятков секунд, так как с высоты $H = 20$ *км* метеорит в 10 *кг* падает около 1,5 минут, баллистическая волна доходит за 1,0 мин., ее раскаты могут продолжаться еще 1 минуту.

Иногда баллистическая волна из-за своей слабости остается незамеченной. В одном случае (7 октября 1868 г.) болид, пролетавший над Англией, был «услышан» в Париже через 5 мин. 8 сек. При метеоритном дожде разнообразие звуков усиливается, например, 12 февраля 1875 г. после полета болида через 3—5 мин. начались «взрывы, треск, грохот, звон, гром и рев» и несколько сотен метеоритов выпало у Хомстэда (США). Один из метеоритов, Леоновка, упавший близ Новгород-Северского 17 (30) августа 1900 г., при весе 0,7 *кг* «с ревом» вошел в землю, два куска метеорита Томаковки (Украина, 17 января 1905 г.) по 0,4 *кг* «шипели», как пули; метеорит Афины (Алабама, США) в 0,3 *кг* падал с «певуче-жужжащим звуком», перешедшим в глухой свист. Звук взрыва при падении Тунгусского метеорита был отмечен в Туруханском крае за 1000 *км* от места падения.

§ 352. Звуковые болиды представляют редкое явление природы и в архиве автора, собранном за четверть века по опросным данным, их всего 22 на 424 обычных болида (5%). Первое на Руси летописное сообщение [71] относится к 1114 г.: во время охоты киевского князя Всеволода «яко земля стукну» при полете болида. 25 июля 1290 г. очень мощными были акустические явления при падении каменного метеорита близ Устюга Великого («гром велий»), а также в 1419 г. близ Пскова и Новгорода и в 1662 г. в Кириллове-Белозерском, затем в 1676 г. в Тобольске. По сообщению Б. П. Шереметева при осаде Нарвы 20 июля 1706 г. при полете болида «стрелило как из пушки, а потом из мелкого ружья»; со звуком выпал метеорит Бородино в ночь 4/5 сентября 1812 г., накануне великого сражения. Н. М. Пржевальский описал, как после полета близ Кульджи болида 27 августа 1876 г. «минут через пять послышался в горах громкий гул, словно отдаленный залп из орудий». П. К. Козлов описал «троекратный, почти непрерывный громообразный гул, напоминавший отдаленную слабую орудийную стрельбу», при полете сверхболида 29 ноября (12 декабря) 1905 г. в Южной Монголии. Иногда днем болид не виден и слышен «гром среди ясного

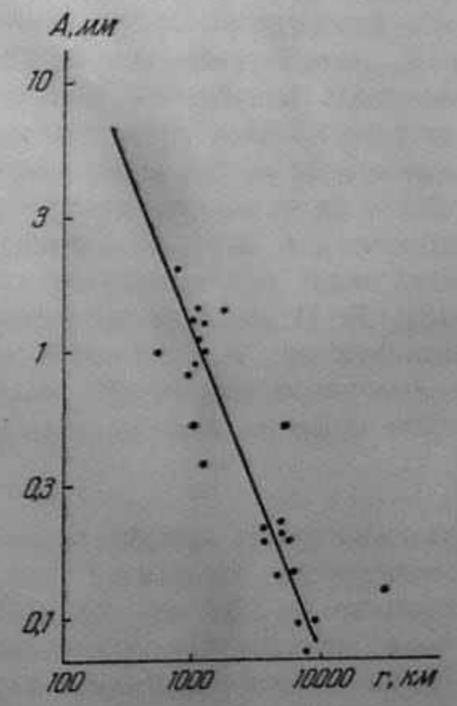


Рис. 256. Убывание амплитуды A воздушной волны взрыва Тунгусского метеорита с расстоянием. Масштабы логарифмические. Экстраполяция для $r = 10$ и 1 *км* дает $A = 225$ и 3100 *мм*, т. е. $^1/_3$ и 3 атмосферы.

неба», казавшийся необъяснимым в прежние времена; последний раз это наблюдалось 11 июня 1938 г. близ Нежина при падении метеорита Кукшин и 23 июня 1939 г. в Сумской области (метеорит Червоный Кут). Пока никем не выполнена запись звуков болида на пленку (записи обычного грома имеются); вероятно, это периодические колебания с убывающей амплитудой, резким началом и неправильно излагающимися колебаниями низких частот. Ни разу не наблюдались у болидов так называемые «видимые волны взрыва» как темно-пепельные полосы шириной $\sim 0^{\circ},1$, иногда при взрывах пробегающие по дневному небу [835], недостаточно выясненной природы.

В заключение напомним, что воздушные волны Тунгусского метеорита обошли кругом земной шар (рис. 255) с логарифмическим затуханием (рис. 256). В Потсдаме была отмечена как волна, пришедшая из Сибири, так и обошедшая вокруг земного шара.

ГЛАВА 32

МЕТЕОРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 353. Гипергенные сейсмы. Воздушные волны, вызванные движением метеорного тела в атмосфере, дойдя до земной поверхности, частично отражаются обратно, частично поглощаются, передавая некоторую часть своей энергии земной коре, тем самым вызывая в ней сейсмические волны [857]. Последние, как известно, бывают нескольких типов; возникающие в нашем случае относятся к так называемым *поверхностным*, распространяющимся вдоль поверхности земной коры и не проникающим в гранитную оболочку Земли. Еще И. В. Мушкетов в «Каталоге землетрясений Российской империи» по поводу грозы 25 августа 1526 г. замечает: «при сильных нарушениях равновесия атмосферы... сотрясения почвы весьма возможны». Так, 28 июня 1844 г. в Саратове удары грома «потрясли не только здания, но и землю». Поэтому неудивительно, что аналогичные «громовые удары» баллистических волн метеорных тел также производят быстропротекающие *тахисейсмические* явления. П. Л. Драверт [860] предложил называть их *гипергенными*, т. е. вызванными внешней по отношению к Земле причиной. Вызванные полетом метеорного тела землетрясения мы можем назвать *космогенными сейсмами*.

§ 354. Метеорные и метеоритные гиперсейсмы. Полет каждого крупного звукового болида обычно сопровождается сотрясением предметов на земной поверхности [857], но это еще не означает наличия сейсмической волны, так как, например, дребезжание оконных стекол, распахивание окон и дверей, вылетание печных заслонок и т. п. может вызываться прохождением только баллистической волны, механическое действие которой может быть достаточно заметным, тогда как (при инфразвуковой частоте) громкость может и не быть большой. Обычно сначала проходит волна сжатия, затем — разрежения, и т. д., до затухания; число волн может быть от одной-двух до нескольких десятков; первая из них самая мощная. Волна сжатия может выдавить стекла внутрь здания, выбросить из печи огонь в помещение и т. д. Тем не менее, космогенные сейсмы существуют. Одно из старых упоминаний имеется в том же «Каталоге»

Мушкетова и относится к 19 мая 1421 г. для Новгорода; здесь имело место падение метеоритов. Однако сейсмологи исключают из круга своего рассмотрения сейсмы, как гипергенные, так и технические, вызванные человеком (в частности от взрывов), а также обвалами и обрушениями.

Среди космогенных сейсм мы будем различать два типа. Перзый из них назовем *метеорной гиперсейсмой*: она вызвана прохождением уже упомянутой баллистической волны, передавшей часть своей энергии земной коре. Вторая гиперсейсма вызвана ударом о почву

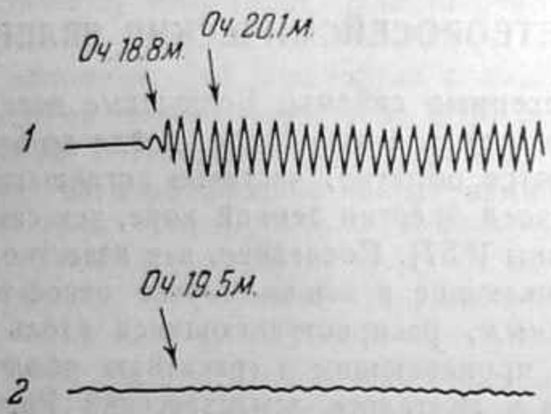


Рис. 257. Сейсмограмма Иркутской обсерватории при падении Тунгусского метеорита:

1 — восточный маятник, *2* — северный маятник (время мировое).

при падении метеорита; это—*метеоритная гиперсейсма*. Она гораздо слабее первой, так как энергия при падении со скоростью 0,1—0,2 *км/сек*, конечно, меньше, чем при движении того же тела с космической скоростью, когда ее большая часть передается атмосфере. Однако при падении гигантских метеоритов, достигающих почвы с космической скоростью (вроде Тунгусского метеорита), метеоритная гиперсейсма может быть больше метеорной. Это видно из рассмотрения микробарограмм английских станций (рис. 255), на которых зарегистрирована как баллистическая волна, так и взрывная, возникшая на месте падения и вертикальным фронтом обошедшая Землю [855, 866]. Сейсмическая волна из того же эпицентра была отмечена еще недостаточно совершенными в то время сейсмографами в Иркутске (рис. 257), Ташкенте и даже в Иене (Германия), на расстояниях 970, 3400 и 5600 *км* соответственно. Первоначально энергия падения Тунгусского метеорита оценивалась в 10^{20}—10^{21} *эрг*, но более точные критерии, предоставленные в наши дни испытаниями атомных бомб, позволили уточнить эту цифру до 10^{22} *эрг* [82]. Это — энергия массы в 40 тыс. *т* при скорости $v = 20$ *км/сек*.

Если испытание ведется в воздухе, то, как известно, около 30% энергии взрыва идет на излучение всех видов, более половины

передается воздуху и только 5% — земной коре. Последнюю цифру независимо дают исследования других мощных взрывов. Таким образом, мы должны принять, что энергия E метеорных гиперсейсм порядка 1—2% кинетической энергии метеорного тела. Напомним, что при массе последнего $M = 200$ *г* и $v = 70$ *км/сек* она превосходит энергию поезда в 2000 *т*, идущего со скоростью 70 *км/час*, и составляет $0{,}5 \cdot 10^{14}$ *эрг*. По количеству энергии землетрясение

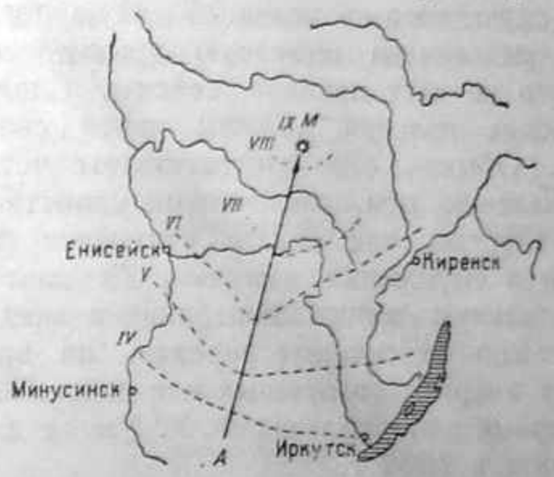


Рис. 258. Изосейсты землетрясения, вызванного падением Тунгусского метеорита (баллы 12-балльной шкалы). *M* — место падения, *AM* — линия симметрии.

Тунгусского метеорита (рис. 258) должно быть с точки зрения сейсмологии отнесено к «местным» и слабым. Тем более слабы метеоросейсмические явления обычных падений, например, при $M = 100$ *кг*, $v = 30$ *км/сек*, $E \sim 10^{16}$ *эрг*.

§ 355. Шкала интенсивностей. В сейсмометрии предложены до сорока условных шкал оценки интенсивности землетрясений, наиболее распространенная из них 12-балльная шкала Росси — Канкани — Фореля. Здесь баллы 1—2 регистрируются только приборами, ускорения, вызванные толчком, составляют $j < 1$ *см/сек*^{2}. Каждый следующий балл соответствует увеличению j примерно в 2,5 раза. Три балла ощущаются человеком в покое, как плавное смещение или едва заметные вибрации; балл 4 еще может не быть замечен пешеходами, балл 5 отмечается всеми и может вызвать беспокойство (звенит посуда, колеблется жидкость в сосудах и водоемах). При шести баллах скрипит и смещается мебель, срываются картины, при семи — начинают давать трещины по углам и косякам дверей плохие здания. При восьми баллах часть построек, кроме деревянных и хороших каменных, разрушается, в почве возникают трещины, при девяти баллах разрываются подземные кабели и трубы, разрушается большинство зданий. Наивысший балл — 12, когда Земля приходит в волнообразное движение с амплитудой 10 *м* и более, вершины

деревьев касаются почвы, возникают водопады и запруды рек, меняется вид местности.

Какому же баллу соответствуют космогенные гиперсейсмы? На месте падения Тунгусского метеорита наблюдались явления, соответствующие баллу 10 и постепенно слабеющие по мере удаления [82, 514]. Падение обычного метеорита массой в несколько килограммов, как показывает опыт, уже не заметно, если оно происходит далее 130 *м* от случайного очевидца. В тихую погоду на расстоянии метра отмечено падение на железную крышу кусочка в несколько сотых грамма, что не даст никакой сейсмы. Следовательно, прочие метеоросейсмические явления должны найти свое место в шкале Росси — Фореля. Обычно они соответствуют четырем, реже 5 и 6 баллам. К сожалению, при практическом удобстве балл еще ничего не говорит об энергии, так как не учитывает фактора времени — длительность t и в выражении импульса Ft дает только $F = Mj$. Имея инструментальную запись колебания и зная, какие искажения внес прибор, можно ее проинтегрировать по времени и получить мощность потока энергии воздушных или сейсмических волн в точке наблюдения. Впервые это проделал Ф. У. Уиппл для барограмм Тунгусского метеорита в 1930 г.

§ 356. Метеоросейсмические явления. Уже в «Повести временных лет» сообщается, что при полете огненного змея 1091 г. «земля стукну» [5]. Хладни перечисляет метеорные гиперсейсмы 30 марта 1654 г. на датском острове Фионии и 19 (или 21 ?) июля 1668 г. в Вероне, Италия (в обоих случаях выпали метеориты). Далее отмечены гиперсейсмы еще в 10 случаях (1734—1791 гг.). Во всех этих случаях наблюдались сверхъяркие болиды, некоторые были дневными, а болид 29 июля 1773 г. был так ярок, что Луна перестала быть видной (!). В прошлом столетии гиперсейсмы, по отрывочным данным, отмечены, например, 30 января 1812 г. (Луисвилл, США), 6 февраля 1818 г. (Англия); впрочем, имеющиеся сотни наблюдений еще не собраны и не обработаны. Мэран даже искал связь между падением болидов и землетрясениями; в первом издании английского «Дневника изысканий» Дарвина сообщается о совпадении землетрясений с падением метеоритов. Независимо это же явление открыл зоолог и исследователь Севера М. К. Сидоров, напечатавший в 1875 г. о том специальную статью [862]. В списках землетрясений имеются метеорные гиперсейсмы, ошибочно включенные как тектонические, например по П. Л. Драверту [869, 860] 12 сентября 1841 г. (Нижне-Тагильский и Чернореченский заводы близ Перми), 29 ноября 1868 г. в Квишете и Куссарах (Кавказ), 21 февраля 1873 г. (Кола, Архангельской губ.), 4 января 1886 г. (г. Чембар и др., близ Пензы). Два последних пункта далеки от сейсмических районов, как и Борисовский уезд б. Минской губ., где 10 (22) декабря 1887 г. «был слышен подземный гул, подобный грому, в этот же момент во многих домах разбились стекла», хотя болид замечен не был (из-за пасмурной ночи или света дня?). 31 августа 1856 г. в Киренске отмечено, как тектоническое, сильное землетрясение, попавшее в каталог Мушкетова — Орлова, но В. А. Обручев [861] нашел указание, что сначала был «в таежной пади сильный свет, как бы огненный, и затем уже произошли взрывы и трясение земли».

В нашем столетии отмечен ряд метеоросейсмических явлений. Кроме описанных В. Н. Мамонтовым (см. рис. 259), можно упомянуть землетрясение при падении метеорита в Нагольд-Хайтербахе

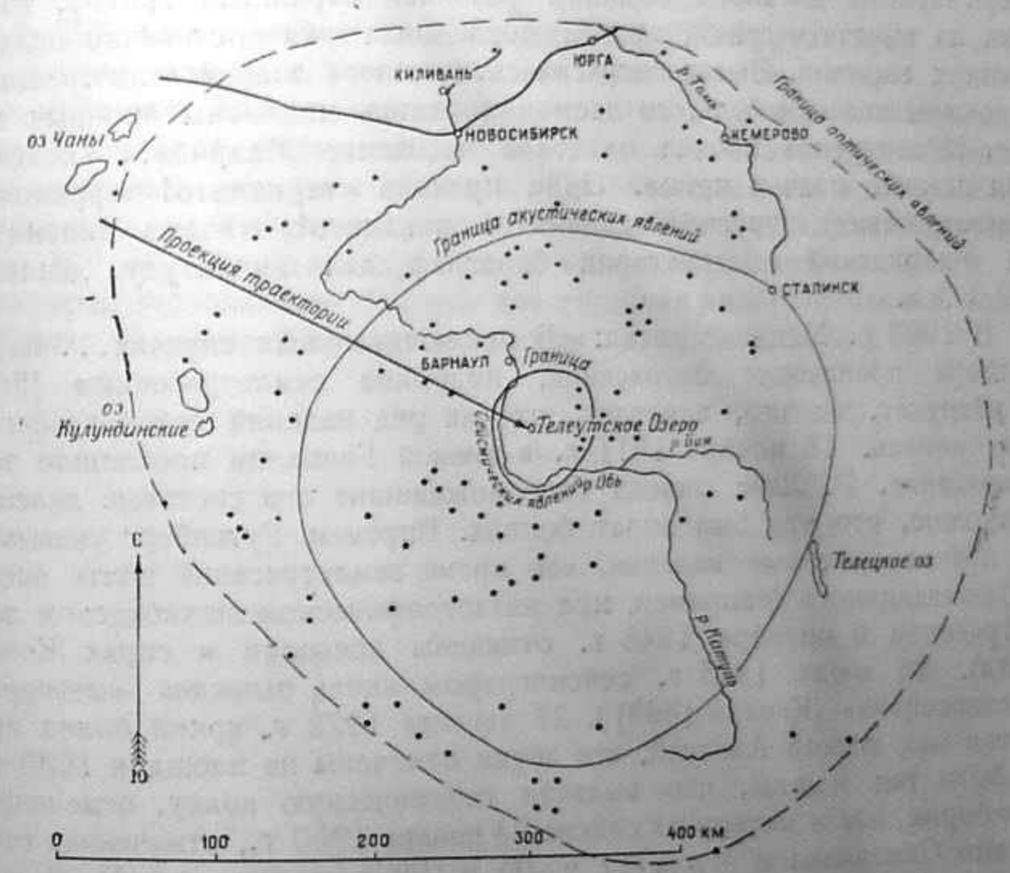


Рис. 259. Область распространения оптических, акустических и сейсмических явлений при полете метеорита Телеутское Озеро 22 мая 1904 г. (по В. Н. Мамонтову). Точки — пункты наблюдений.

(Вюртемберг) 26 января 1906 г., отмеченное как сейсмографом в Хохенгейме (К. Манн), так и людьми. При падении Тунгусского метеорита на иркутской сейсмограмме оказались две волны — сейсмическая и воздушная; при прохождении последней под влиянием переменной нагрузки на почву сейсмограф работал, по-видимому, как наклономер, и потому зарегистрировал ее [866]. А. В. Вознесенский [838] писал: «Можно считать установленным, что падение метеоритов может производить и производит в наше время землетрясения, чувствительные для наших современных сейсмографов на расстоянии

до 900 *км* от места падения». Гиперсейсмы отмечены 9 февраля 1913 г. (Онтарио), 28 октября 1938 г. (Тадж. ССР), 21 января 1946 г. (метеорит Крымка, УССР) и в других случаях.

Метеорные гиперсейсмы могут быть весьма сильными, например, при падении метеорита Л'Эгль (Франция) 26 апреля 1803 г. звуки были слышны на площади радиусом 150 *км*, а в самом Л'Эгле почва дрожала и некоторые дома обрушились, что соответствует баллу 7—8. Особенно ярко описано падение метеорита 10 февраля 1896 г. в Мадриде, причем «через полторы минуты (после полета сверхъяркого дневного болида), раздался страшный грохот, точно залп из тысячи орудий, за ним последовал ряд постепенно ослабевающих взрывов. Земля сотрясалась... много зданий дали трещины, опрокидывалась мебель, со звоном лопались миллионы оконных стекол. Неописуемая паника охватила население Мадрида... повсюду был слышен плач и крики. Одни кричали «терремото! терремото!» (землетрясение), другие «динамито! динамито!» (взрыв динамита). На Мадридской обсерватории барограф дал амплитуду давления в 2,3 *мм*.

В 1909 г. Меннинг писал: «В исключительных случаях... взрыв метеора производит сотрясение, подобное землетрясению» [867]. Ф. Эррулат, однако, замечает, что на ряд падений сейсмографы не реагировали. 16 ноября 1911 г. в южной Германии произошло землетрясение, Р. Лаис описал сопровождавшие его световые явления; возможно, что это был полет болида. Впрочем, Гутенберг указывает на другие световые явления, «во время землетрясений почти всегда наблюдающиеся» (например, при катастрофическом ашхабадском землетрясении 6 октября 1948 г. отмечены вспышки в горах Копет-Дага). 26 июля 1915 г. сейсмографом вновь записана «метеорная псевдосейсма» (Кервэн [869]), 27 августа 1922 г. яркий болид пролетел над южной Англией, его звуки отмечены на площади 1600 $км^2$ и были так мощны, что вызвали сейсмическую волну, отмеченную прибором, как и метеорная сейсма 24 января 1950 г., отмеченная станциями Самарканд и Мары (17 ч. 05 м. 09 с. миров. вр.). П. Л. Драверт [859] относит к метеорным гиперсейсмы, отмеченные 28 августа 1928 г. в Тюменском районе (Зап. Сибирь); 3 мая 1927 г. в Громогласове, Омской обл., 17 февраля 1929 г. в Шенкурске, Сев.-Двинской обл. (сотрясалась земля, лошади падали наземь), в сентябре 1930 г. в районе оз. Селеты-Денгиз, Казахстан и 28 (?) декабря 1934 г. в Марьино близ Нерчинска. Кроме того, 4 июля 1928 г. после полета болида близ Уфы «тихо дрожала земля», приложив ухо к ней, можно было слышать «гул, очень похожий на гром» *). 27 декабря 1953 г. подобное явление отмечено на Южном Сахалине А. М. Кропачевым. Отсюда мы видим, что метеорные гиперсейсмы не столь редки; это понятно, так как суточное число звуковых болидов должно насчитываться тысячами; число же тектонических землетрясений, доступных человеку, составляет для всей Земли за сутки около 300. Рассматривая даты приведенных землетрясений, можно видеть, что большинство их падает на зимний период; то же имеет место и для тектонических землетрясений и удовлетворительного объяснения не имеет.

*) Есть туркменская народная сказка (по М. А. Сакали, запись 1944 г. фонд АН ТССР, пакет 553, стр. 11—12) о том, как «наступила ночь; темнота; все тихо. Вдруг по небу летит пламя... Юноша... схватил лук и стрелы и выстрелил... в середину огня. Огонь ахнул. Задрожала земля и небо. Юноша упал без чувств».

§ 357. Связь изосейст с изофонами. Нанеся на карту пункты наблюдения звуковых и сейсмических явлений при полете какого-либо крупного болида, легко увидеть, что область сейсмических явлений невелика, поперечником 10—20 *км*, и охватывается обширной площадью звуковых явлений. Проведя изофоны и *изосейсты*, мы увидим, что приблизительно изосейста балла 4 лежит близ изофоны 100 *дб*. При цилиндрической волне и расстоянии 20 *км* до траектории это означало бы, что для создания гиперсейсмы в 4 балла требуется не менее 100 *квт* мощности воздушной волны.

ГЛАВА 33

ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ МЕТЕОРЫ

§ 358. Введение. За последние годы все более и более выясняется фильтрующая роль земной атмосферы в отношении метеоров. Выяснено, что метеорные тела с большими скоростями полностью разрушаются в воздухе и не могут достигать поверхности Земли в виде метеоритов. Последние могут выпадать лишь в том случае, когда их геоцентрические скорости были минимальны, т. е. радианты находились в области антиапекса. Было найдено [594, 604], что микрометеориты, имея малые начальные скорости, теряют их в атмосфере настолько, что даже не покрываются корой плавления и не светятся, как метеоры. В СССР были найдены [169, 872, 893] тригонометрические высоты промежуточной группы тел — телескопических метеоров, медленных и слабо светящихся (рис. 260). Эти высоты оказались в два-три раза ниже обычных, что является принципиально новым результатом. Таким образом, природа телескопических метеоров в значительной мере раскрывается методами метеорной геофизики и потому необходимо перейти здесь к ее рассмотрению.

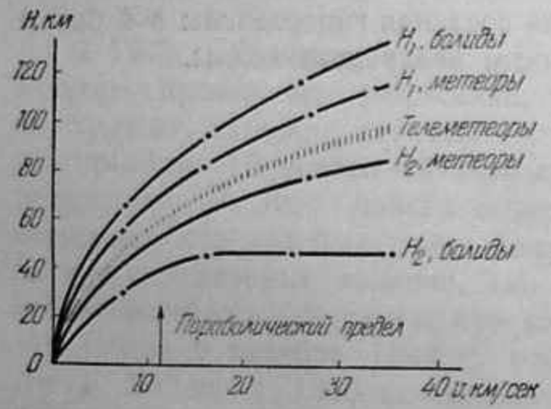


Рис. 260. Высоты телеметеоров, метеоров и болидов в функции скорости (болиды — по 405 высотам каталога Нисля — Гофмейстера, метеоры — по 1000 высотам каталога Деннинга).

§ 359. История вопроса. После изобретения телескопа усердные наблюдатели не могли не видеть «телеметеоров», как мы предложили для краткости их называть [173], но, вероятно, не придавали им значения, как и обычным метеорам в то время. Впервые 28 июня 1795 г. Шретер в Лилиентале отметил «молочно-серый» слабый метеор, пересекавший поле зрения его рефлектора. Производя градусные измерения в Пенсильвании, Месон в первой декаде августа 1839 г.

заметил около 50 телеметеоров. При составлении «Боннского Обозрения» Аргеландер не раз замечал метеоры 7—9 вел. Он считал, что их в 40 раз больше, нежели обычных. За 1844—1851 гг. Ю. Шмидт отметил 146 телеметеоров 7—11 вел. Рейман в кенигсбергский гелиометр видел их неоднократно. В 1854 г. Виннеке отметил 68 телеметеоров, причем параллельно простым глазом их наблюдал Папе. За 32 часа совместных наблюдений они отметили соответственно 45 и 312 объектов. В 1865 г. Г. Ньютон попробовал впервые оценить их количество в час на всем небе $N_n = 1582$, более точно по перерасчету Оливье $N_h = 4042$. 30 августа 1880 г. Шафарик в Праге наблюдал необычное падение: на протяжении 6 часов в $6^1/_2$-дюймовый рефрактор с полем 45′ он отметил 50—100 метеоров: на следующую ночь их оказалось 20. С 1881 г. телеметеоры начал отмечать Деннинг в Бристоле (Англия). К 1896 г. за 727 часов наблюдений с 10-дюймовым рефрактором он отметил их 635, а до своей смерти в 1931 г. — 1062. Брукс 28 ноября 1883 г. отметил уже упомянутый необычайный рой телеметеоров. В 24-дюймовый телескоп Флагстаффской обсерватории (Аризона) Си обнаружил в 1899 г. телеметеоры до 15 вел., подобные паутинке; он оценил их число «5 за ночь» при поле всего 6′ диаметром, откуда их общее число для Земли в целом за сутки составит $1{,}2 \cdot 10^9$. В 1914 г. Оливье [366] опубликовал данные о 152 телеметеорах, замеченных при наблюдениях переменных звезд, в 1929 г. — еще о 797. Но эти наблюдения были случайными и природа телеметеоров оставалась загадочной; чем больше их наблюдали, тем меньше видели сходства с обычными метеорами. Движение их представлялось совершенно хаотичным (рис. 261), вид — необычным (например, заметные диски, более яркие к краям, туманные массы неправильной формы и т. д., рис. 262).

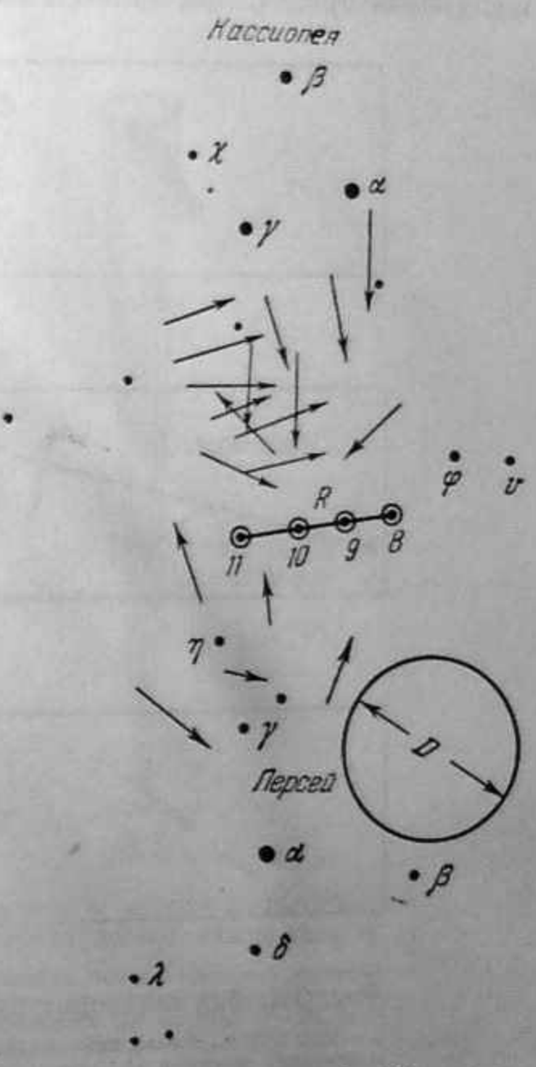


Рис. 261. Телеметеоры 8—10 августа 1937 г. вблизи радианта R Персеид не выходят из этого радианта (по В. Н. Петрову). D — поле зрения бинокля.

Первые систематические наблюдения телеметеоров были предприняты на Московской обсерватории Э. К. Эпиком [545] в 1921 г., который с помощью кометоискателя стремился найти более точно радиант Персеид. Однако площадь радианта оказалась больше площади поля зрения; три метеора из 14 были искривлены, так как шли

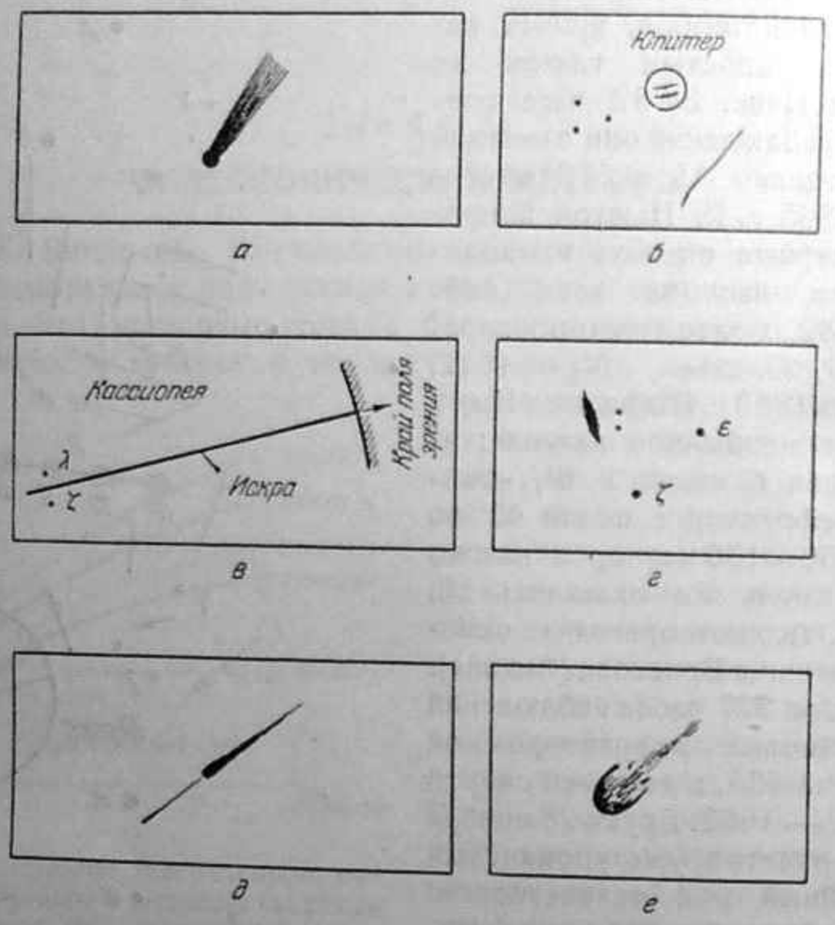


Рис. 262. Вид некоторых замечательных телеметеоров.

а — 10/X 1928 г., 6 вел., набл. В. М. Чернов; *б* — 25/IX 1928 г., 7 вел., изогнутый, шириной 4′′, очень медленный; *в* — 8/IX 1932 г, 5 вел., выбросил вбок искру 7,5 вел.; *г* — 28/V 1933 г., 8 вел. со следом 1 *сек*, близ радианта; *д* — 28/V 1933 г., 8 вел., выбросил второй метеор в направлении движения; *е* — 28/VIII 1932 г., 6,5 вел., ширина 2—3′.

почти по лучу зрения. 23 июля 1929 г. Русское общество любителей мироведения разослало обращение к наблюдателям, в § 2 которого рекомендовались «наблюдения высот телескопических метеоров из двух мест, отстоящих на 2—5 *км*». Такие наблюдения действительно были организованы автором [169] в Ленинграде с помощью кометоискателей ЛГУ и РОЛМ; 20—22 апреля 1930 г. были получены параллаксы трех метеоров, высоты которых оказались 43, 45 и 63 *км*. Около того же времени в Тарту Эпик [195] организовал базисные наблюдения; были опубликованы только средние значения, оказавшиеся

несколько ниже высот обычных метеоров. Отдельные высоты даны не были, ввидимому, вследствие их разброса и допущения, что «слишком низкими» они быть не могут. Систематические наблюдения телеметеоров были продолжены автором в 1932 и 1933 гг. [173]. Они дали 172 объекта (включая наблюдения 1930—1931 гг.), исследование

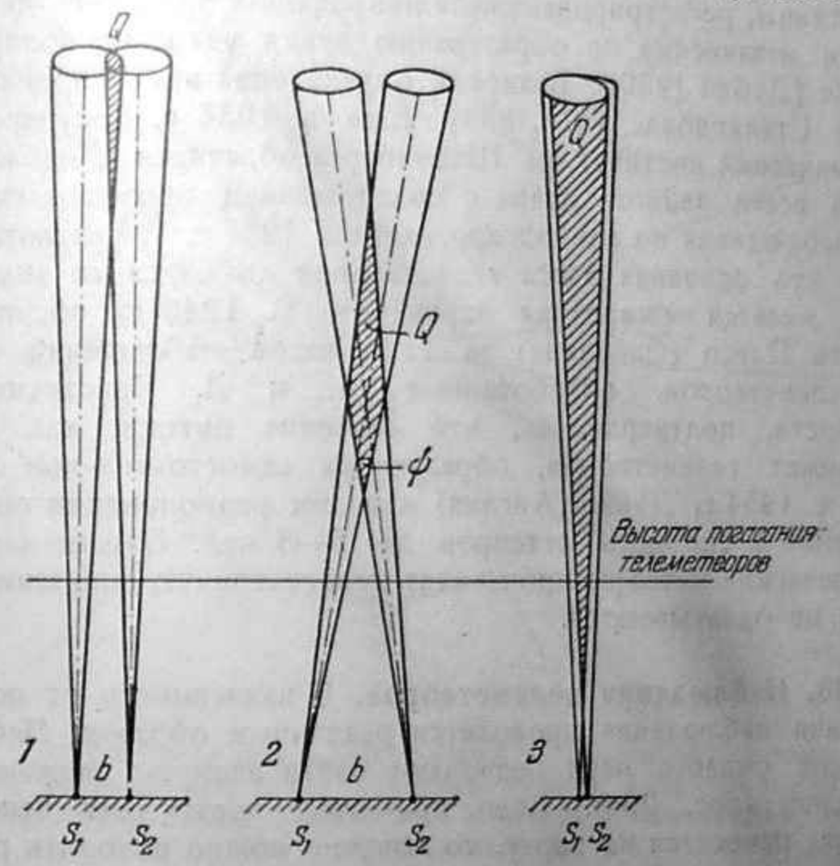


Рис. 263. Влияние величины базиса и метода наблюдений на определение тригонометрических высот телеметеоров:

1 — слишком большой базис, улавливаются только высокие метеоры; *2* — метод скрещенных осей дает высоты, зависящие от угла скрещения ψ; *3* — при коротком базисе охватываются все высоты. *Q* — область перекрытия, $S_{1,2}$ — пункты наблюдений.

которых показало деление на два класса: а) продолжение ряда обычных метеоров в сторону низких яркостей и б) «собственно телескопические» метеоры, медленные, красноватые и, как потом оказалось, с низкими высотами. С 1933 г. телескопические исследования метеоров проводились в Сталинабаде (И. С. Астапович, затем В. П. Цесевич, А. М. Бахарев и др.). В Саратове в 1936—1940 гг. систематические наблюдения телеметеоров проводил В. Е. Штепан [890, 898]. Очень ценный статистический материал дали 3542 наблюдения А. М. Бахарева в 1937—1949 гг.: наблюдая по 7—8 и даже 9 часов подряд, он обнаружил новые закономерности [176, 875—884]. Однако картина пространственного положения телеметеоров продолжала оставаться неясной. Поэтому в Ашхабаде в 1947—1948 и 1954—1956 гг.

были проведены [870, 874, 893] серии тригонометрических определений высот, вновь подтвердивших наличие больших параллаксов и малых высот телеметеоров (H=30—60 *км*) (рис. 263). В 1951—1952 гг. наличие метеорных частиц на высоте $H=40$ *км* было доказано в США подъемами ракет: каждую секунду ракета встречала в среднем 2 частицы, регистрировавшиеся микрофоном при ударе об обшивку ракеты и независимо по образованию лунки удара на полированной пластинке (Дубин [900]). Базисные определения высот производились также в Сталинабаде [875, 884]. Еще в 1936 г. Государственный астрономический институт им. Штернберга обратился к наблюдателям метеоров всего земного шара с предложением провести систематические наблюдения по единой программе в 1937 г. В результате было найдено, что основная масса телеметеоров движется «с эклиптики», поэтому имеется «широтная вариация». В 1946 г. обсерваторией Скальнате Плесо (Словакия) за 1126 часов наблюдений отмечено 3925 телеметеоров, обработанных М. и Л. Кресаками [903]. В частности, подтвердилось, что большие потоки, как правило, не содержат телеметеоров, образующих самостоятельные системы. Начиная с 1954 г. Дэвис (Англия) методом радиолокации определяет направление и скорость метеоров до 7—8 вел. Однако собственно телескопические метеоры производят недостаточную ионизацию и этим методом не охватываются.

§ 360. Наблюдения телеметеоров. В зависимости от поставленной задачи наблюдения проводятся различным образом. Наблюдения в зенитной области неба позволяют найти азимуты движений непосредственно (рис. 264). Если при этом инструмент неподвижен, а метеоры наносятся на карту, то попутно можно находить радианты; при движении трубы за небом видна одна и та же область неба и такая задача затруднена; поэтому лучше выбрать 2—3 разных участка неба и наблюдать их последовательно (рис. 265). Наблюдения в зените имеют и то преимущество, что метеоры здесь ближе и видны более слабые из них. Если ведутся базисные наблюдения, то параллаксы в зените также наибольшие и влияние ошибок наименьшее. При наличии крупных инструментов важно найти распределение телеметеоров по звездным величинам (функцию светимости), до сих пор почти неизвестное. Для статистики численности, физических свойств, суточной и годичной вариаций и т. д. целесообразно применять минимальные увеличения и наибольшее поле зрения (см. гл. 8). Среднее часовое число телеметеоров $n_h \sim 1-2$ и почти не зависит от телескопа, так как с увеличением проникающей способности уменьшается поле зрения. Для некоторых целей достаточно применение бинокуляров и даже биноклей. В 1951 г. в Ашхабаде наблюдалась в бинокли околозенитная область 8 наблюдателями одновременно; у каждого был свой участок неба, в сумме покрывалась площадь около 400 кв. град. В итоге в среднем каждые 5 минут

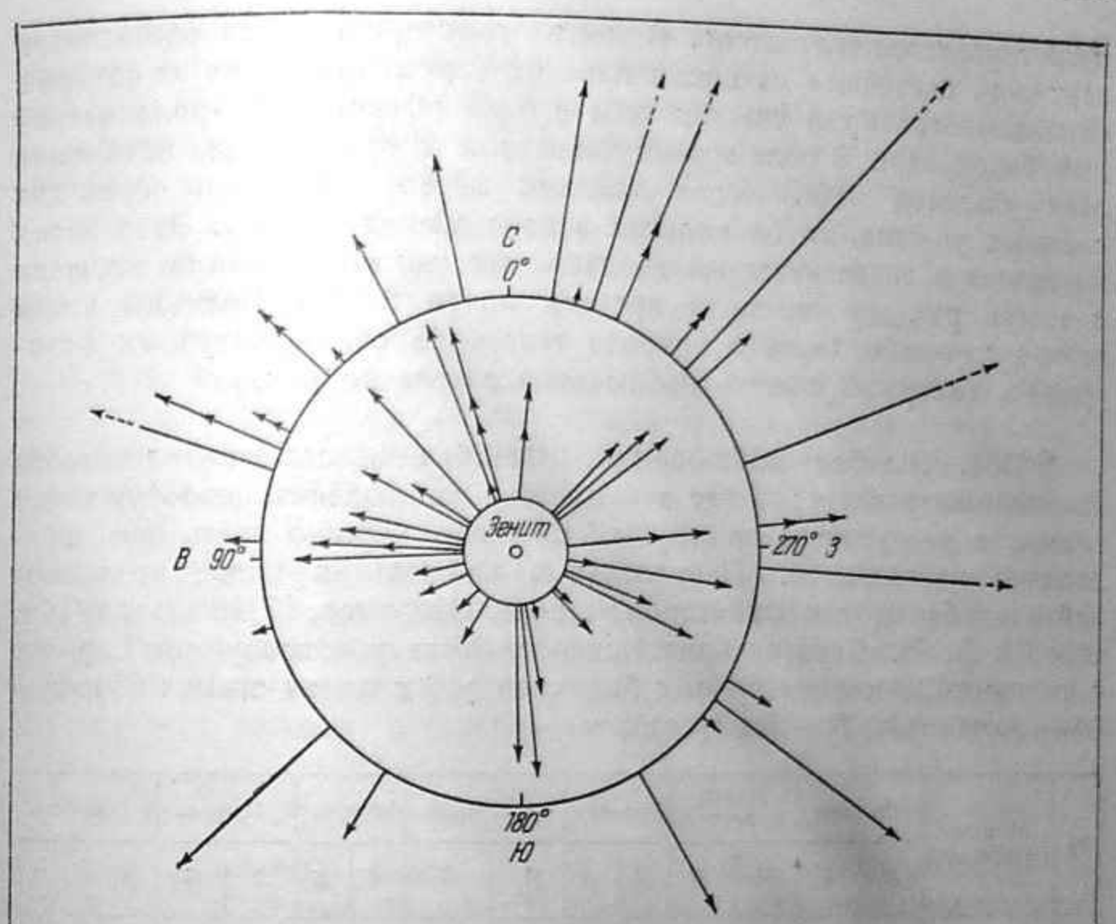


Рис. 264. Распределение направлений и скоростей телеметеоров (по 74 наблюдениям В. Е. Штепана в июле 1954 г. в Чарджоу). Заметно преобладание направлений к северу и наибольших скоростей к северо-западу.

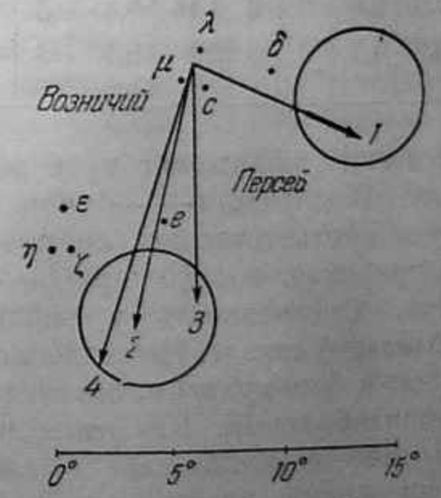


Рис. 265. Наблюдение телеметеоров в двух площадках неба дает более уверенное определение радианта (16 сентября 1933 г., интервал наблюдений — 67 минут, круг — поле зрения бинокля).

регистрировался телеметеор. В том же году применялось «фасеточное зеркало», состоящее из шести плоских зеркалец, каждое из которых отражало некоторый участок неба в один объектив (80-миллиметровый бинокуляр). В поле зрения диаметром 3° происходило наложение всех участков неба. Когда длинный метеор проходил через два смежных участка, то он мелькал в поле зрения дважды. Этот метод выигрыша в числе метеоров не дает, так как выигрывая по площади в шесть раз, мы теряем в яркости почти 2 вел. Если мы хотим сейчас что-либо знать о природе телеметеоров, недоступных фотографии, то нужно ставить наблюдения с телескопами.

§ 361. Ошибки наблюдений. Ошибка нанесения телеметеора практически равна $\varepsilon : g$, где ε — ошибка наблюдения невооруженным глазом, а g — увеличение трубы. Ее надо хорошо знать при определении параллаксов. Параллельные наблюдения также позволяют найти ошибки других параметров метеора. Например, 17/18 июля 1946 г. автор и А. М. Бахарев близ Искандер-Куля у астропункта Сарытог с помощью 30-миллиметровых биноклей ×6 с полем зрения 8° нашли (*А* — Астапович, *Б* — Бахарев):

№	Момент (миров. вр.)	Зв. вел.		Длина пути		Цвет		Продолж.		Очерч.		Полож.		Скорость	
		А	*Б*	*А*	*Б*	*А*	*Б*	*А*	*Б*	*А*	*Б*	*А*	*Б*	*А*	*Б*
1	22^h10^m	—	7,2	—	1°,5	—	0	—	$0^s,12$	—	1	—	++	—	7°,2
2	16	7,5	7,8	2,°8	2,0	4	5	$0^s,15$	0,15	5	3	+—	+—	19°	14
3	21	8,0	8,0	3,0	3,0	0	0	0,15	0,15	3	2	+—	+—	21	21
4	42	8,0	9,0	1,0	2,0	6	0	0,45	0,3	5	3	++	++	2,2	6,6
5	56	7,7	7,5	3,5	4,2	4	0	0,2	0,3	4	1	++	+—	17	14

Здесь знак (—) означает положение пути за краем поля зрения, а (+) в его пределах. В случае (+—) или (—+) мы не видим начала или конца пути соответственно («обрывок»); при (——) не видны оба конца («отрезок»), только при (++) метеор виден на всем протяжении пути. Очерченность у наблюдателя *Б* дана не в 5-балльной, а в 3-балльной шкале. Наблюдения, проводимые параллельно глазом, биноклем и бинокуляром, показывают, что в последнем случае его длина пути наибольшая. Для нанесения удобно применять крупномасштабные копии звездных карт (1 *см* ~ 0°,1), где звезды изображены черными кружками, чтобы их можно было видеть в темноте. Для бинокля и бинокуляра удобны атласы Бечваржа и Михайлова (большой), при больших увеличениях — Аргеландера. Телескоп позволяет найти цвет метеоров, слишком слабых при наблюдениях простым глазом. Саратовские наблюдения 1936 г. показали, что

геометрические, кинематические и физические характеристики метеоров с помощью телескопа определяются точнее [896]. В 1949 г. А. М. Бахарев и О. В. Добровольский (Сталинабад) исследовали ошибки из параллельных наблюдений [877]; ошибки нанесения оказались $\Delta\alpha = \pm 3'$, $\Delta\delta = \pm 1'$, длины $\Delta\lambda = 4'$—$8'$ (систематическая), цвета 1—2°, яркости 0,2—0,6 вел., продолжительности ±0,2 сек. Наиболее продуктивны первые четыре часа наблюдений, далее наступает утомление.

§ 362. Яркость телеметеоров. На расстоянии $r = 40$ *км* метеор $m = +6$ вел. имеет силу света I только 13,5 *м. св.* Все более слабые объекты будут телескопическими. При $m = +15$ вел., $I = 0{,}001$ *м. св.*, что только в $2 \cdot 10^3$ раз больше силы света вспышки α-частицы в спинтарископе (Ашхабад, 1950 г.). В целом телеметеоры — сравнительно слабые объекты, наблюдающиеся на обширном диапазоне видимых яркостей (в пределах $1 : 10^4$ или 10 величин). Было бы крайне важно установить, имеются ли телеметеоры слабее +16 вел. и до какой видимой яркости они существуют. Поверхностная яркость B для круглого метеора поперечником $d = 60''$ составляет в стильбах:

m (зв. вел.) . .	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$B \cdot 10^6$ (*сб*) . .	12,5	5,0	2,0	0,8	0,32	0,12	0,05	0,02	0,008

Если телеметеор имеет d в k раз меньше, то B окажется при той же m в k^2 раз больше. В целом B, измеряемые миллионными долями стильба, крайне слабы и сравнимы с яркостью свечения разреженных газов. Но другие метеоры не имеют заметных d и у них B значительно больше.

Следует отличать телеметеоры от случайно попавших в поле зрения участков пути более ярких метеоров, например, при их появлении. Поэтому данные о яркости и других параметрах следует выводить по «целым» траекториям. При неподвижном глазе пролетающий метеор кажется более слабым («оптическая» потеря яркости Δm). В 1944 г. мы провели опыты с отражением γ Андромеды во вращающемся с разной скоростью зеркале на фоне звездного неба. При баллах угловой скорости 1, 4 и 7, соответствующих 6, 20 и 67° *сек*$^{-1}$, ослабление Δm было +0,2, +0,6 и +2,0 вел. В 1933 г. в Сталинабаде, двигая телескоп так, чтобы известные звезды пересекали поле зрения, нами было найдено при $\omega = 10$, 80 и 400° *сек*$^{-1}$ ослабление $\Delta m = +0{,}5$, 1,0 и 1,5 вел. Возможно, более яркие звезды дают меньшую потерю. Эпик в 1930 г. этим же способом в Тарту нашел при $\omega = 100$ и 400° *сек*$^{-1}$ потерю $\Delta m = +0{,}1$ и 0,6 вел.

§ 363. Численность телеметеоров. В 1842—1853 гг. Ю. Шмидт в Афинах видел в телескоп один метеор +1 вел., один — второй, два — третьей, четыре — четвертой и восемь — пятой. По нашей терминологии это «псевдотелеметеоры», так как их можно видеть

и без телескопа. Далее, за восемь лет 1844—1851 гг. тот же наблюдатель отметил 15 метеоров седьмой величины, 39 — восьмой, 52 — девятой, 32 — десятой и восемь — одиннадцатой. Таким образом, после максимума на 9 вел. начинается убыль их числа. Это наблюдается всегда и на всяком инструменте, так как более слабые метеоры труднее заметить. Обычно мода распределения лежит на 2 величины выше предела телескопа. Для учета потери Эпик в Тарту в 1928—1930 гг. применил метод двойного счета. За 76,2 часа наблюдений кометоискателями с полем 6°,0 он нашел:

Зв. вел. метеора	<4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10,5
Число метеоров:							
наблюденное	0	4	12	19	62	74	133
истинное	0	4,9	15,8	24,2	79	140	1570

Отсюда видно, как много телеметеоров теряется, особенно слабых, как и при наблюдениях простым глазом. При наблюдении в бинокль процентное распределение 117 телеметеоров в первом полугодии 1953 г. и 119 — во втором полугодии 1952 г., по В. Е. Штепану (Чарджоу), следующее [897]:

Зв. вел. метеора	0—2	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	Всего
1952 г., %	5	4	3	9	24	38	17	100%
1953 г., %	3	2	3	10	23	50	9	100%

Ход в обоих полугодиях близок, псевдотелеметеоров почти поровну — 21 и 18%. В. В. Сакк и М. К. Романец (Кривой Рог) в 1938—1940 гг. нашли последних 22% [352]. Наблюдения Альдена в 26-дюймовый рефрактор указывают, что в действительности нарастание числа продолжается до 13 вел. и видимо дальше. Если видимое в бинокль число n телеметеоров исправить за потери бокового зрения (гл. 11, метод зон видимости), то нарастание n при изменении видимой яркости на 1 зв. вел. будет таким же, как для 26-дюймового телескопа [173]. Если S_0 есть площадь поля зрения, а S площадь зоны, то получается

Зв. вел. метеора	4	5	6	7	8	9
$S:S_0$	>1	1,00	0,68	0,25	0,084	0,044
Наблюденное число n	10	15	16	23	23	—
Истинное число N	10	15	24	92	276	—

Таким образом, при наблюдении в бинокль теряется 33% метеоров шестой вел., 75% — седьмой и 91% — восьмой. У хороших наблюдателей при параллельных наблюдениях 75% общих метеоров; слабые метеоры редко оказываются общими. Для кометоискателя с $S_0 = 20$ кв. град. по А. М. Бахареву $N:n = 1{,}2$, 3 и 17 для 8, 9 и 10 вел. Учитывая это и экстраполируя до $+16$ вел., можно найти, что абсолютное часовое число телеметеоров по ашхабадским данным достигает $N_h = 10^8$ для всей Земли в целом. «Микрометеориты» Уиппла сюда не входят как оптически ненаблюдаемые.

§ 364. Распределение по зенитному расстоянию. Представим себе, что мы определяем число метеоров и их яркость на зенитных расстояниях $z = 0$, 60 и 80°; при этом просматривается одинарная, двойная и шестикратная толща атмосферы. В августе 1954 г. А. К. Терентьева [892] провела подобные наблюдения с биноклем в Ашхабаде. Если бы мы могли видеть все метеоры, то их число пропорционально возрастало бы к горизонту. Наблюдения показывают, что это происходит, но не пропорционально $\sec z$, а медленнее, за счет ослабления слабых метеоров, «выбывающих из игры», а именно:

Область неба	Метеоров ярче 6 вел.	Метеоров слабее 6 вел.	Всего
$z = 0°$	11% (1)	89% (8)	100% (9)
60	50 (9)	50 (9)	100 (18)
80	82 (14)	18 (3)	100 (17)

Действительно, в зените слабых метеоров гораздо больше, чем ярких, у горизонта — наоборот. Другая серия наблюдений с биноклем подтвердила это. Можно думать, что прежде всего перестают быть видимы метеоры собственно телескопические, как абсолютно более слабые.

§ 365. Распределение направлений. Наблюдения в зенитной области неба, проведенные В. Е. Штепаном в 1953 г. в Чарджоу [897], дали следующее (азимуты указывают, куда двигались телеметеоры):

Направление движения	С	В	Ю	З	Всего
Пределы азимутов (геод.)	315°—45°	45°—135°	135°—225°	225°—315°	—
Число телеметеоров, n	38	26	29	41	134
То же, %	28	19	22	31	100%

В каталоге 608 телеметеоров В. Е. Штепана [895] по данным 30 наблюдателей СССР 1923—1939 гг. приведен позиционный угол P направления полета с направлением на северный полюс мира, считаемый против часовой стрелки. Оказывается, что в пределах южной четверти ($P = 135$—$225°$) лежат векторы 150 телеметеоров, в западной — 106, в северной — 90 и в восточной — 126. Это значит, что в обоих случаях преобладают движения на СЗ, т. е. с юга и с востока. По 343 наблюдениям 1941 г. А. М. Бахарев [883] независимо нашел преобладание на запад, к антиапексу. В 1951 г. в Ашхабаде было обнаружено, кроме того, что основная масса телеметеоров идет из области эклиптики, важным исходным центром является область апекса. Тогда суточная вариация даст вечером преобладание западных метеоров, догоняющих Землю, а с восходом апекса (в полночь) — восточных; при кульминации апекса в 6 час. утра преобладают направления к югу. Наблюдения Бахарева 1941 г. вполне это подтверждают. Годичная вариация направлений, исследованная в 1951 г.

в Ашхабаде, определяется высотой эклиптики и апекса: при их низком стоянии в полночь летом в зените преобладают направления с Ю и В; когда же зимой эклиптика проходит близ зенита, то естественно ожидать более беспорядочного распределения направлений с преобладанием метеоров с В. Наблюдения 1952 г. в Ашхабаде подтвердили этот прогноз. Наблюдения Эпика в Тарту 1928—1930 гг.

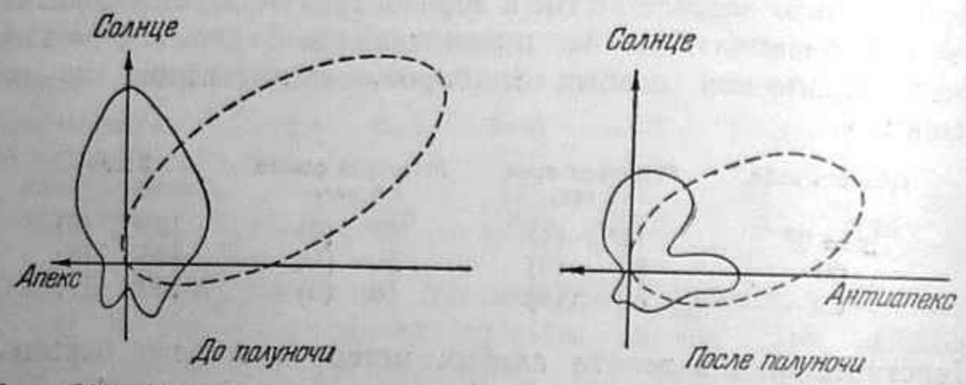


Рис. 266. Распределение направлений движения телеметеоров до и после полуночи в области северного полюса мира (по Э. К. Эпику, 1929—1930 гг.). Пунктиром указано теоретическое распределение для беспорядочно направленных параболических скоростей.

в области северного полюса мира (рис. 266) дали такой ход до и после полуночи:

Направление ϑ . . .	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
До полуночи $n=268$	21	16	18	9	14	11	8	15	33	52	40	31
После полуночи $n=188$	31	17	14	10	10	2	2	7	16	30	31	18

Здесь $\vartheta=0°$ соответствует направлению на апекс, 90° на антигелий, 180° на антиапекс и 270° на Солнце. Видно, что, пока апекс находится под горизонтом, преобладают направления от эклиптики; с восходом апекса возникает вторичный максимум к антиапексу, растущий к утру. С этой точки зрения, вероятно, можно объяснить данные Скальнате Плесо [903].

Данные «апекс-эксперимента», проводившегося радиометодами в Англии в 1949—1951 гг., также соответствуют этой расшифровке направлений.

§ 366. Часовые числа и их вариации; вспышки активности. Если отвлечься от сказанного о том, что видимое число телеметеоров n зависит от прибора, наблюдателя, зенитного расстояния наблюдаемой области, то останутся широтная, суточная и годичная вариации. В отношении первой естественно, что по мере приближения наблюдателя к земному экватору n будет расти, так как область эклиптики и в частности апекс будут ближе к зениту. Назовем часовое число метеоров в час на 1 кв. град. в зените «метеорной

плотностью» ν. На диапазоне инструментов от 28 до 162 *мм* ν практически одинаково и составляет около 0,021, а с учетом потерь $\nu=0{,}025$ [973]. Радиолокация дает различные значения n в зависимости от параметров станции, например, $n_h=24$ на площади $S_0=400$ кв. град. или $\nu=0{,}06$. Совместные данные наблюдений обычных и телескопических наблюдений дают такие плотности:

Зв. вел. метеора .	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Плотность ν . . .	0,001	0,002	0,003	0,01	0,03	0,08	(0,2)	(0,1)	(0,1)	(0,3)

В некоторые ночи или отдельные часы ν может возрастать на один порядок. Это—«вспышки метеорной активности», примеры которых приводились. М. и Л. Кресак по 3925 наблюдениям 1946—1953 гг. бинокуляром Комет-Бинар 25×100 *мм* за 1117 часов наблюдений нашли [903] даты повышенной телеметеорной активности:

Дата	Авг. 4	Сент. 1	Сент. 28	Окт. 8	Дек. 1	Дек. 10
Долгота Солнца .	131°	158	184	194	248	257°

Вспышки активности отмечены в 1934 г. Поултером на станции «Литтл Америка» в Антарктиде, А. М. Бахаревым [882] на Искандер-Куле в 1937 г., Калебом в 1951 г. в Польше, не считая наблюдения Шафарика в Праге 1880 г. 16 мая 1851 г. Аргеландер в Бонне видел рой телеметеоров, летевших по 3—4 одновременно на протяжении семи минут. Необходимо при таких случаях обращать внимание на появление светлых полос на небе и на состояние ионосферы.

§ 367. Суточная вариация телеметеоров существенно отлична от вариации обычных метеоров: вечером наблюдается довольно большое число их за счет того, что число догоняющих метеоров из антиапекса велико. К полуночи n_h уменьшается, а после восхода апекса увеличивается, но не так сильно, как у обычных метеоров. Это указывает, что среди телеметеоров, возможно, относительно больше догоняющих, чем встречных, по сравнению с обычными метеорами. Кроме того, все ряды наблюдений (А. М. Бахарев, В. Е. Штепан, Гофмейстер, Хоппе, И. С. Астапович и др.) показывают резкий «полуночный» минимум, найденный в СССР в 1935 г. [173]. Он проявляется также в других явлениях и вызван геофизическими причинами. Для ориентировки приведем кривую суточной вариации по 186 метеорам 1930—1933 г. [173]:

Местное время	19	20	21	22	23	0	1	2	3
Часовое число	7,5	4,0	2,7	2,1	2,3	1,7	1,8	2,1	3,5

§ 368. Годичная вариация выражается в повышении телеметеорной активности во втором полугодии сравнительно с первым, например, по В. Е. Штепану соотношение n_h составляет 1,0 : 1,55 (1937—1929, Саратов), по А. М. Баха-

реву 1,13 : 1,27 (1941, кометоискатель). По данным каталога В. Е. Штепана, наблюдений А. М. Бахарева и чешских астрономов (Скальнате Плесо) можно привести такую годовую вариационную кривую:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
СССР	1,1	1,5	1,3	1,5	1,2	1,5	2,6	1,5	0,9	1,1	1,2	1,3
Чехословакия	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3

§ 369. Отношение к большим потокам. Наблюдая телеметеоры в эпохи активности крупных потоков, нетрудно заметить, что их влияние никак не сказывается на телеметеорной активности: часовые числа не увеличиваются, направления телеметеоров не проходят через радиант потока (рис. 261). Как редкое исключение, можно видеть, например, телескопические ориониды или аквариды 9—11 вел. То же хорошо видно из годичной вариации, где большие потоки не проявляются. Однако есть исключения: Геминиды имеют много телеметеоров, как по визуальным наблюдениям в СССР, так и по радиолокации (СССР [282] и Англия). Персеиды дают небольшой максимум телеметеоров 4 августа (так же, как и болидов после 11 августа), очевидно, вследствие сортировки частиц в направлении радиуса-вектора орбиты; Дракониды 9 октября 1933 г. одновременно давали болиды и телеметеоры. Чем старше поток, тем дальше зашла дифференциация частиц по размерам и тем однороднее поток.

§ 370. Радианты. 22 сентября 1889 г. Деннинг в кометоискатель заметил три телеметеора, вылетевшие в течение 2 минут из точки, которая могла быть радиантом потока Таурид ($\alpha = 64°$, $\delta = +22°$); два из них, 8 и 9 вел., появились одновременно. Он же 3 сентября 1899 г. видел полет двух метеоров одновременно по слегка расходящимся путям от точки $\alpha = 34°{,}8$, $\delta = +33°{,}0$. Пализа в Вене 8 марта 1919 г. видел стационарный метеор в точке $\alpha = 36°{,}6$, $\delta = +13{,}°9$ (1875,0). Оба последних радианта не совпадают с обычными. В 1914 г. Деннинг заметил, что Персеиды, Леониды и др. потоки могут иметь телеметеоры. 12 августа 1921 г. Эпик в Москве по пяти и девяти метеорам 5,5—9,5 вел. нашел, как он считал, два радианта Персеид. 22 октября 1922 г. Оливье отметил телеорионид 10 величины. 15 мая 1925 г. в Николаеве автор отметил радиант по двум метеорам в бинокль и одному метеору, замеченному простым глазом; оказалось, что это известный в мае поток Геркулид ($\alpha = 249°$, $\delta = +32°$). 20 апреля 1930 г. в Ленинграде пять метеоров 6—8 вел. дали радиант $\alpha = 279°{,}6$, $\delta = +37°{,}9$ (1855,0), не совпадающий с Лиридами. 10—15 августа 1931 г. Форд и Дарлинг по 22 метеорам 7—10 вел. нашли три радианта. 28 августа 1932 г. из потока ε-Пегасид ($\alpha = 318°$, $\delta = +8°$) автор отметил шесть метеоров, из них три в бинокль (6,5—7,2 вел.), по яркости «примыкающих» к обычным метеорам этого потока. В. Е. Штепан полагает, что надо наблюдать

не менее 4 час., чтобы вывести уверенно один телерадиант. Иногда он повторяется несколько ночей подряд, как например, наблюдавшийся с 7 по 19 июля 1940 г. И. К. Кравчуком [888] и смещавшийся от $\alpha = 11°$, $\delta = +47°$ до $\alpha = 15°$, $\delta = +48°$. И. К. Кравчук правильно приписал его Персеидам, заметив, что телеперсеиды активны до обычного максимума 11—12 августа.

С тех пор было опубликовано несколько десятков радиантов. Создается впечатление, что они обнаруживаются всюду, куда ни направлен инструмент. По-видимому, во многих случаях при определении радианта не соблюдался «критерий ламбда-пси», согласно которому длина пути λ и элонгация от радианта ψ на основании формулы односторонних методов (42) удовлетворяют соотношению

$$\lambda : \psi \approx \frac{L \cos z_2}{H_2}; \qquad (173)$$

при наблюдениях близ зенита и $L : H_2 \approx 0{,}1$ критерий дает $\lambda : \psi \approx 0{,}1$ или метеор не может находиться к радианту ближе, чем на десятикратную длину пути. Далее, при выводе радиантов собственно телеметеоров, для которых очень сильно влияние сопротивления воздуха, следует помнить, что даже метеоры одного потока дадут разные «радианты». Пусть, например, отмечены два телеметеора, затормозившиеся до 2 и 4 *км/сек*; при $z_R = 45°$ разность влияний зенитного притяжения $\Delta z_1 - \Delta z_2$ — порядка десятка градусов и обратное продолжение их траекторий даст «радиант», не имеющий ничего общего с истинным. Еще в 1922 г. В. Г. Фесенков [428] указал на огромную роль сопротивления воздуха для случая телеметеоров и недавно вновь вернулся к этому вопросу. В других случаях к радиантам известных потоков относились случайные метеоры, так как не применялся критерий Федынского — Лыткиной учета физических свойств. На протяжении нескольких часов наблюдений влияние суточной аберрации, смещения радианта и особенно зенитного притяжения настолько велики (при точности нанесения положения), что без их учета для каждого метеора нельзя гарантировать, что найденная точка пересечения обратно продолженных путей является радиантом. Это может быть справедливым для быстрых высоких телеметеоров, составляющих продолжение ряда обычных метеоров. Однако число их меньше, чем телеметеоров «нижнего яруса». Даже стационарный телеметеор в точке своего появления не дает радианта, так как эта точка соответствует направлению касательной к траектории на последнем ее участке. Мы же знаем, что зенитное притяжение стремится приблизить радиант к зениту. Поэтому возникает видимая концентрация радиантов телеметеоров близ зенита, а близ горизонта их нет. Подтверждением этого являются базисные наблюдения: параллакс начала путей меньше параллакса их концов, так что эти пути обнаруживают схождение на 3° к радианту, отстоящему

на $\psi = 19°$; тогда при $\lambda/\psi = 0{,}1$ получается $\lambda = 2°$ в соответствии с наблюдением [874]. В 1923 г. Эпик [545] также отметил, что «слабые метеоры могут наблюдаться в телескоп только вблизи их радиантов», так как при малом λ невелико ψ (рис. 107). При радианте близ горизонта метеор проходит на большой высоте и разрушается прежде, чем он сможет проникнуть глубже; кроме того, из-за большой высоты он хуже замечается. Поэтому глубоко проникнуть в атмосферу могут метеоры из околозенитных радиантов, что также приводит к умеренным ψ. К сожалению, радиометоды могут дать радианты и скорости метеоров только «среднего яруса». Данных о них пока не опубликовано.

§ 371. Высоты телеметеоров. Выше отмечено деление телеметеоров на два класса в соответствии с появлением их на «среднем ярусе» $H = 80 - 110$ *км* и на «нижнем ярусе» $H = 40 - 60$ *км*. Еще в сводке Г. Ньютона 1864 г. видно, что слабые метеоры 5 вел. очень низки ($H_2 = 50$ *км*), но из-за их малочисленности это можно было приписать случайности. Анализируя высоты погасания по английским данным, Линдеман и Добсон нашли, что они дают двойной максимум распределения, разделенный, как можно видеть, прослойкой атмосферы, где температура имеет относительный максимум. Ход высот H_2 по яркости показывает скачкообразный переход со среднего яруса на нижний (рис. 123). Если определять отношение $H_1 : H_2$ совершенно независимым односторонним методом, то также легко видеть деление на две группы (рис. 267); оно одинаково хорошо выявляется наблюдениями и в Сталинабаде, и в Скальнате Плесо, а также на ходе $\tau = f(m)$. В 1931—1933 гг. в Аризонской экспедиции определялись вибрирующим зеркалом угловые скорости телеметеоров; по ним вычислялись линейные скорости, которые получились очень большими и не подтвердились впоследствии. Однако, если считать, что соответствующие им метеоры были в действительности низкими, то скорости не выйдут из параболического предела.

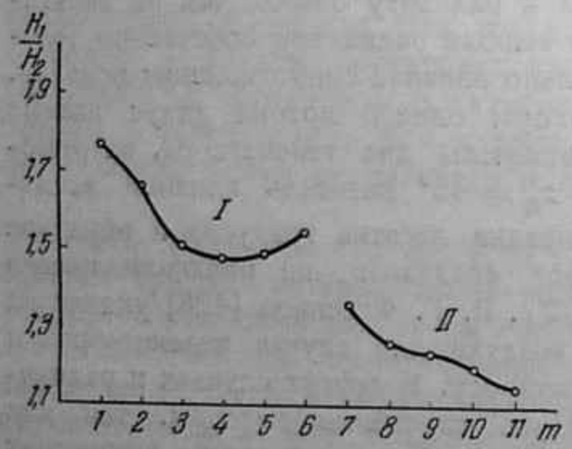


Рис. 267. Зависимость относительной высоты H_1/H_2 от видимой яркости обычных (*I*) и телескопических (*II*) метеоров (по А. М. Бахареву, 1941 г.).

При определении тригонометрических высот телеметеоров основную роль играет длина базиса: практика показывает, что при непомерно большом базисе происходит отсев низких метеоров, как обычных (Гофмейстер, П. А. Савицкий), так и телескопических (А. М. Бахарев, О. В. Добровольский). Например, для последних:

Период работы	Пункт	Наблюдатели	Длина базиса	Число метеоров	Процент общих
1928	Голландия	Ван-ден-Берг	5—15	47	0
1930 Апрель	Ленинград	Астапович И. С., Васенко Е. П.	2,08	64	10
1934 Август	»	Астапович И. С., Петров В. Н.	5,77	53	2
1939 Июль—Авг.	Искандер-Куль	Затейщиков Г. О., Бахарев А. М.	5,0	60	7
1946 Лето	»	Бахарев А. М., Катасев Л. А.	6,5	290	8
1947 »	Сталинабад	Бахарев А. М., Добровольский О. В.	4,2	1041	4
1948 »	»	Бахарев А. М., Добровольский О. В.	4,2	308	4
1947 Август	Ашхабад	Астапович И. С., Проскурина Е. М.	4,6	79	2
1947 »	»	Астапович И. С., Проскурина Е. М.	0,53	26	77
1947 Сентябрь	»	Эйдук Р. А., Кашанова З. А.	0,53	65	40
1948 Июль	»	Астапович И. С., Проскурина Е. М.	3,81	65	0
1948 Авг.—Сент.	»	Саврухин А. П., Кадыров М. Х.	0,53	80	70
1954 Август	»	Терентьева А. К., Генкин И. Л.	0,29	15	75

Таким образом, метод «короткого базиса» позволяет охватывать наибольшее общее число метеоров. При ошибке нанесения $\varepsilon = \pm 9'$ параллаксы получаются $\pi = 32' \pm 12'$, чему соответствует $H = 40$ *км*. Ничтожное число общих метеоров на длинных базисах, как и следует ожидать, относится только к высоким объектам ($H = 78 - 99$ *км*). В 1954—1955 гг. А. К. Терентьева определила 57 высот на базисе 0,29 *км*; средняя H оказалась около 40 *км* [893]. Еще Кувье-Гравье 2 сентября 1845 г. под Парижем нашел из базисных наблюдений высоту двух метеоров 6 вел., равную 33 *км*, а для метеоров 4 и 5 вел. $H_2 = 64{,}5$ *км*, а П. А. Савицкий из ташкентских определений для метеора 5 вел. получил $H_2 = 65$ *км*. При этом среднее арифметическое H переоценивается: пусть, например, базис $b = 1$ *км*, $\pi = 1°{,}0$ с ошибкой $\varepsilon = \pm 10'$. Ее влияние таково, что вместо истинной высоты $H = 57{,}3$ *км*, беря среднее арифметическое высот, мы получим

завышенное $\bar{H} = \frac{1}{2} b\,[\mathrm{cosec}\,1°15' + \mathrm{cosec}\,0°45'] = 61{,}2$ *км*. Если бы не было влияния длины b базиса, то «удельный параллакс» $\pi' = \frac{\pi}{b}$, приходящийся на 1 *км* длины базиса, был бы одинаковым. На деле это далеко не так, например:

Эпоха определений . .	Апрель 1930	1928—1930	Авг. 1947	Сент. 1947
Длина базиса b (*км*) .	2,08	1,76	0,53	0,53
Параллакс в зените π_c .	$0°,61 \pm 0°,20$	$1°,17 \pm 0°,7$	$0°,77 \pm 0°,31$	$0°,81 \pm 0°,14$
Число метеоров n . . .	3	24	9	13
Удельный параллакс π'	$0°,30 \pm 0°,10$	$0°,67 \pm 0°,4$	$1°,45 \pm 0°,58$	$1°,53 \pm 0°,26$

Если проэкстраполировать графически π' до значения $b = 0$, когда влияние базиса не сказывается, то получается $\pi' = 1°,60$, чему соответствует истинная высота телеметеоров $H = \frac{b}{\pi' \arc 1°} = \frac{57{,}3}{1{,}60} = 36$ *км*.

Контурные наблюдения для ярких метеоров дают $H_1 : H_2 = 1{,}26$ (Тейхгребер [906]), несколько отличное у разных потоков; в 1940 г. по 66 обычным метеорам автор в Ереване нашел $H_1 : H_2 = 1{,}16$; А. М. Бахарев для телеметеоров (бинокль) нашел 1,08 (1938). Он же обнаружил суточную вариацию относительных высот [882] и даже изменение их по мере восхода радианта: например, для σ-Акварид на протяжении трех часов $H_1 : H_2$ изменялось от 1,16 и 1,08 до 1,05, т. е. длина пути L укорачивалась, поскольку $\frac{H_1}{H_2} = 1 + \frac{L}{H_2} \cos z_R$. Суточная амплитуда $H_1 : H_2$ составляет 6—8% (А. М. Бахарев, В. Е. Штепан), годичная 4% (максимум в летнее полугодие). С уменьшением яркости убывает длина пути L и потому отношение $H_1 : H_2$ стремится к единице; последнее также видно из наблюдений 1941 г. в Сталинабаде в бинокль и кометоискатель:

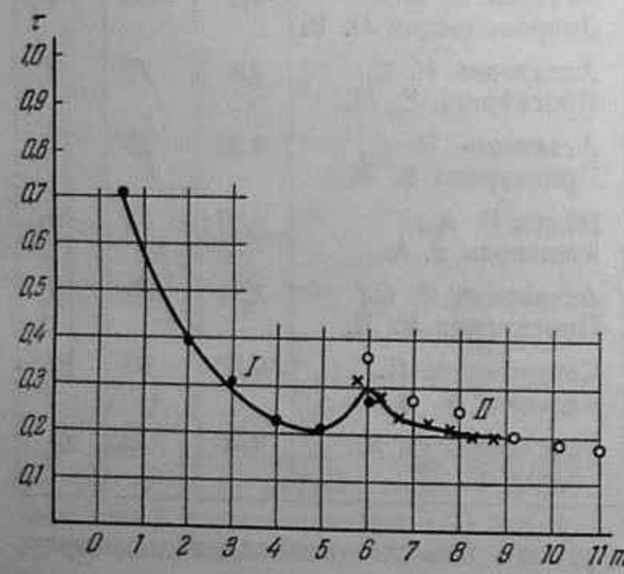


Рис. 268. Зависимость продолжительности полета τ от видимой яркости для обычных (*I*) и телескопических (*II*) метеоров (по В. А. Бронштэну, 1936 г.). Кружки — телеметеоры по А. М. Бахареву (1941 г., $n = 343$).

Зв. вел. метеора, m	6	7	8	9	10	11	12
$H_1 : H_2$	1,53	1,34	1,26	1,23	1,20	1,14	(1,22)
n	8	51	55	54	66	17	3
Средняя λ	—	0,93	0,50	0,42	0,36	0,25	—
n	—	17	26	24	29	17	—

Ход $H_1 : H_2$ по m показывает скачок около $m = 6$ вел., где начинают появляться телеметеоры нижнего яруса. То же дают наблюдения продолжительности полета τ (В. А. Бронштэн [886], см. рис. 268).

§ 372. Угловые скорости ω телеметеоров обычно малы; Месон свыше ста лет назад заметил, что при увеличении в 80 раз они сравнимы с ω обычных метеоров. Это могло быть в случае малых линейных скоростей v или же из-за малой элонгации радианта ψ. Поскольку $\psi \sim 19°$, $\mathrm{cosec}\,\psi \cong 3$, все же редуцированное $\omega_z = \omega\,\mathrm{cosec}\,\psi \sec z$ остается малым, и приходится принять первое условие. В 1935 г. было найдено [173], что v — порядка нескольких *км/сек*, кроме того, шкала скоростей ω′ изменяется пропорционально увеличению g, так что $\omega' = \frac{\omega}{g}$. Максимум распределения ω лежит на $\omega = 2°$ *сек*$^{-1}$ (бинокль), но по мере перехода к более слабым телеметеорам ω снижается, но имеется другой максимум на $\omega \sim 6°,5$ *сек*$^{-1}$, независимо от инструмента, вызванный наличием метеоров среднего яруса (А. М. Бахарев). Его данные по 343 телеметеорам 1941 г. следующие [883]:

Зв. вел. телеметеора	7	8	9	10	11
Длина пути λ	0°,63	0°,50	0°,42	0°,36	0°,25
Среднее τ (*сек*)	0,28	0,28	0,22	0,19	0,17
Угловая скорость ω (*град/сек*)	2,3	2,1	1,9	1,9	1,5

Исследование первых 47 тригонометрических высот указывает на общее уменьшение яркости телеметеоров от 5 до 8,5 вел. по мере уменьшения высот с $H = 88$ до 41 *км*. Следовательно, линейная скорость v также падает, что независимо указывает на роль торможения в явлении телеметеоров. Наиболее яркие объекты нижнего яруса могут быть замечены простым глазом, как метеоры 5—6 вел., на высоте 35—50 *км*. Экстраполяция λ и τ обычных метеоров дает для слабых яркостей значения, соответствующие телеметеорам среднего яруса, например, из 127 наблюдений 1940 г. по выражению $\lg \lambda = 0{,}30 + 0{,}10\,(5{,}5 - m)$ для $m = 7$ и 9 вел. имеем $\lambda = 1°,4$ и $0°,9$, тогда как благодаря наличию нижнего яруса наблюдения дают 0°,6 и 0°,4. То же дает τ: 0,087 и 0,083 сек. против фактически наблюдаемых 0,28 и 0,22 сек. Линейные скорости при $\omega = 2°$ *сек*$^{-1}$ и $\psi = 19°$ на высотах 80 и 40 *км* будут $v = 8$ и 4 *км/сек*. Так как минимальная геоцентрическая скорость $v_g = 11$ *км/сек*, то это независимо доказывает наличие сильного торможения.

§ 373. Угловые длины путей λ телеметеоров зависят от видимой яркости m и уменьшаются с ростом проникающей силы инструмента. Так, например, согласно [173] бинокль дает $\lambda = 2°,9$, кометоискатель 0°,7, если брать только «целые» пути. Рефрактор дает 0°,3 [896]

при диаметре поля зрения $D = 0°,9$. Отношение $D : \bar{\lambda} \approx 4 - 6$, а соотношение «целые : обрывки : отрезки» по 342 наблюдениям А. М. Бахарева 1941 г. равно 122 : 133 : 87 [883]. Эпик, Ла Паз, О. В. Добровольский и др. теоретически рассматривали возможность найти среднее $\bar{\lambda}$ по D и соотношению α «целых» путей к прочим. При хаотичном распределении λ получается $\alpha = \frac{D}{3\lambda}\frac{D-\lambda}{D+\lambda}$. О. В. Добровольским составлены таблицы для определения $\bar{\lambda}$ по D и α, откуда, например, следует:

Отношение $\bar{\lambda}/D$.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$1/1+\alpha$	1,00	0,77	0,60	0,45	0,33	0,23	0,16	0,10	0,05	0,02	0,0

Если бы пути метеоров были распределены беспорядочно, то при $\lambda = 1 = \text{const}$ видимое распределение имело бы моду у больших значений видимых λ, наблюдения же показывают обратное. Поскольку чем слабее метеор, тем его максимум яркости ближе к концу (А. М. Бахарев [883]), то у слабых телеметеоров мы замечаем только собственно этот максимум в самой низкой части траектории. Следовательно, телеметеоры нижнего яруса — это конечные вспышки слабых метеоров, потерявших космические скорости.

§ 374. Цвет телеметеоров. Еще в 1846 г. из 18 телеметеоров Ю. Шмидт оценил белыми 13, желтыми два и красными три. Среди 146 метеоров 1844—1851 гг. преобладающими он считал белые. 156 наблюдений автора 1930—1933 гг. [173] дали голубых 10%, белых 41, желтых 34, оранжевых 12, красных 3%, прочие были ниже порога восприятия (22%). В. Е. Штепан [899] считает, что «чаще всего встречается белый цвет, затем желтый, значительно реже — другие цвета». А. М. Бахарев по 248 метеорам (кометоискатель, 1941 г.) дает такую таблицу:

Балл цвета (шкала Остгоффа)	−2	−1	0	+1	2	3	4	5	6	7	Всего
Число метеоров	3	16	82	1	5	3	28	18	28	64	248
(%)	1	6	37	0	2	1	11	7	11	22	100%

Таким образом, по цвету телеметеоры распадаются на два класса; белым (балл 0) соответствуют в какой-то степени объекты среднего яруса, а красным — нижнего, более медленные [173]. По В. Е. Штепану распределение цвета в его каталоге 608 телеметеоров [695] в процентах следующее:

Балл цвета (средний)	−2, −1	0—2	3—5	6	7	Прочие	Всего	n
Метеоры ярче 6 вел.	9	43	25	16	6	0	100%	93
» слабее 6 вел.	7	42	34	8	4	5	100%	273

§ 375. Очерченность телеметеоров исследуется с 1932 г. При увеличениях в 20—70 раз очертания телеметеоров довольно резкие, например, по 75 наблюдениям имеем:

Балл очерченности .	1	2	3	4	5	Всего	
% телеметеоров . .	0	8	7	21	64	100%	$n = 75$
% обычных метеоров	0	3	16	22	59	100%	$n = 2512$

Средний балл очерченности $o = 4,5$ при увеличении 21 и 4,7 при более сильных, т. е. o не зависит от увеличения. Очень часты резкие метеоры 9—11 вел. Более яркие метеоры очерчены хуже; граница нерезкости имеет около 1—2′ ширины, что линейно означает 30—60 *м*. В 1954 г. Л. Головкова обработала 7889 оценок очерченности по наблюдениям 1942—1945 гг. в Ашхабаде. Оказалось, что $\bar{o}$ имеет годичную и суточную вариации с максимумом зимой и утром и минимумом летом и вечером и амплитудой от 3,9 до 4,4 балла. Слабый туманный ореол вокруг метеора, создающий нерезкость очертаний, нами для краткости называется «метеорной короной» (§ 274). Возможно, что последняя связана с ионизацией воздуха, так как она больше у ярких и быстрых метеоров. У каждого потока метеоры имеют свою очерченность. Б. Ю. Левин [24] полагает, что последняя связана с дроблением метеорных тел в полете, но в телескоп этого не видно. В целом резко очерченных телеметеоров 73—88%.

§ 376. Угловые поперечники. Большинство телеметеоров кажутся вполне «точечными», некоторые заметно «шире» изображений звезд той же яркости. Небольшая часть имеет ощутимые поперечники в несколько десятков секунд дуги, чему на расстоянии 40—80 *км* соответствует 10—30 метров. Более подробные данные приведены в гл. 19.

§ 377. Искривление траектории заметно лишь у немногих телеметеоров. Оно, например, отмечено 2 октября 1902 г. Деннингом («очень искривленный путь»), Эпиком в Москве 11—12 августа 1922 г. (4 случая), И. С. Астаповичем в 1930—1933 гг. (два из 186 телеметеоров). В каталоге 608 телеметеоров В. Е. Штепана искривленных путей у псевдотелеметеоров 2,3%, а у прочих 1,4%; среди 439 телеметеоров, наблюдавшихся им в 1954 г. в Чарджоу, таких 1,8%. Это близко к тому, что дают обычные метеоры: 4,3% (Ю. Шмидт, 1842—1851), 1,5% (Цециоли, 1867—1869), 0,7% (Деннинг, 1885—1886), 0,6% (Оливье, 1898—1910), 0,2% (Гейс, 1833—1875), 0,3% (И. С. Астапович, 1925—1933). У неопытных наблюдателей их отмечено гораздо больше, так как не учитывается «глаголизация». В целом можно считать искривленных траекторий у телеметеоров столько же, сколько и у обычных (0,5—1,0%).

§ 378. Появление и исчезновение метеоров. Появляющийся метеор кажется тончайшей иголочкой, быстро расширяющейся параллельно тому, как увеличивается его яркость. Максимума яркости он

может достигнуть на протяжении всего нескольких минут дуги, например 7 сентября 1932 г. метеор 9 величины разгорелся до 4 величины на протяжении 2—3′; градиент силы света обычно равен 10—20 *м. св/км*, так что на протяжении нескольких километров пути метеор может достигнуть максимума яркости. Угасание метеора может происходить по-разному: либо также постепенно сходя на нет, либо быстрым ослаблением «рывком», порой настолько внезапно, что метеор кажется залетевшим за некую заслонку. Последний случай «тупых» путей свидетельствует о быстром торможении в самом конце пути. Медленные, полого летящие метеоры в конце обычно дробятся на рой искр, растягивающихся вереницей.

§ 379. Вспышки и взрывы телеметеоров редки, возможно потому, что низкие телеметеоры сами являются «конечной вспышкой». Мелкая рябь и мерцание наблюдаются часто, плавные изменения яркости на 1—2 вел. («затяжки») более редки. По наблюдениям 1930—1933 гг. «прервавшихся» метеоров $1^0/_0$, «мерцающих» $5^0/_0$, со взрывами $2^0/_0$; последние всегда приходятся на вторую половину или конец пути. Длительность их так мала, что сферическая форма взрыва не нарушается скоростью движения метеора, т. е. короче 0,01 секунды. Вообще аномальных телеметеоров около $2{,}5^0/_0$, т. е. столько же, сколько и среди обычных. Правильные пульсации яркости телеметеоров нам неизвестны. Стационарные телеметеоры встречаются один раз на несколько сотен.

§ 380. Двойные и кратные телеметеоры. Иногда можно видеть, как рядом пролетают два метеора, или один летит позади другого (гл. 21). В других случаях оба летят по одному пути с интервалом в секунду и более. В первом случае расстояние между компонентами составляет 1—2′ и более, т. е. десятки метров. По каталогу В. Е. Штепана кратных метеоров $2{,}3^0/_0$ среди псевдотелеметеоров и $0{,}2^0/_0$ у остальных. Чтобы увидеть двойной телеметеор, надо затратить несколько десятков часов наблюдений. Л. Свифт один раз отметил двойной метеор, Морозов (Ленинград, 1930 г.) тройной, Евдокимов (Харьков, 9 августа 1898 г.) четверной, а С. М. Селиванов 23 апреля 1930 г. наблюдал вереницу телеметеоров с самым ярким впереди.

§ 381. Спектры телеметеоров систематически наблюдались в Ашхабаде с 1951 г. (см. гл. 17). На объектив бинокля надевалась призма, так что были видны вместо звезд их спектры длиной 6—7°. Судя по полусотне наблюдений, у метеоров 3—4 вел. спектр состоит из нескольких цветных линий, а у слабых — только из одной серой или голубой полоски (дублет кальция H, K?). В нескольких случаях у более ярких псевдотелеметеоров был виден сплошной спектр.

ГЛАВА 34

МЕТЕОРНАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ПЫЛЬ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

§ 382. Введение. Факт разрушения метеорных тел в атмосфере, пылевые следы [947, 955] и признаки мощной воздушной эрозии на поверхности упавших метеоритов [919] заставляют считать, что тонкая метеорная пыль постоянно пополняет земную атмосферу. Поскольку последняя, однако, продолжает оставаться прозрачной, то следует допустить и наличие процесса осаждения этой пыли на Землю, что будет рассмотрено в гл. 35. Наблюдения показывают наличие больших скоплений космической пыли в солнечной системе и вне ее. По-видимому, возможно проникновение и этой пыли в атмосферы планет. Следовательно, мы можем различить *космическую пыль* (неметеорного происхождения), *метеорную пыль* — продукт распыления метеорных тел в атмосфере и также *метеоритную пыль*, возникающую при механическом разрушении метеорита уже после его падения на Землю. Процесс материального обмена с космосом Земля осуществляет, рассеивая в мировое пространство частицы воздуха от внешних границ атмосферы, испуская фотоны и получая из космоса фотоны, корпускулы, молекулярные группы и космическую пыль, не говоря уже о метеорных телах.

Присутствие метеорной и космической пыли в атмосфере может быть обнаружено по поглощению, рассеянию и излучению ею света.

§ 383. Поглощение света. Имеется ряд наблюдений за помрачением солнечного света, причем в некоторых случаях указывается, что звездное небо оставалось чистым. Это наводило на мысль о прохождении между Землей и Солнцем метеорной материи или облака космической пыли, поглощавшей свет Солнца. В других случаях источник этого поглощения лежал в земной атмосфере и мог быть вызван не метеорными, а земными причинами, поэтому к толкованию подобных сообщений как наблюдений космических явлений следует относиться очень осторожно. Приведем несколько примеров.

Не считая библейского упоминания о «тьме египетской», упомянем о сообщении Цедренуса [925], что в 137 г. н. э. весь год «Солнце являло печальный свет без лучей наподобие Луны»; в 564 г. в течение 18 месяцев оно светило лишь по 3 часа в день; хроника Михаила

Сирийца говорит, что в 624—625 гг. «Солнце потемнело в месяце Арек до месяца Кагота»; в «Хронике чумы» Шнуррера говорится о потемнении Солнца на 3 часа в 1090 г., что он, как и Хладни, объясняет прохождением метеорного облака. Помрачение в начале февраля 1106 г. заставило днем зажигать свечи; в 1208 г. подобное явление длилось 6 часов. Около 24 апреля 1547 г, «в течение трех дней Солнце являлось как будто облитое кровью», однако в полдень на юге были видны звезды; Кеплер объяснял это «черным облаком дыма» или «кометной материей»; к закату потемнение усиливалось. В подобных явлениях некоторые исследователи видят причину вообще видимости звезд днем [924]. Рукопись № 1605 Гос. Публичной библиотеки в Ленинграде сообщает, что «в лето 7153 (т. е. 1645 г.) июля в 12 день... потемне Солнце среде дне... и небу сущу ясну яко ни едину облаку в небе быти... Солнце... в необычный вид претворися аки бы вид дно котла медного... не токмо в граде Москве, но и во всей стране». В том же году (25 апреля н. ст.) в Цезариополе Давид Фрелихнус видел Солнце, лишенное лучей и подобное Луне. 12 мая 1706 г. около 10 ч. утра Солнце покрылось такой плотной материей, что стали летать летучие мыши. В латинской брошюре «Физическое рассуждение о Солнце, потерявшем ясность на небе, не покрытом облаками» (1722 г.) Гамбергерус пишет, что 1 июня 1721 г. в Ельме в пятом часу вечера подобное помрачение наблюдалось в течение двух часов и привело народ в беспокойство. Кисслинг приводит подобные случаи для 1117, 1560, 1724, 1731 и 1733 гг. Последнее из них заведомо вызвано мощным извержением вулкана Геклы (Исландия); выброшенный пепел мешал мореплаванию, мгла держалась несколько месяцев. Араго в «Общепонятной астрономии» и Ф. Крылов в «Природе» 1873 г. приводят другие аналогичные явления, но иногда трудно решить, чем они вызваны. В Черепановской летописи, ведшейся в Тобольске свыше 130 лет, под 13 (23) сентября 1700 г. описан «густой огненный туман», пришедший с юга, покрывший небо «как бы медью», не имевший запаха; «в двух саженях еще можно было видеть человека».

На юге Европы и в Азии подобные явления вызваны песчаными бурями. Г. Н. Потанин описал падение пыли 16 (28) февраля 1856 г. на Алтае, когда небо было «завешено» и «Солнце светило без лучей». Во время белых ночей в Якутске 20 и 21 июля 1864 г. метеостанцией отмечен «мрак», «ужасная мгла». Особенно грандиозным было в наше время «загадочное затмение» 18 сентября 1938 г. [917], когда большое черное облако на несколько часов закрыло небо в северной части Омской области и в Ямало-Ненецком округе, превратив день в непроглядную ночь («сибирская тьма») на площади 600×250 *км* (рис. 269). Облако двигалось на восток, на большой высоте (так как запаха не было) [908]. 13 марта 1953 г. в «черную пятницу» в Ашхабаде наблюдалось облако лёссовой пыли площадью 70×100 *км*, которая ослабила в 1 ч. дня свет Солнца в сто раз; было зажжено

электричество; пыль была занесена из Ирана [910]. Таким образом, из перечисленных случаев некоторые могли быть вызваны геофизи-

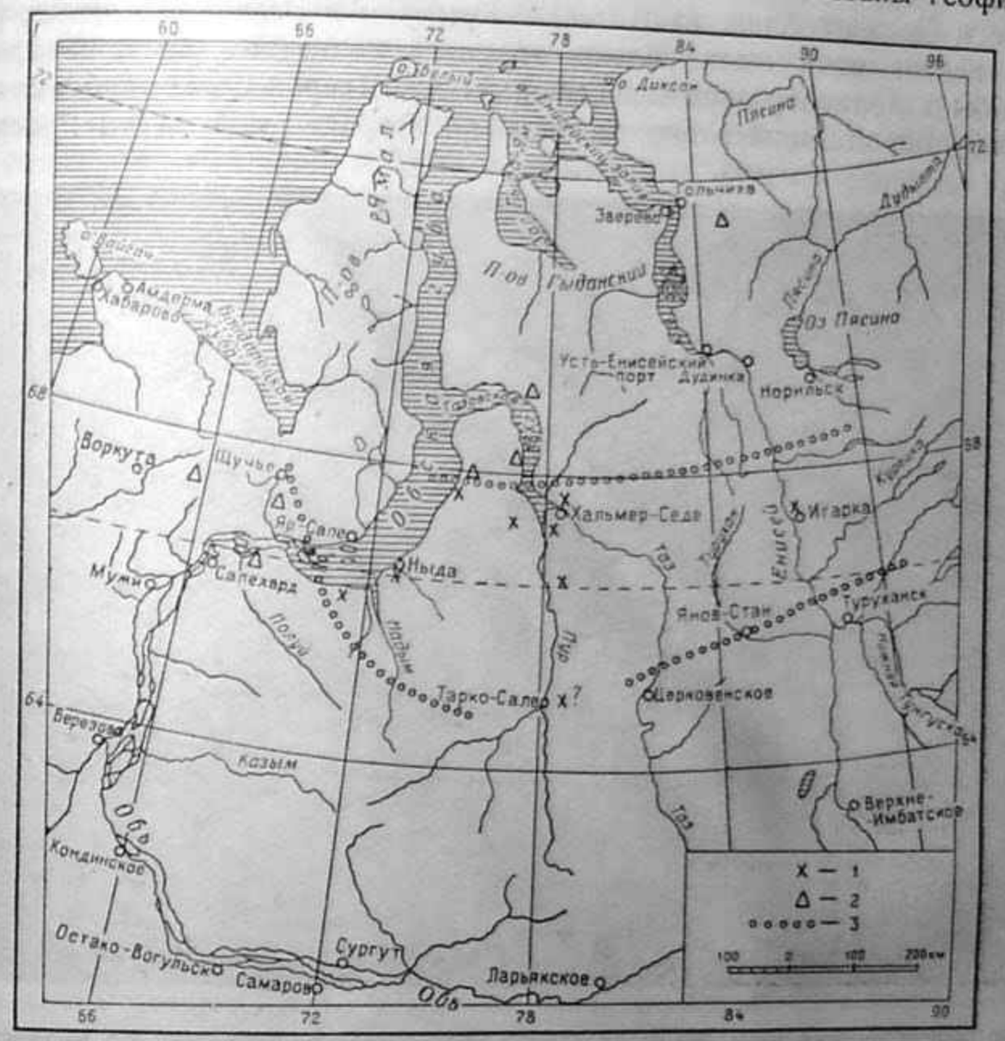


Рис. 269. Район, охваченный облаком космической пыли 18 сентября 1938 г. в Ямало-Ненецком округе.

1 — пункты, где явление отмечено, *2* — где оно не отмечено, *3* — границы явления (по Андрееву).

ческой причиной. Приведем, однако, несомненные случаи падения внеатмосферной пыли.

§ 384. Выпадение космической пыли. 25 июня 1290 г. при уже упоминавшемся падении метеоритов близ Устюга Великого в полдень «найде внезапу над град Устюг облак тёмен и бысть яко нощь темная». При падении Тунгусского метеорита [82] был пылевой след с явлениями иризации в Кежме, где он проектировался на Солнце, затем темные продукты взрыва при падении, выброшенные в стратосферу, видимые несколько часов и к концу ставшие серыми или пепельного цвета и более прозрачными, и наконец, тонкая пыль,

протянувшаяся от Западной Сибири до Атлантического океана; наступившая ночь на 1 июля 1908 г. оказалась «белой» [923] (рис. 270) даже в Средней Азии, на Алтае, в Крыму и в Западной Европе, так как пелена этой пыли сильно отражала солнечный свет, находясь как бы в волнообразном движении; А. А. Шенрок [934] опубликовал свыше 60 описаний этого явления по Европейской части России,

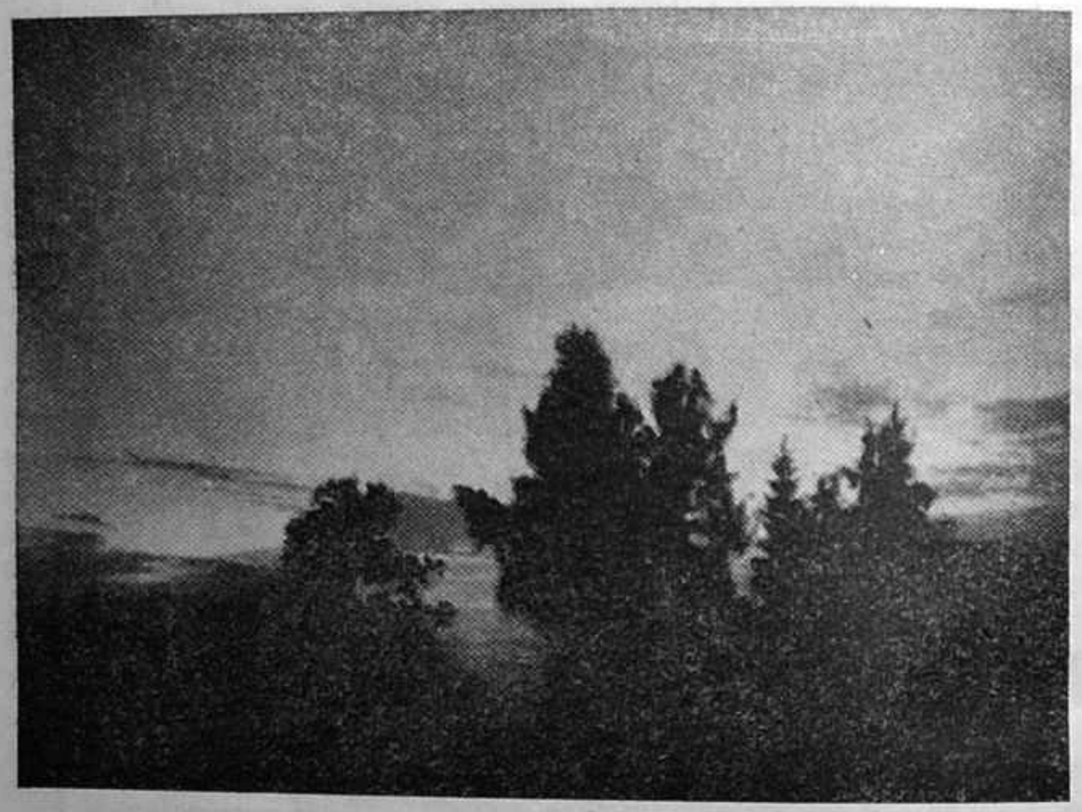


Рис. 270. Светлая ночь 30 июня 1908 г. при падении Тунгусского метеорита (фото С. В. Орлова, Сафоньево, Московской области).

В. Н. Хитрово и Д. Д. Руднев (см. [922]) близ Орла получили снимок неба: сегмент зари, заполненный светлой массой облаков. Свет ее был поляризован, цвет на западе в проходящем свете красноватый, на востоке в отраженном — зеленоватый. Область, заполненная этой пылью, охватила с востока на запад 6000 *км* и с севера на юг 2000 *км*. Пыль находилась весьма высоко, так как отражала свет Солнца [935]. Кроме этой пыли, местами были видны *серебристые облака*, обычные на высотах 80 *км* (по В. А. Бронштэну и др. они возникают на космических пылинках, как на ядрах конденсации). При падении грандиозного болида 24 марта 1933 г. часть его следа также сделалась похожей на серебристое облако (рис. 271). Таких случаев имеется несколько; они являются вторичным явлением. Пылевая пелена Тунгусского метеорита 1 июля 1908 г. двигалась в Европе в разных направлениях, но в общем не из Сибири. Таким образом, пыль

в Европу проникла одновременно с падением метеорита, а не была занесена из района падения. На американскую сторону, экранировавшуюся кривизной Земли, она не попала, и только во второй половине июля на только что основанной тогда актинометрической станции на горе Вильсон (Калифорния) отмечено снижение коэффициента прозрачности атмосферы на 10%, продолжавшееся месяц [800]. С такой же скоростью в 1883 г. воздушные течения разнесли пыль вулкана Кракатау; помутнение тогда продолжалось несколько лет [953], так как вулкан выбросил пыли гораздо больше (около $6 \cdot 10^6$ $м^3$).

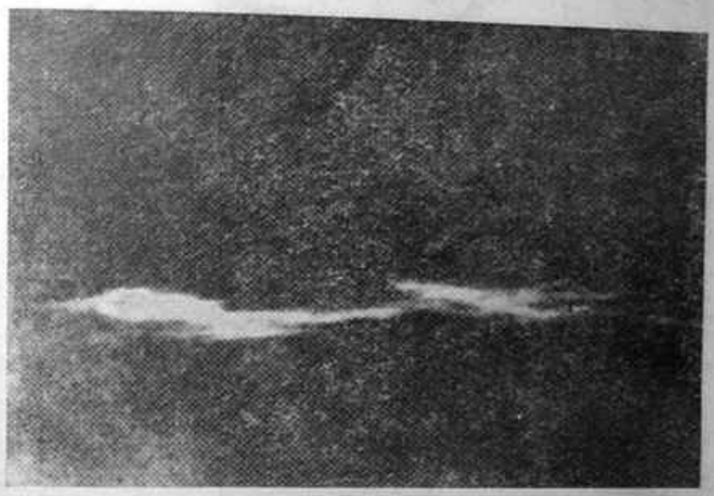


Рис. 271. Пылевой след болида 24 марта 1933 г. (объемом 4000 $км^3$) напоминает по структуре серебристое облако).

В разных длинах волн поглощение, по В. Г. Фесенкову [800, 930], оказалось разным (рис. 272), так что, пользуясь данными опытов Линке и Борна, можно было найти средний радиус пылинок $a = 1\mu$ (по длительности падения $a \leqslant 7\mu$). Из сравнения с пылью Кракатау можно думать, что общая масса вещества пылевой пелены после падения Тунгусского метеорита составляла тысячи тонн (масса метеорита по косвенным определениям [82] нами найдена в $40 \cdot 10^3$ $т$). Так как в момент падения Солнце находилось на востоке, а пелена протягивалась на запад, т. е. в сторону, противоположную Солнцу, то она вела себя, как пылевой хвост небольшой кометки, ядром которой мог быть Тунгусский метеорит.

При падении Сихотэ-Алинского метеорита пылевое облако держалось до вечера 12 февраля 1947 г.; В. Г. Фесенков оценил массу этого железного облака («по крайней мере 200 тонн»), исходя из поглощения света. Он считает, что метеорный газ не обязан конденсироваться в такую пыль. Е. Л. Кринов [919] подтвердил это, найдя, что пыль следа возникает за счет пульверизации жидкой пленки метеорита. Н. Н. Калитин обратил внимание [918] на то, что пылинки поглощают часть солнечной радиации и рассеивают другую часть;

ослабляя ультрафиолетовый спектр, они переизлучают поглощенную энергию в форме тепла. Задерживая, кроме того, тепловое излучение Земли, в целом атмосферные пылинки способствуют небольшому потеплению на Земле. Напротив, проходя между Землей и Солнцем, они вызывают некоторое похолодание. Обработав данные семи

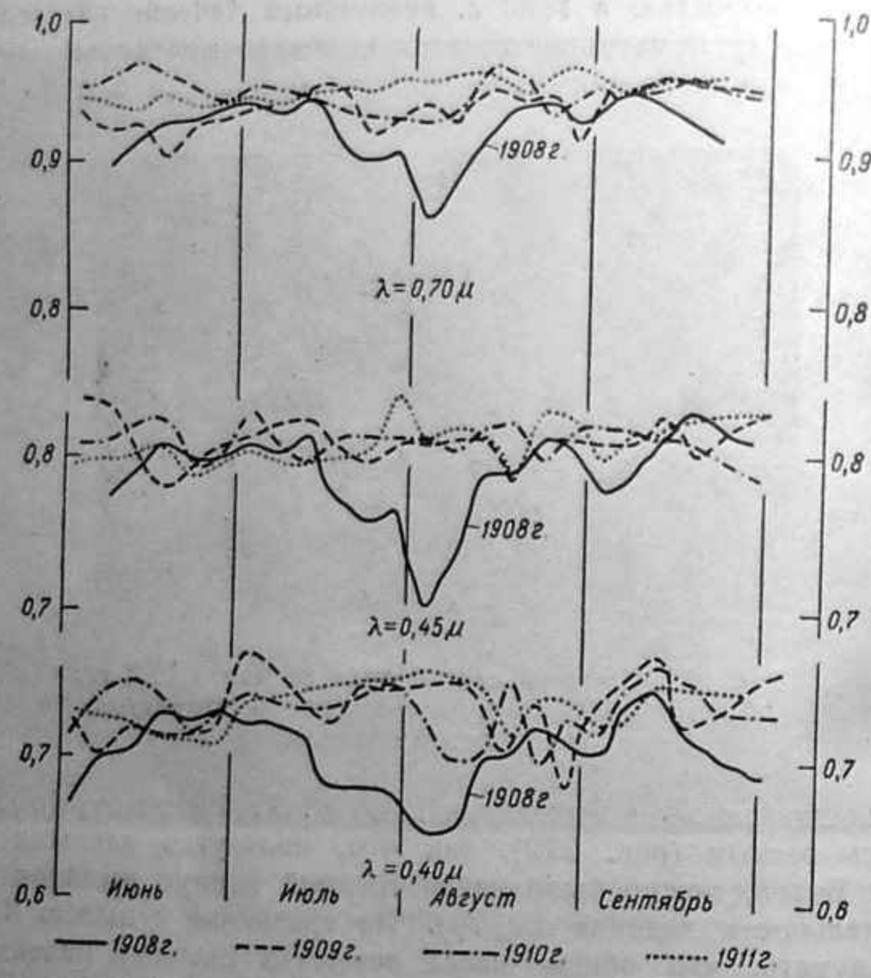


Рис. 272. Уменьшение коэффициента прозрачности атмосферы летом 1908 г. (после падения Тунгусского метеорита) в разных длинах волн (по В. Г. Фесенкову).

метеостанций от Якутска до Тбилиси, Н. Н. Калитин нашел по всему материалу указание на общее понижение напряжения солнечной радиации 15—20 августа, с максимумом 18 августа и окончанием аномалии 5 сентября (рис. 273). Исследуя годовой ход этой радиации в Абастумани, Ш. М. Чхаидзе [933] часть ее снижения также приписывает космической пыли. Некоторые авторы указывают на аналогичное явление 11—13 мая.

Л. Р. Ракипова в 1947 г. показала [921], что 5000 пылинок, размером 0,02 μ каждая, в 1 $см^3$ воздуха на высоте $H = 50$ *км* или 50 таких же пылинок на $H = 75$ *км*, нагреваясь, могут создать

восходящий ток воздуха с $v = 1$ *см/сек*, а пылевое облако днем — стратосферный циклон. Еще в 1927 г. Н. М. Штауде указала на «присутствие в воздухе космической пыли» на $H < 100$ *км*, ведущей к переоценке плотностей воздуха, определяемых фотометрически. В 1940 г. Найнинджер оценил количество оседающей за год космической пыли в несколько килограммов на каждую квадратную милю (2,6 $км^2$). Если допустить, что температурная инверсия между $H = 40$ и 70 *км* с $\Delta T = +200°$ вызвана пылью, то ее содержание на $H = 70$ *км* должно быть в четыре раза больше, чем на $H = 40$ *км*. Хаусдорф (1895 г.), Бауэр и Данжон (1923 г.), и с 1929 г. Линк [946] обратили внимание на то, что во время полных лунных затмений потемнение Луны оказывается бо́льшим, чем следует из данных о прозрачности воздуха. Они приписали это влиянию поглощения метеорной пыли.

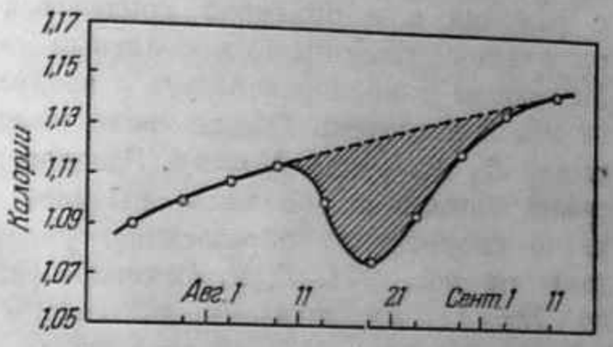


Рис. 273. Ежегодное уменьшение интенсивности солнечной радиации в августе по данным сети актинометрических станций (по Н. Н. Калитину).

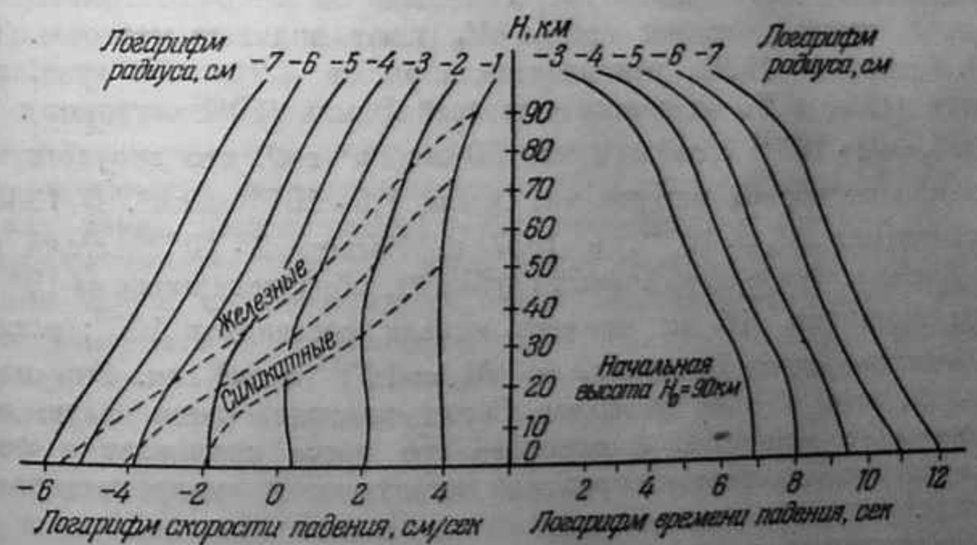


Рис. 274. Скорость и продолжительность падения железных и каменных шариков разных размеров с высоты 90 *км* (по Ф. Линку, 1950 г.).

Если длина свободного пробега l и радиус a пылинки удовлетворяют условию $l/a \sim 1$, то в этой «области Милликена» скорость падения пылинки $v = \frac{10{,}4\rho_m a}{\rho}$, где ρ_m — плотность пылинки, а ρ — воз-

духа. Длительность падения в этой «надстоксовой» области $t=\frac{\rho_1-\rho_2}{10{,}4\beta a\rho_m}$, где β—высота однородной атмосферы, а ρ_1 и ρ_2 — плотности воздуха на высотах H_1 и H_2. В «области Стокса» $l/a<1$, $v=1{,}2\cdot10^6a^2\rho_m=\text{const}$, независимо от H. Если на высоте H возникнет облако пылинок с разными a и объемной концентрацией n_0, то через время Δt n_0 окажется обратно-пропорциональным скорости падения v; в области Милликена v пропорциональна ρ воздуха, а в стоксовой не зависит от нее и постоянна. Общее число пылинок в столбе сечением 1 $см^2$ между H_1 и H_2 есть $N=n_0t$. Равновесное условие определяется теоремой Линка: общее число пылинок в столбе единичного сечения равно скорости их образования, умноженной на t. Расчеты Линка даны на рис. 274. Л. Р. Ракипова [921] нашла, что с $H=35$ $км$ до $H=11$ $км$ пылинка с $a=1\,\mu$ опускается за один год, а с $H=80$ $км$ — за 3—4 года.

§ 385. Общий дебит пыли. Космические пылинки делают небо голубее, а зори — более красочными. Каково же общее количество осаждающейся на Землю космической пыли? Небесная механика дает верхний предел: $M_0\leqslant4{,}9\cdot10^{-10}$ $г/см^2$ $сек$, иначе были бы ощутимы неравенства движения Луны и вращения Земли (Оппольцер, 1884 г.). Браун принимает еще меньшее значение M_0, так как иначе зори были бы еще более аномальны, чем при извержении Кракатау 1883 г., а океаническое дно вдали от берегов было бы покрыто только космической пылью. Нижний предел M_0 дают видимые метеоры. Так, Н. Н. Сытинская [926], учитывая метеоры от +9 вел. и ярче, дает прирост массы в 70 $кг/сутки$ для всей Земли (10^{10} метеоров). Это дает $M_0=2\cdot10^{-19}$ $г/см^2$ $сек$ или 50 $мг/км^2$ $год$, что соответствует плотности метеорной материи вне Земли $1{,}5\cdot10^{-25}$ $г/см^3$. В 1935 г. Уайли оценил $M_0=10^{-17}$, в 1937 г. Уотсон $2\cdot10^{-19}$ $г/см^2$ $сек$. Морские отложения абиссальных глубин *), образовавшиеся за 10^9 лет, имеют мощность 15 $м$; примесь никеля составляет 10^{-4}; если он космического происхождения, то $M_0=10^{-16}$ $г/см^2$ $сек$. Это может означать, что в виде метеоров Земля получает лишь малую долю космического вещества, а основная его масса проникает в форме слабо светящихся телеметеоров или несветящихся «микрометеоритов» (Уиппл).

Посмотрим, что дают другие методы. По Линку [946] время падения T шариков с $a=0{,}1\,\mu$ и $0{,}01\,\mu$ с высоты 100 $км$ до H равно:

Время T (часы)		0	1	10	100	1000	1 год	10 лет
Шарик 0,01 μ	$H=$	100	99,9	99	93	71	59	38 $км$
» 0,1 μ		100	99,0	94	79	49	38	22 »

*) Абиссальными называются глубины, превышающие 1000 $м$.

Следовательно, такие мелкие пылинки не скоро проявят себя на земной поверхности и непосредственно после прохождения метеорного потока ожидать их не приходится. Пыль Кракатау с $H=32$ $км$, куда она была заброшена извержением, оседала на 70 $м$ в сутки. В 1937 г. Гринштейн и в 1939 г. Шален вычислили функцию $K=K(a,\lambda)$ в уравнении $\Delta=KM_0T$, где Δ есть оптическая плотность столба воздуха с M_0T граммами пылинок радиуса a; оказалось, что Δ равно:

	Радиус пылинок a (μ) .	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10
Δ	Железо	4,2	4,2	4,1	3,0	1,8
	Силикаты	−1,7	+1,4	4,2	3,3	2,3

Следовательно, все пылинки крупнее 0,1 μ ведут себя оптически одинаково. Затмения Луны дают $\Delta=0{,}04-0{,}004$ для синих лучей ($\lambda=0{,}4\,\mu$). В случае $\Delta=0{,}04$ получаются следующие значения M_0 для разных a:

Радиус a (μ) . . .	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10
M_0 $г/см^2сек$					
Железо	$3\cdot10^{-18}$	$3\cdot10^{-17}$	$3\cdot10^{-16}$	$3\cdot10^{-13}$	$3\cdot10^{-10}$
Силикаты	$6\cdot10^{-13}$	$5\cdot10^{-15}$	$2\cdot10^{-16}$	$6\cdot10^{-14}$	$2\cdot10^{-12}$

При $\Delta=0{,}004$ табличные данные удесятеряются. Найденному нами $M_0=10^{-16}$ и 10^{-15} соответствуют $a=0{,}1\,\mu$, т. е. радиус маленьких пылинок, известных в звездной астрономии. Боушка и Швестка [951, 952] нашли годичную вариацию Δ; она плохо отражает активность крупных потоков, но, судя по 20 лунным затмениям, поглощение достигает максимума спустя 30—40 суток после эпохи активности потока; еще через 50 дней атмосфера очищается. Так как таких мелких частиц в большинстве этих потоков нет, то приходится считать, что эта пыль образуется в атмосфере при разрушении более крупных частиц, т. е. является метеорной. Здесь нужно учитывать вулканическую пыль (В. М. Чернов), так как, например, пыль Катмаи (Аляска, 6 июня 1912 г.) через три недели в Павловске снизила прозрачность атмосферы на 20%, а масштабы падения космической пыли не доходят до вулканических: одновременно в атмосферу не проникало более 10^6 $т$ космической пыли. Даже для объяснения климатических аномалий прошлого [949, 950] «отпадает необходимость прибегать к таким гипотетическим факторам, как облака космической пыли» (Брукс, 1950 [913]).

§ 386. Туманные метеоры. Мы сообщали о случаях появления роев слабых телескопических метеоров или сгустков материи в виде туманных масс. Каталог Борница [936] за период с −355 г. по 1899 г. содержал 87 указаний на такие объекты, хотя иногда это могли быть метеорные следы. Скиапарелли указывал на метеоры, подобные

маленьким кометкам, проходящим на фоне Млечного Пути как темные массы и рассыпающимся на сноп мелких метеоров. Эти «темные метеоры» видны крайне редко: Скиапарелли нашел три указания в старых хрониках, одно наблюдение получил в октябре 1864 г. Хейс [942]; новых достоверных наблюдений пока не имеется. Трудно представить, как может возникнуть и сохраняться до встречи с Землей подобное скопление пылинок. Случаи прохождения темных тел по диску Солнца («оффускации») должны быть отнесены к земным, а не к космическим явлениям.

В итоге следует заключить, что хотя имеются несомненные случаи поглощения света метеорной и космической пылью, однако имеющихся данных еще слишком недостаточно. Обратимся к явлениям рассеяния света.

§ 387. Рассеяние света. На примере пылевых следов и пылевых взрывов болидов, когда метеорные пылинки были освещены Солнцем или Луной, мы видели, что эффект рассеяния света на них может быть очень мощным. Иногда такой след настолько ярок, что земные предметы начинают давать тень. Непрерывный поток космических микрометеоритов также должен производить рассеяние света; их число огромно. При подъеме стратосферных ракет на специальных полированных пластинках отмечаются следы их ударов, равно как и звуки этих ударов (при помощи микрофонов). Выше $H = 40$ *км* об обшивку ракеты за 1 секунду ударяются в среднем два микрометеорита. Измерения с теми же ракетами показали, что яркость неба на больших высотах гораздо выше теоретической. Можно думать, что этот избыток в некоторой части вызван наличием космической пыли. В трех случаях на $H = 70$—80 *км* действительно были сфотографированы какие-то облака [920]. В 1940 г. В. Г. Фесенков указывал, что нам неизвестна метеорная материя на диапазоне радиусов частиц от 0,1 до 70 μ [929]. Ныне этот пробел заполняется, так как микрометеориты имеют в среднем $a = 2$ μ. Их суммарная масса —6000 *т/сутки* для Земли в целом (Уиппл), что дает сильно завышенную оценку $M_0 = 15 \cdot 10^{-15}$ *г/см²сек*. Н. М. Штауде в 1927 г. нашла, что рассеяние света на больших высотах получается больше теоретического и объяснила это наличием космической пыли. Еще в 1941 г. автор указывал, что ее количество должно превосходить 10 *т/сутки*.

§ 388. Серебристые облака. В. К. Цераский в Москве 13 июня 1885 г. открыл [931] новое тогда явление серебристых облаков. Эти облака освещаются прямыми лучами Солнца и находятся, как потом оказалось, на границе стратосферы и ионосферы ($H = 82$ *км*). Они видны ночью в конусе зари (рис. 275) и при открытии были так ярки, что давали отсвет на Земле. Базисные наблюдения Москва — Петровское-Разумовское, организованные В. К. Цераским 24 июня

1885 г., показали очень большую высоту облаков, которую удалось измерить лишь на более длинном базисе (Москва — Листвяны, 32 *км*). Высота оказалась в среднем 74 *км*. В Европе Бакгауз (Англия) заметил облака еще 10 июня 1885 г., но не придал им значения. 23 июня они были замечены в Праге. Иессе в Берлине произвел первые фотограмметрические измерения облаков и нашел их скорость (порядка десятков метров в секунду). Из его измерений 1885—1891 гг. можно найти убывание высот с 83,4 *км* ($n = 38$) до 82,1 *км* ($n = 249$) от 22,5 до 2 ч. ночи.

Эти облака видны около периода летнего солнцестояния (в южном полушарии в декабре). По 426 наблюдениям 1885—1940 гг. дата

Рис. 275. Базисные фотографии серебристых облаков 18 июня 1939 г. в Москве (слева) и в Кучине (справа). В стереоскоп видно, что облака лежат тонким слоем (базис 25 *км*).

максимума падает на 21 июня (И. С. Астапович). Они дают максимум появлений в период максимума солнечной активности. Ныне они наблюдаются ежегодно, причем за 1917—1944 гг. в СССР было получено в восемь раз больше наблюдений серебристых облаков, чем за 1885—1917 гг. (с 1930 г. 56% фотографических). Протяженность территории СССР позволяет разрешать задачи исследования этих облаков, недоступные для многих других стран.

В 1938 г. Г. О. Затейщиков и В. А. Бронштэн [913] по материалам наблюдений 1936 г. нашли распределение скоростей и обнаружили циклонические движения в поле серебристых облаков. О. В. Деминев в Новосибирске впервые применил киносъемку облаков. Применяя с 1952 г. цейтраферную съемку, Н. И. Гришин (Москва) получил на экране ускоренное движение и картину развития серебристых облаков, позволяющую видеть детали, ускользающие на обычных снимках. Было открыто волновое движение в облаках, не сопровождаемое переносом вещества, явления атмосферной турбуленции и др. Н. И. Гришин доказал [915], что появление серебристых облаков связано с прохождением фронта резкого похолодания. Облака, похожие на серебристые, наблюдались при падении Тунгусского метеорита и при извержениях некоторых вулканов; они

похожи на конденсационные следы самолетов, когда пересыщенные водяные пары осаждаются на продуктах горения. По многолетним наблюдениям И. С. Астаповича (1942—1949 гг., Ашхабад) и В. Г. Тейфеля (Алма-Ата, 1955—1957 гг.) облака не появляются южнее параллели 45°, где стратосфера прогрета сильнее. Их свет поляризован, спектр имеет, по Н. И. Гришину, максимум в синей и красной части, фотографии со светофильтрами указывают на обилие фиолетовых лучей [912]. Малая скорость осаждения, отсутствие дифракционных явлений, высокая прозрачность позволили еще в 1939 г. оценить радиус образующих их частиц порядка 0,1 μ [911]. Кервэн в 1917 г. называл эти облака ультрациррусами, подчеркивая, что они состоят из ледяных кристалликов, к чему присоединились Ярдецкий (1926 г.), Вегенер (1926 г.), Вегард (1933 г.) и в наше время И. А. Хвостиков, вновь показавший, что на их высотах действительно имеют место условия для образования ледяных кристалликов из водяного пара. Слой облаков очень тонок (1—2 *км*), что видно при рассматривании снимков в стереоскоп (И. С. Астапович, 1936 г.); нижние гребни волн Гельмгольца, освещаемые сильнее, более ярки и дают *волокна*, тогда как перпендикулярные к ним более мелкие волны образуют *гребешки*.

Гофмейстер [41] полагал, что эти облака являются космическими, но тогда они наблюдались бы в разных местах и в разное время. Для образования серебристых облаков путем конденсации [555] нужны центры кристаллизации (космические и вулканические пылинки), наличие точки инея и подходящего освещения, т. е. совокупность метеорно-геофизико-физических условий, одновременно редко выполняющихся. Поверхностная яркость серебристого облака может доходить до 1 *сб* и облако средних размеров, площадью 20—50 тыс. $км^2$, содержит несколько килограммов вещества [911]. На ту же площадь обычные метеоры привносят столько же лишь за год. Пыль Катмаи (1912 г.), по Гемфрису, состояла из частиц с $a = 1{,}8\ \mu$; в столбе сечением в 1 $см^2$ было $3{,}1 \cdot 10^6$ пылинок, поглощавших 0,25 зв. вел. Таким образом, серебристые облака, несмотря на большую яркость, вряд ли способны поглотить более 0,001 зв. вел. Однако космические и метеорные пылинки могут выдать свое присутствие, облекаясь ледяной оболочкой в форме серебристых облаков при подходящих условиях.

§ 389. Внешняя пылевая атмосфера. Исследования источников свечения ночного неба, проводимые многими учеными за последние годы, показывают, что ими является; 1) собственное свечение атмосферы (земная составляющая) на высотах ~ 100 *км*, 2) свет слабых звезд (галактическая составляющая), 3) солнечный свет, рассеянный пылинками в солнечной системе (планетная составляющая) и 4) общий, рассеянный нижними слоями атмосферы, свет от этих трех источников. Фотометрически изучая зодиакальный свет, Н. Б. Дивари [916] писал: «Распределение яркости зодиакального света является результатом сложения двух видов свечения; собственно зодиакального света... и свечения атмосферной природы... Независимо от нас И. С. Астапович также пришел к выводу о том, что зодиакальный свет связан с внешней атмосферой Земли [909]». Последнее утверждение основано на мобильности положения и быстрой изменчивости яркости зодиакального света, судя по наблюдениям 1942—1945 гг. Еще в 1891 г. И. А. Клейбер писал, что в системе Солнце — Земля — Луна 1 : 2200 доля метеорных тел, встречающих Землю, ею захватывается, и они превращаются в метеорных спутников Земли. Это создает своего рода внешнюю пылевую атмосферу Земли, находящуюся в динамическом равновесии, так как некоторая часть этих спутников выбрасывается обратно. В 1922 г. В. Г. Фесенков [428] показал, что процент захваченных частиц зависит от геоцентрической скорости и увеличивается действием сопротивления атмосферы.

§ 390. Излучение света. Кроме метеоров, наблюдаются явления, связанные с излучением света метеорной материей в земной атмосфере. Прежде всего следует упомянуть так называемые светлые полосы на ночном небе, открытые Гофмейстером [41]. Наблюдения

Рис. 276. Светлые полосы на небе 21 июня 1939 г. (фото Гофмейстера).

этих полос, собранные еще Мауэром в 1899 г., имелись уже у прежних наблюдателей. Видны они несколько раз в году, притом в одни и те же даты; иногда полосы не видны, но ночь оказывается аномально светлой. Эти полосы очень слабы, иногда видны в форме

пятен (рис. 276), и нужна большая тренировка, чтобы видеть их, так как поверхностная яркость их немногим выше яркости противосияния или зодиакальной полосы. Эти полосы прозрачны, как хвосты комет, ореолов не дают, иногда могут охватывать все небо. Они медленно дрейфуют в течение нескольких часов, притом медленнее, чем серебристые облака, поэтому их высота должна быть больше. Действительно, в 1938 г. Гофмейстеру удалось получить не только их фотографии, но и параллакс на базисе Зоннеберг — Нюрнберг (101 *км*). Пределы высот были 90—180 *км*, среднее по 48 точкам $H = 118 \pm 3$ *км*. Им же была составлена «роза ветров»; полоса смещается как одно целое, чаще всего с В на З. Под тропиками явление слабее, но годовой ход в южном полушарии такой же, как и в северном, что указывает на общую космическую причину. К утру в среднем явление резче. В 1934 г. Дюфе впервые наблюдал в спектре такой полосы усиление линий свечения ночного неба под действием какой-то причины; по Гетцу (1935 г.), линии кислорода в полосе ярче в 2—3 раза. В 1934 г. Гофмейстер нашел, что годовой ход видимости полос и радиослышимость совпадают; при появлении полос слышимость падает вследствие возмущения ионосферы, например, на волнах 360—530 *м* на 20%. С видимым часовым числом метеоров полосы не связаны, но совпадают иногда с датами больших потоков. Даты видимости полос:

28 XII—11 I	13 VIII
23—30 I	7—15 IX
6—7 II	8—16 X
17—22 V	7—24 XI
18—30 VI	7—14 XII
30 VII	17—25 XII

На основании всего этого Гофмейстер заключил, что полосы вызваны вторжением облаков космических пылинок, производящих ионизацию воздуха (подобно голубым следам метеоров на тех же высотах). Вспомним, что еще в 1912 г. Гемфрис пробовал объяснить свечение ночного неба метеорной бомбардировкой, несостоятельность чего показали Н. М. Штауде (вычислением) и Н. П. Барабашев (наблюдениями). Светлые полосы и пятна много раз отмечались с 1942 г. в Ашхабаде и Хейрабаде; они как бы вращались вместе с Землей, были видимы по часу и более, чаще после полуночи. При наличии этих полос стрелка часов в темноте видна с несколько большего расстояния. Их можно фотографировать при светосиле 1 : 1,5 или 1 : 2 на эмульсии 180 ГОСТ при выдержке 20—30 мин.

§ 391. Метеорный натрий в атмосфере. После заката Солнца, когда оно опустится на 1° под горизонт, на противоположной (восточной) стороне неба появляется земная тень, проектирующаяся на атмосферу. Выше нее хорошо видна желтая окраска неба. Летом 1936 г. на Эльбрусе М. Ф. Вукс и В. И. Черняев [932] нашли,

что при этом вспыхивает желтая линия D свечения натрия. Через полгода явление было описано за рубежом (рис. 277). Спектрографы ГОИ со светосилой 1 : 1 и 1 : 0,58 дают эту линию за 6 минут; в спектре ночного неба она в сто раз слабее. Кабанн, Гози и Дюфе в 1933 г. предположили, что натрий вносится метеорами, энергии которых в 8000 раз больше, чем нужно, чтобы ее возбудить [937]. По исследованиям последних лет максимум свечения натрия действительно находится на высоте $H = 86$ *км*, где находится центр тяжести распределения метеоров по радарным наблюдениям ($H \cong 87$ *км*). Линия натрия усилена в спектре ночного неба (Стермер [121]); то же нашли Эльви, Свингс и Линке в полосе на высоте 10°, наблюдавшейся ночью 11/12 февраля 1936 г. Свечение натрия может быть, однако, вызвано резонансными явлениями, фотодиссоциацией, ударом электронов и ударами «второго рода» молекул, причем натрий может быть занесен в частичках соли из океанов.

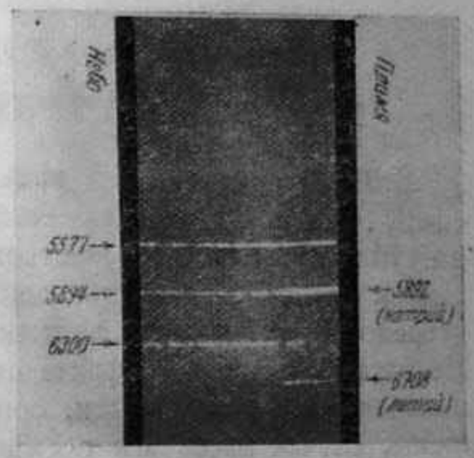


Рис. 277. Линия натрия в спектре сумеречного неба (по Кабанну и Дюфэ, 1938 г.).

В 1938 г. Фабри подсчитал, что метеорный натрий в атмосфере за время ее существования достиг концентрации $N = 10^{19}$ атомов в столбе воздуха сечением 1 $см^2$. Дежарден и Бернар считали этот натрий вулканическим, в 1940 г. Вегард предположил, что натрий вместе с водородом выбрасывается Солнцем. Брикар и Каслер измерили в 1944 г. абсолютную интенсивность свечения натрия (10^{-3} *эрг/сек · см² · стерадиан*), откуда $N = 0{,}8 \cdot 10^{10}$, но так как не все атомы излучают, то истинное число их $N \sim 10^{11}$. Желтая линия плохо видна летом, появляется в эпоху Персеид, лучше всего видна после Леонид; годовой ход параллелен ходу радиоотражений от слоя D ионосферы ($H = 55 - 75$ *км*), с которым Жуо и Васси [945] отождествили слой D натрия. Ныне, когда количество метеорной материи в атмосфере оказывается очень заметным, проще всего свечение натрия приписать метеорной причине.

В итоге мы должны заключить, что поглощение, рассеяние и излучение света согласно указывают на наличие заметной «метеорной составляющей» в земной атмосфере. Естественно считать, что, опускаясь вниз, космическая и метеорная пыль достигает земной поверхности, где ее и следует попытаться разыскать.

ГЛАВА 35

МЕТЕОРНАЯ МАТЕРИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

§ 392. Введение. Мы видели, что проникающая в земную атмосферу метеорная материя находится в динамическом равновесии: поступление ее из межпланетного пространства компенсируется осаждением ее на поверхность нашей планеты. Отсюда следующим шагом исследователя является попытка прямого обнаружения ее на Земле. Не касаясь очевидного факта падения метеоритов, рассмотрим данные о падении метеорной пыли, сопровождавшей полет метеоритов и болидов, случаи массового осаждения космической пыли (без видимого полета болида), а также находки метеорного материала в океанических и геологических отложениях, свидетельствующие о метеорной активности в далеком прошлом.

§ 393. Выпадение метеорной пыли (с метеорными явлениями). 15 (25) августа 1663 г. в Белозерском уезде крестьянин Л. Федоров наблюдал в дополуденное время, как над Робозером пролетал «огонь над водой», после чего на поверхности воды появился «аки ржавец» [71]. Во время осады Нарвы в 1704 г. Б. П. Шереметев писал из Дерпта Ф. А. Головину: «Сего июля 20-го числа за полчаса до ночи» пролетал болид «с великим шипом», оставил след «как дым ва образ змеи», который стал «шириться», затем «стрелило как ис пушки», после чего «на городскую стену пал дым бутто пороховой» [975].

Историк А. В. Бармин в архиве Нижне-Тагильского завода нашел донесение «главному начальнику Хребта Уральского» (пермскому губернатору) о том, что в Нижне-Тагильске около 4 час. утра 31 августа (12 сентября) 1841 г. на ССВ появилась огненная «полоса» (болид) и «разлилась по горизонту», небо озарилось красным светом с искристым отблеском, наподобие пожара, настолько ярким, что можно было читать, после чего полоса (след) начала слабеть и в воздухе появился «перегорелый запах» и дым (рис. 278). К 6 ч. утра атмосфера стала желтой и настолько дымной, что за сажень уже нельзя было различить предметы. Весь день было тихо, птицы не пели. В 24 *км* южнее в Черноисточинске явление протекало так же, по другую сторону Урала в Висимоуткинске (43 *км* к ЮЗ) наблюдалась «огненная туча», в несколько минут широко распространившаяся. Она давала столько света, что работали без свечей, хотя до рассвета было далеко. Днем здесь изредка проносилась мгла с запахом горелого, и стало так темно, что само письмо писано приказчиком при свече. Лесных пожаров тогда не было, смрад и мгла произошли от «феномена». Солнце появилось в Нижнем Тагиле только на следующий день, в 4 ч. дня; оно казалось «высеребренным» и без лучей, хотя в эти дни обычных облаков не было. Наличие запаха и дыма указывало, что частицы «облака» достигли земли. В ночь появления «огненного облака» был «подземный» гул, как отдаленный гром и сейсма в течение 2 секунд, в заводском пруду заколыхалась вода от удара на «ночной стороне» (т. е. там же на севере, где прошло «облако»). В целом здесь полет крупного звукового болида со следом сопровождался обильным осаждением метеорной пыли.

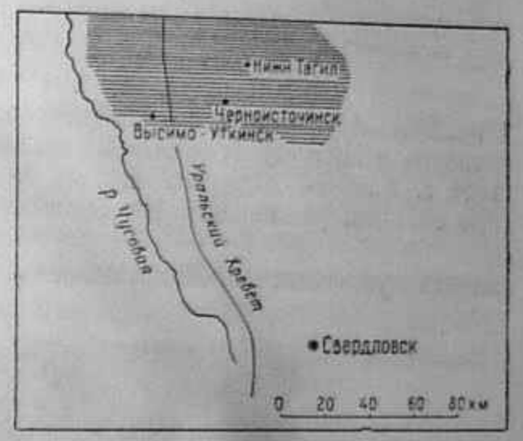


Рис. 278. Область, охваченная осаждением космической пыли 12 сентября 1841 г. (заштрихована).

При падении Тунгусского метеорита в районе падения тоже «все было затянуто дымом и мглой». В Саянах после полета звукового болида (4 декабря 1920 г.) в течение следующих 4—5 дней при тихой погоде падала с неба «рыжевато-бурая сажа; она была видна на снегу до самого снеготаяния». В эти дни солнечный свет «имел красноватый оттенок». Площадь Минусинского края, охваченная явлением, имела в радиусе 300 верст [971]. В марте 1934 г. Л. А. Кулик пробовал собрать на снегу метеорную пыль, осевшую после полета болида 26 декабря 1933 г., закончившегося выпадением метеорита Первомайский Поселок. Никеля в ней не оказалось (по анализу 1953 г.). На следующий день после падения Сихотэ-Алинского метеорита близ Губерова местный житель Милашенко заметил на выпавшем ночью снегу «необычайный сероватый налет». Напомним, что сквозь пылевой след этого метеорита 12 февраля 1947 г. Солнце просвечивало красноватым диском, а погода была такая же штилевая, как и в Саянах в 1920 г.

Из истории известны и другие факты. Например, в г. Верде (Ганновер) 3 декабря 1586 г. после световых явлений на небе и большого «шума» выпало много красного и черного вещества. В 1650 г. в Нормандии после полета болида прошел красный дождь; 13 марта 1813 г. на юге Калабрии у Кутро выпали метеориты после полета звукового болида; не только в Кутро, но и в Тоскане и Фриуле в большом количестве падала пыль,

в 4 ч. 15 м. дня зажгли свет. Однако на юге Италии и Франции облака земной пыли ветры заносят часто из Африки. Часть метеоритов Гессле (Швеция, 1 января 1869 г.), упавших на снег или лед, превращались в черно-коричневую пыль, которая по анализу Норденшельда на 51% состояла из углерода и содержала кремний, магний и закись железа; он считал, что такие вещества «сопровождают большинство метеоритов». Еще Клейбер писал, что доатмосферный состав метеорных тел может сильно отличаться от того, что может уцелеть, пройдя сквозь атмосферу. В ночь 24/25 декабря

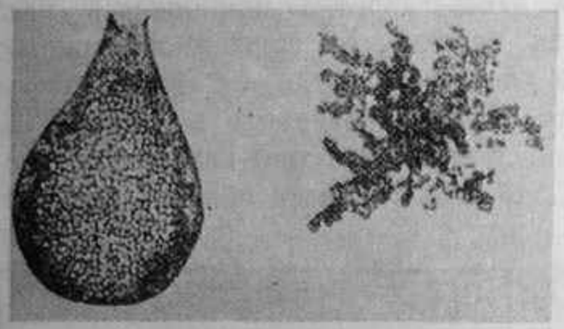


Рис. 279. Метеорная пыль, собранная на корабле в Индийском океане 24 декабря 1856 г. Слева — одна из частиц пыли при сильном увеличении (по Эренберг).

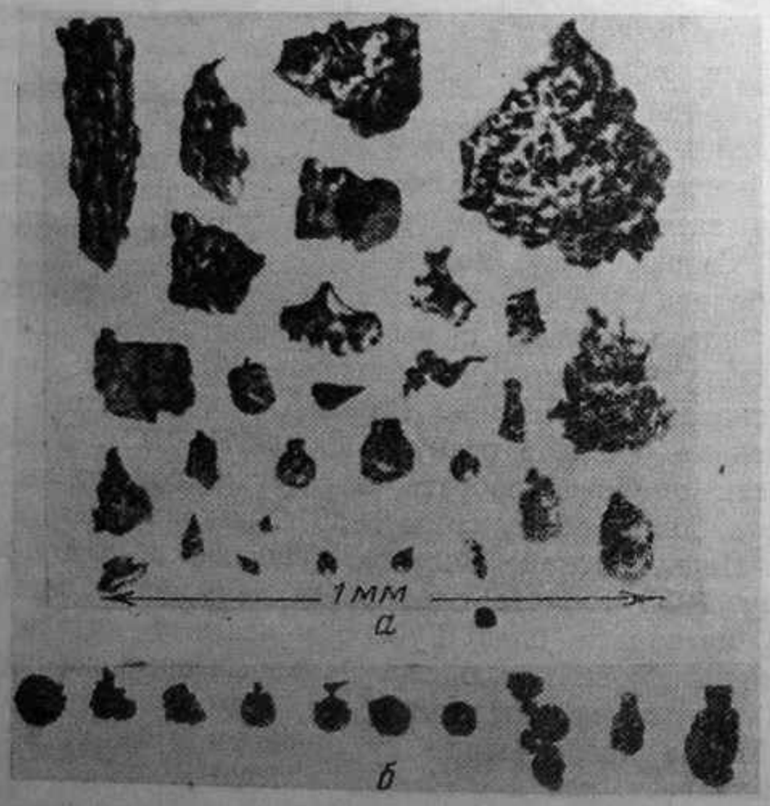


Рис. 280. *а* — Метеорные железные пылинки, собранные после метеорного дождя Драконид 9 октября 1933 г. во Франции (по Рюдо); *б* — метеорная пыль из снега Монблана (по Фламмариону).

1856 г. южнее Явы на корабль «Джозиа Бэйтс» выпала тонкая пыль, исследованная Эренберг, которая в каждой пылинке опознала

застывшую капельку; химический анализ указал на железо и его окалину (рис. 279). Напомним, что то были времена парусного флота.

В 1927—1933 гг. Рюдо [997] в Донвилле (Франция) собирал магнитом из дождевого осадка частицы; их число увеличивалось, по Рюдо, в периоды активности больших метеорных потоков. В сентябре 1927 г. над северной Францией прошел болид; через два дня было собрано особенно большое число частиц, некоторые из них были заметны глазом. Они были похожи на те частицы, которые собирались в эпохи потоков. На следующий день после метеорного дождя Драконид 10 октября 1933 г. число частиц было особенно велико, некоторые достигали размера 500 μ. Через день оседали частицы более мелкие, в том числе капли и зерна (рис. 280, *а*). Растопленный снег с Пиренеев и Монблана содержал такие же частицы (рис. 280, *б*). С 1 по 16 октября 1946 г. Ландсберг выставлял смазанные глицерином пластинки на горе Уизер (Вирджиния) и нашел на площади 45 $см^2$ 12 железных шариков диаметром в среднем в 22 μ; до метеорного потока Драконид 9/10 октября 1946 г. их не было вовсе. О сборе подобной пыли мы скажем позже.

§ 394. Падение пыли (без метеорных явлений) регистрировалось неоднократно. Обычно такая пыль содержала железо, никель и другие вещества, присущие метеоритам. В одних случаях это пыль метеорная, когда явление метеора могло остаться незамеченным из-за дневной или облачной погоды, в других случаях найденная пыль относится к падениям прежних, иногда очень отдаленных времен; наконец, такая пыль может быть космической, включая микрометеориты [1002]. Нужна осторожность, чтобы не смешать ее с земной пылью. Так, например, 6 ноября 1472 г. над Константинополем появилось облако, которое по мере приближения к Земле увеличивалось, расстилаясь по небу густо-черным покровом, из которого потом выпала горячая пыль слоем 1—2 *см*. Аналогичных случаев можно привести несколько [63, 910, 958, 969]. Падение черной пыли отмечено в Канаде 3—4 июля 1814 г., в Северной и Южной Америке в ноябре 1819 г.; в 1819 г. во Фландрии прошел красный дождь, в котором был хлорид кобальта, 13 января 1835 г. в Лёбо (Саксония) выпала пыль, содержавшая железо (эта пыль была доставлена в Парижскую Академию наук [104]). 8 июля 1824 г. близ Стерлитамака (Башкирия) выпал град [957]; внутри градин оказались включения, принятые за метеоритные, так как они содержали 70% Fe_2O_3. Хотя «стерлитамакские ядра» оказались земным минералом, захваченным ветром [959], тем не менее они привлекли внимание к тому, что космические частицы могут являться центрами конденсации атмосферной влаги. Баумгауэр (1845 г.) упоминал, что подобные включения нередки; Пиктэ нашел Fe и S внутри градин, выпавших

21 июня 1821 г. в Махо (Испания); вещество, притягиваемое магнитом и содержащее Fe, Ni (Козари), оказалось внутри градин, упавших в Падуе 26 августа 1834 г. В июле 1870 г. под 80° с. ш. и 15° в. д. были собраны пробы с полярного снега; черные зернышки, становясь серыми при высыхании, содержали Ni и C. Их было до 0,1—1 *мг* на кубометр снега, «факт огромной важности не только для физики Земли, но и для геологии», как заявил Норденшельд. Эта пыль была им названа «криоконитом», т. е. ледовой пылью. Но криоконит имеется на Шпицбергене и оказался земным минералом. В начале декабря 1871 г. в Швеции был необычайный снегопад; в Стокгольме в $1 м^3$ снега Норденшельд из черного осадка магнитом извлек Fe, вторая проба из леса Эвойя, похожая на сажу, также содержала ковкие частицы Fe. На сажу также походило вещество, падавшее с неба 14 мая 1864 г. при падении метеорита Оргейль во Франции (этот метеорит является углистым, но в день падения был лесной пожар). Юнг [987] две зимы [1874—1876 гг.) собирал пыль с Сен-Бернара (высота 2500 *м*), берегов озера Леман (375 *м*) и сравнивал ее с дождевым осадком на колокольнях Самары, Варшавы, Женевы, Лозанны и Парижа. Железо было найдено только на английских колокольнях. Оно было в форме шариков, подвергнувшихся действию высокой температуры. Тиссандье, специально занимавшийся этим вопросом, исследовал дождевые и снеговые осадки из многих мест; шарики окиси железа попадались постоянно и были похожи на те, которые образуются при сгорании железа в воздухе. В найденных шариках Тиссандье обнаружил Ni; он полагал, что при полете метеорных тел их образуется очень много. Действительно, в наши дни Е. Л. Кринов и С. С. Фонтон [968] независимо нашли их на поверхности железных метеоритов и на месте падения Сихотэ-Алинского метеорита (рис. 281). Такие шарики известны также на поверхности железного метеорита Браунау (падение 14 июля 1847 г.), откуда их легко отделял еще Менье [104]. В 1873 г. Норденшельд нашел Fe в 500 *г* града, выпавшего в Стокгольме; в том же году Тиссандье собрал 124 *мг* магнитного осадка, содержавшего Fe и Ni, в дожде, прошедшем над Ла-Маншем. В пыли, выпавшей 28/29 марта 1880 г. в Катании (Сицилия), Сильвестри обнаружил стально-серые частицы с Fe и Ni, 10—80 *мк* в диаметре, иногда круглые; почти одновременно Ласо в Киле (Германия) собрал [989] из снега 141 *мг* сухого остатка, содержавшего Fe. М. О. Маркс, политический ссыльный в Енисейске, описал выпавшую там с дождем вечером 31 октября 1881 г. пыль, содержавшую Fe, Co и Ni [972]. В 1883 г. в Чили близ Сан-Фернандо снег покрылся за 30 минут красной пылью, состоявшей из мелких ковких, иногда сферических, частиц. Красно-коричневые шарики, по Норденшельду, содержали 75% окиси железа и 6% NiO; без кислорода их состав 92,3% Fe и 7,6% Ni, отвечающий железным метеоритам. Выпарив 15 кубометров альпийского снега в 1883 г., Юнг в магнитной части осадка

нашел обломки и шарики, имевшие Fe. Он полагал [987], что железистых частиц бывает больше в конце ноября — начале декабря, и приписывал это Леонидам. В Нью-Гэмпшире в 1885 г. после грозы Бачельдер собрал осадок с Ni, Fe и Si. Массовое выпадение пыли 3 мая 1892 г. охватило Данию, Швецию, Финляндию и часть Германии на площади 1650 *км* в длину и 300—500 *км* в ширину.

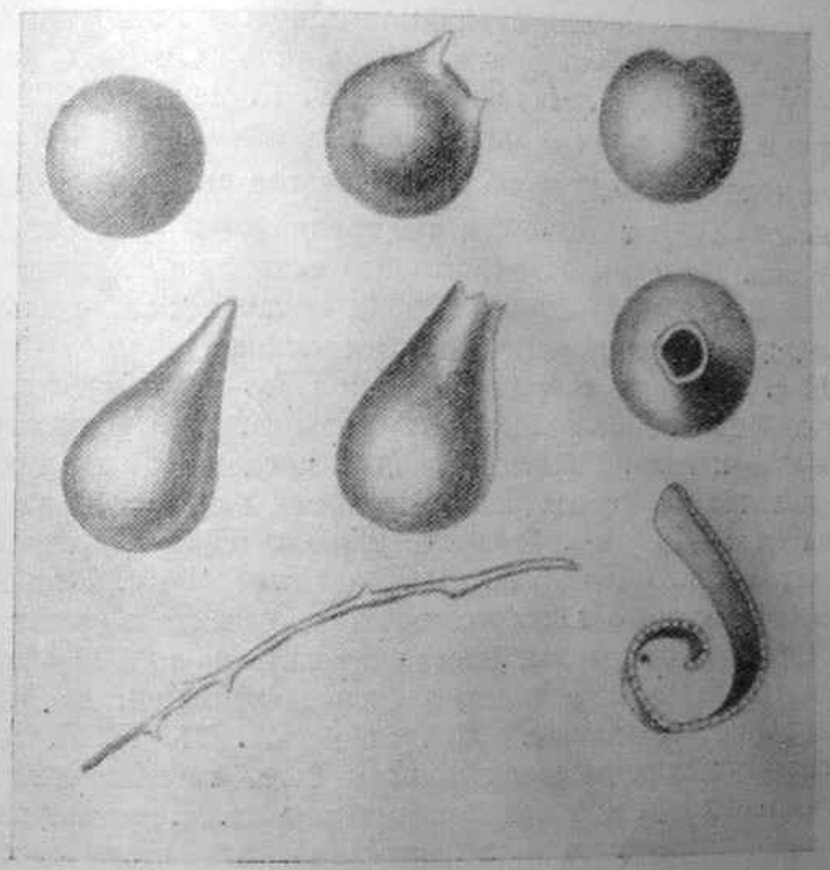


Рис. 281. Различные формы микроскопических частиц никелистого железа из кратеров Сихотэ-Алинского метеорита (по С. С. Фонтону и Е. Л. Кринову).

По Норденшельду, при этом выпало $0{,}5 \cdot 10^6$ *т* космической пыли, до того якобы носившейся кольцом вокруг Земли (!).

В 1902 г. А. П. Карпинский поднимал вопрос об изучении космической пыли [967]. П. Роговский широко ставил вопрос о связи атмосферных осадков с проникновением метеорной и вообще космической пыли [976], О. Мирбах (Киев) и др. полагали, что от нее зависит возникновение перистых облаков. В 1927 г. Мирбах [990] писал о возможности влияния Леонид на погоду, что допускал также В. А. Балясный [960] и к чему недавно вернулся Боуэн (Австралия) [980].

Отрицать местное влияние такой пыли на образование облаков трудно, так как еще 14 мая 1864 г. после падения метеорита

Оргейль возникли плотные облака, а 12 февраля 1947 г. после полета Сихотэ-Алинского метеорита на месте его следа появлялась дневная облачность. Вообще пылевые следы болидов неоднократно являлись причиной возникновения на их пылинках, как на активных центрах, конденсационных облаков. Говорить же о влиянии больших метеорных потоков на погоду пока нет оснований, так как осаждение пылинок идет днями и неделями с разной скоростью, и кроме того, основное количество космической пыли приносят не крупные потоки, а телеметеоры и микрометеориты, активность которых не связана с этими потоками. П. Н. Чирвинский и В. К. Черкас в 1929 г. [977] подсчитали, исходя из числа оптических метеоров ($20 \cdot 10^6$ за сутки), что общее количество метеорной пыли за год составит $7 \cdot 10^{-10}$ *г/м²* (или $M_0 = 2{,}3 \cdot 10^{-21}$ *г/см² · сек*), что трудно обнаружить даже спектроскопически. Ныне мы знаем, что это есть лишь крайний нижний предел. По В. И. Вернадскому (1934), космическая пыль «падает непрерывно»; но изучение ее ускользает от нас.

В 1936 г. Липпман совершил 60 полетов на самолете, собирая на высотах 600—6000 *м* пыль из воздуха. Во всех случаях он находил в ней никель. Ракетные данные последних лет также подтвердили наличие метеорных частиц-пылинок на $H = 40$ *км* и выше (1 пылинка на 1—100 *м³*). В Омске 2 июля 1941 г. прошел «красный дождь», исследованный П. Л. Дравертом [965]. Ведро дождевой воды содержало 3 *г* сухого остатка; магнит извлекал плоские частицы неправильной формы, блестящие шарики до 100 μ диаметром и изометрические зерна никелистого железа размером до 50 μ. Анализ показал присутствие Fe, Ni и следы Co. По П. Л. Драверту, размеры галактических пылинок должны быть «меньше чем у пылинок, получающихся от распада метеоритов» (т. е. метеорных пылинок). Быстро претерпевая ряд изменений, эта пыль рассеивается в почвах. Он предупреждал, как надо быть осторожным при сборе магнитной фракции пыли, чтобы не принять за метеорную или космическую пыль индустриальную, возникающую при электросварке или резке металлов электродугой. Возникающие в последнем случае шарики и капельки очень похожи на метеорные. Пробы пыли, собранные с крыш некоторых домов в США, показали убывание в ней металлических частиц по мере приближения к периферии города, что явно говорит о ее земном происхождении.

«Если действительно хотят найти космическую пыль, то ее необходимо искать как можно дальше от всякого жилья» (П. Н. Чирвинский). При этом надо производить проверку на W, Ni и Mo — этих элементов технических сплавов и сталей и на Pt, Ge — спутников Ni. В 1946 г. Н. Б. Дивари в верховьях Алма-Атинского ущелья (Алатау) перетопил 85 ведер плотного снега. Этот район далек от промышленных центров, и «внеземных» фракций в осадке не оказалось [963]. Если бы здесь пыль осаждалась так, как на крышах домов в США, где ее собирали более 10 лет, то в 85 ведрах снега ее было бы несколько десятых миллиграмма, исходя из оценки Найнинджера в несколько килограммов в год на 1 кв. милю (2,56 *км²*). Оседание внеземной пыли происходит, но не в такой степени, а именно $M_0 = 10^{-16}$ *г/сек · см²*; собирать ее надо у конечных морен, где происходит таяние ледников, в углублениях арктических ледников и т. п. Некоторые растения (плоды томата, семена гречихи, гороха) концентрируют в себе Ni до $2 \cdot 10^{-6}$ своего веса; то же наблюдается у моллюсков, раков, рыб и лягушек.

На побережье Таймыра 13 августа 1878 г. Нордквист собрал на льду желтые чешуйки размерами более 1 *мм* в количестве 0,2 *г* на площади 10 *м²*. Норденшельд считал их ольдгамитом — минералом метеоритов. В летописях отмечены случаи якобы падения железообразных и иных космических масс, иногда с метеоритами (Штирия, август 1618 г.); вероятно, здесь некоторые данные ошибочны. Там же упоминалось о падении также больших глыб льда или крупного дождя из безоблачного неба. На это обратил внимание Ф. Шведов (Одесса, 1882 г.) [978], а позже Хёрбигер пытался развивать свою «ледяную космогонию». В свете нынешних воззрений на ядра комет, как на скопления льдов, углеводородов и пыли, эти наблюдения заслуживают пересмотра.

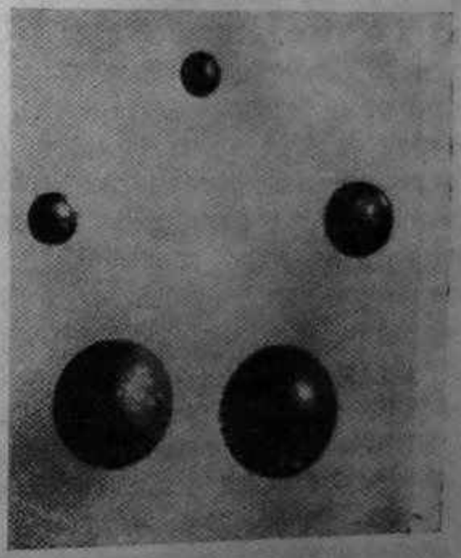


Рис. 282. Шарики никелистого железа Сихотэ-Алинского метеорита. Размер наибольшего — 280 μ (по Е. Л. Кринову и С. С. Фонтону).

§ 395. Ископаемая пыль внеземного происхождения. Чтобы учесть роль металлургии в образовании шариков Fe_2O_3, содержащих Ni, диаметром от нескольких микрон до нескольких десятков, еще в прошлом веке были взяты пробы [104] со дна Средиземного моря у берегов Алжира и Туниса; в 700 *м* от берега оказалось много миллиграммов таких шариков, размером 28—42 μ. Некоторые имели оттянутое горлышко (хвостик застывающей капельки), как на образцах Сихотэ-Алинской пыли (рис. 282). В морском песке залива Поссессион Серре собрал в разных местах шарики до 56 μ. Затем были обнаружены такие же шарики в артезианских колодцах Пасси на глубине 569 *м*; они имели вид выпавших не в век альба ($\sim 70 \cdot 10^6$ лет назад), а недавно. Со всевозможными предосторожностями против заноса извне такие же шарики (7—20 μ) нашли Менье и Тиссандье в песчанике Сен-Жюльен ле-Мец, в слюдистом

псаммите Вюртемберга и пермском песчанике Зальцбаха, т. е. они имеют возраст свыше 100 миллионов лет. Они хранятся в метеоритной коллекции Парижского музея; их диаметры 14—42 μ, как и у нынешних шариков. Таким образом, было доказано, что шарики падали на Землю еще до появления человека (800 000 лет назад). В 1951 г. было отмечено, что «начиная с протерозоя (миллиард лет назад) заметной примеси метеоритного материала в горных породах нет» [973]. П. Л. Драверт допускал, что обогащение никелем сюкеевского пирита (Татарская АССР) в древних осадочных породах пермского возраста (150 миллионов лет) могло произойти за счет метеорной материи, попавшей на дно «некогда бывшего здесь бассейна», где возник пирит [966]. В осадочных породах плиоцена (6 миллионов лет) южной части Омской области был также найден никель; он сносился текучими водами в эти водоемы, где аккумулировался [964]. Перейдем теперь к океаническим отложениям.

§ 396. Глубоководные отложения. В 1876 г. во время исследований на «Челленджере» Джон Мёррей нашел [991] в глубоководных илах «космические сферулы», т. е. шарики (см. рис. 5). В 1891 г. он и Ренар описали эти шарики, причем некоторые ученые относили их к земному октиббегиту, а Гартлей считал их выбросом доменных печей. Глубоководная красная глина находится на большом удалении от побережий материков, куда не достигают выносы рек, поэтому центральные области океанов на глубинах 3500—7200 *м* остаются незагрязненными и содержание внеземной составляющей в процентном отношении здесь выше. «Земное» происхождение красной глины необъяснимо [970]; на 55% она состоит из кремнезема, на 16% — из глинозема, на 9% — из окиси Fe и содержит 0,04% окислов Ni и Co. В ней найдены зубы рыб третичной эпохи на глубине 30—40 *см*, что указывает на крайне медленный темп накопления (4 *см* за миллион лет). Общая площадь океанского дна, покрытого такой глиной, составляет 82 млн. *км*² или шестую часть поверхности планеты; 65 млн. *км*² приходится на Тихий океан, 9 млн. *км*² на Атлантический и 8 млн. *км*² на Индийский. В 1910 г. были открыты методы микрохимии, позволившие установить наличие в красной глине 0,032% NiO и 0,025% Ni против 0,008% Ni в земной коре. Морская вода, материковая и вулканическая пыль и выносы рек не содержат столько никеля, чтобы объяснить этот избыток. Океанографы за последние годы научились брать пробы вещества с глубин до 20 и более метров ниже дна. В 1950 г. исследовалась красная глина в 1600 *км* севернее Таити [996]. Содержание Ni в ней было неравномерным и достигало максимумов на глубине 322, 1280, 1387 и 1457 *см* от дна (рис. 283). Если этот никель космический, то накопление его шло неравномерно и могли играть роль отдельные падения. Не всегда пропорционально изменяется содержание Fe_2O_3 (3,6—11,2%) и MnO_2 (1,4—4,1%). В 1951 г. тем же океанографи-

ческим институтом (Гетеборг) работы были продолжены; с глубин 5000 *м* было взято 11 колонок грунта дна, были найдены зерна с никелем, содержание которого росло с уменьшением размера зерна. Особенно много их было на горизонте 1360—1410 *см*. В лавах и базальтах дна океана содержание никеля на порядок ниже. Наибольшее содержание никеля оказалось в тех отложениях, которые отлагались с наименьшей скоростью. За 1000 лет, согласно радиевому анализу на возраст, накопляется слой осадка в 0,04 *мм* при содержании в нем никеля 0,2 *мг/см*³. Таким образом, за год на площади 1 *см*² осаждается $8 \cdot 10^{-9}$ *г* Ni, а считая его содержание в 3% в метеорном материале, находим количество последнего в 1,5 миллиона тонн в год для всей Земли, откуда $M_0 = 9 \cdot 10^{-15}$ *г/см*² · *сек*. Если космического никеля только 10%, то получим $M_0 \cong 10^{-15}$, что возможно более реально. После «Челленджера» магнетитовые шарики нашли экспедиции на других кораблях, всего 23 раза. Это были наиболее крупные (до 380 μ) шарики и очень древние, например, на корабле «Атлантис» — с глубин 100—103 *см*, т. е. упавшие 25 млн. лет назад, а найденные «Карин» — еще раньше. Но на кораблях «Вальдивия» в 1898—1899 гг. и «Гаусс» в 1901—1903 гг. шариков не нашли, хотя на первом работал сам Мёррей. Таким образом, вопрос нельзя считать окончательно решенным и работы океанографов в западной части Тихого океана продолжаются.

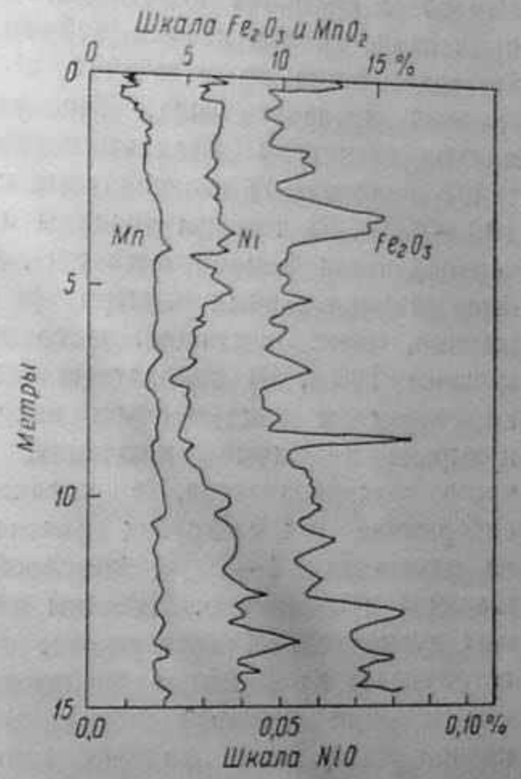


Рис. 283. Химический состав отложений на дне Тихого океана на глубине 5000 *м* в толще 15 *м* (данные шведской экспедиции 1950 г.).

§ 397. Результаты сбора пыли. В 1904 г. Дитте сделал обзор [982] работ по сбору внеземной пыли; В. Фишер в течение 30 лет собирал материалы по этому вопросу, но не успел их опубликовать [984]. Впервые собранные в 1924 г. в Вашингтоне пробы справедливо были отнесены к земной пыли. Во Флориде в 1931—1932 гг. пыль собиралась на чистые пластинки, выставлявшиеся на ночь горизонтально. Были найдены хрупкие круглые частицы, как непрозрачные белые, так и стеклообразные, приписанные Леонидам (Фишер). В Канаде в 1939 г. выпала пыль с 7% магнетита, но без никеля

(«канадский криоконит»). Испытав разные способы, Найниджер в 1940 г. нашел, что наилучшим является применение сильного магнита, прикрытого прозрачной пластинкой (целлофан) и помещенного на пути течения дождевой воды. Здесь всегда находятся шарики (в среднем 90 μ диаметром); анализ указывает в них никель. В 1946 г. Ландсберг применял пластинки, покрытые глицерином, затем нашли применение гибкие пленки (арборит). Применяются липкие жидкости, затвердевающие по истечении нескольких суток и сразу дающие готовый препарат пыли. Так улавливаются частицы в несколько микрон диаметром. Баддхью в сводке 1950 г. [981] различает семь типов пылинок: 1) неправильные серые аморфные осколки размером 100—200 μ, 2) частицы окалины и шлака, 3) округлые зерна мелкого черного песка (земной магнетит), 4) черные блестящие «полированные» шарики разных размеров (в среднем 20 μ), 5) большие черные шарики, менее блестящие, часто шероховатые и со вмятинами, редко крупнее 100 μ, 6) силикатные шарики, белые, серые, желтоватые, коричневые и даже черные; иногда они стекловидны и в них есть пузырьки и темные включения, 7) шарики, содержащие стекло, часто полупрозрачное, в среднем 20 μ размером. Относительное содержание тех и других изменчиво: в дожде шариков 9—24%, на пластинках 4—20%, соотношение магнетитовых и силикатных шариков непостоянно. Найдены обломки стенок лопнувших силикатных пузырьков. Химически очень устойчивые магнетитовые шарики встречаются на бо́льшем диапазоне размеров, чем силикатные, причем меньшим размерам соответствует их большее количество. Магнитное поле Земли должно влиять на шарик при его падении, увеличивая число металлических шариков к полюсам и не влияя на силикатные, что действительно и было найдено. Баддхью считает неправильные металлические частицы за микрометеориты Уиппла и ван-де-Холста, тогда как шарики образуются при разрыве жидкой нити, срываемой с поверхности метеорного тела в полете. В глубоководной глине на 1 кварту (1,14 *л*), по Мёррею, встречалось 5—6 силикатных и 20—30 черных шариков. Осторожно скалывая окалину с больших шариков, можно было найти внутри металлическое ядро, которого нет в маленьких шариках, окисленных насквозь. Силикатные шарики имеют радиальную структуру и размеры до 500 (редко 1000) μ; стеклянные океанские шарики с магнетитовыми включениями более мелки; они подобны тем, которые попадаются на глицериновых пластинках. Обломков шариков Баддхью не нашел, но пустотелые встречаются часто (как железные, так и стеклянные), чем и объясняются вмятинки. Магнетитовые частицы неправильной формы иногда внутри имеют серое металлическое железо, т. е. не являются природным магнетитом. Заметим, что при 220° С в воздухе магнетит переходит в Fe_2O_3 без нарушения структуры и потери магнитных свойств, а при 550° С образуется гематит с потерей того и другого. В Калифорнии град и дождь содержат одинаковое количество твердого осадка, 2% которого составляет магнитная часть. В местах, более удаленных от промышленных центров, как, например, ледник Сьюорд, Аляска или ледник Маласпина, пробы дают очень мало магнитной фракции и отсутствие никеля, как и анализы Д. П. Малюги проб с Западного Тянь-Шаня, взятых Н. Б. Дивари. Таким образом, следует большинство частиц, приписываемых «внеземной» пыли, считать за индустриальную и только ничтожно малую ее часть — за действительно метеорную пыль.

Пока еще не ясен вопрос о космической фракции — микрометеоритах; Баддхью полагает, что каменные метеориты в полете дают не капельки, а мелкие обломки, из которых состоят пылевые следы. Непрерывный спектр метеоров на некоторых спектрограммах (Е. Н. Крамер, Одесса и П. Миллман, Оттава) допускает возможность образования жидких капель, сдуваемых с поверхности. О том же свидетельствует кора упавших метеоритов.

Рассчитаем, следуя Эпику, образование капель в полете. Пусть σ есть поверхностное натяжение расплава, ρ — плотность воздуха, v — скорость капли и r — ее радиус; последний не может превзойти значения $r = \frac{4\sigma}{\rho v^2}$, так как иначе потоком воздуха капля дробится на более мелкие. По Эпику, метеорное тело массой 12 *мг*, соответствующее метеору $+2$ вел., образует сотни капелек. Уравнение Кнудсена дает скорость испарения в вакуум жидкого Fe и Ni, равную $(5 \div 10) \cdot 10^{-2}$ μ/*сек* при 1500° К, а при 1200° К в 10^3 раз медленнее. При скорости $v = 23$ *км/сек* наибольший возможный радиус капельки $r = 2—3$ μ при вертикальном движении метеора и в $\sqrt{\sec z_R}$ больше при зенитном расстоянии радианта z_R. Силикатный шарик тогда имеет предел $r = 6{,}5\sqrt{\sec z_R}$ μ.

Земная пыль является основной помехой при сборе пыли космической, поскольку последней меньше в 10^3—10^5 и более раз. В индустриальных районах иногда 50% солнечного света поглощается этой пылью; еще в 1931 г. в Англии за сутки на 1 кв. милю выпадало ее 0,7 *т*, в Лос-Анжелосе в 1946 г. 0,9 *т* (!). Различают даже четыре «пылевых» слоя атмосферы на высотах примерно до 1, 4, 12 и 20 *км*, заполненные пылинками размером от нескольких микрон до коллоидных частиц. Пыльные бури на Земле переносят миллионы тонн пыли (например, 27—28 апреля 1928 г. в юго-восточной Европе); по В. А. Обручеву, ей обязаны своим происхождением лёссы Азии. Имеются и иные явления, которые не следует смешивать с выпадением метеорной или космической пыли, как, например, развитие «ледниковых цветов» — анциклонем — крошечных водорослей на прибрежных ледниках Гренландии и Аляски, окрашивающих снег в красный цвет, или растения Chlamidonomas nivalis, производящего такое же явление около Томпсонова прохода на Аляске. Недавно розовый снег в Пиренеях от последней причины

отметил Рёш. Наконец, пыль, содержащая земное железо, приносится из Сахары (как, например, 3—10 марта 1869 г.), пыль в Новой Зеландии 6—9 октября 1928 г. содержала 4,2% земной Fe_2O_3, а комментатор Гомера Евстахий давно писал, что в Армении часты

Рис. 284. Микроскопические железные шарики на поверхности Сихотэ-Алинского метеорита, являющиеся результатом пульверизации метеорита при полете (по Е. Л. Кринову).

«кровавые» дожди, так как там много рудников киновари. На Алагезе в 1932, 1935 и 1940 гг. наблюдалось выпадение цветного снега, в последнем случае желтого за счет африканской пыли. Поскольку в Арктике в 1 $см^3$ воздуха содержится 1—4 обычных пылинки против $20 \cdot 10^3$ в городе, то поиски пыли внеземного происхождения следует проводить именно там. Тогда, в частности, сравнивая

соотношение угловатых и сферических частиц, можно найти величину средней геоцентрической скорости метеоров (Эпик [995]).

В заключение напомним, что при падении кратерообразующих метеоритов в результате плавления и разбрызгивания метеорита и земной породы могут также возникать микроскопические шарики. Они были найдены, как уже описывалось, в кратерах Хёнбэри и Вабар, впервые в 1932 г., затем в большом количестве Е. Л. Криновым и С. С. Фонтоном в 1950 г. (рис. 281) в сихотэ-алинских кратерах и Найнинджером в 1952 г. в Аризонском кратере. Аризонские шарики от времени покрылись оболочкой магнетита с 17% Ni и потому снаружи красно-коричневые, тогда как сихотэ-алинские блестящие, как никелированные. Такие же шарики имеются на поверхности самого метеорита (рис. 284). Гроздья шариков никелистого железа в аравийских кратерах включены в силикаглас (рис. 285).

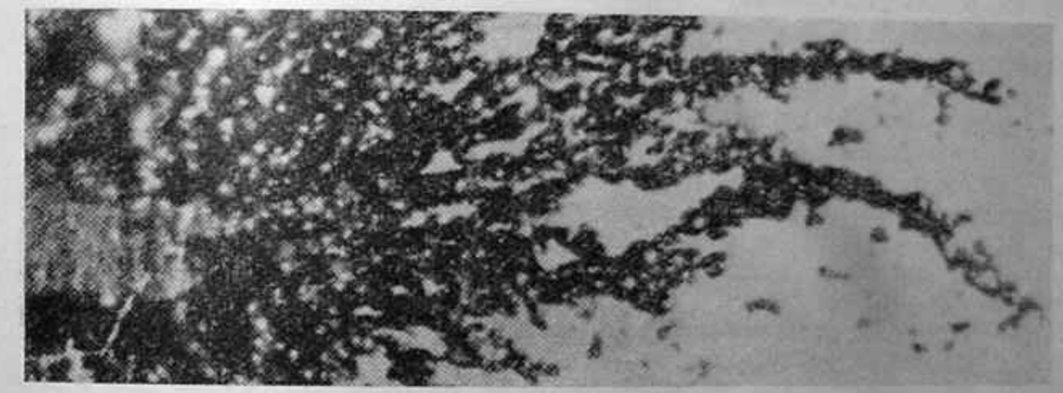


Рис. 285. Шарики никелистого железа в сплавленном песке аравийского метеоритного кратера Вабар (по Спенсеру).

Ринехарт из исследований последствия стрельб ультрабыстрыми пулями в мишень нашел, что при ударе на испарение идет малая доля энергии, а основная ее часть тратится на кратерообразование. Если это применимо к частицам воздуха, ударяющим метеорное тело в полете, то должно быть больше обломков, чем капель. Неизвестно, могут ли металлические шарики возникать при конденсации паров железа, подобно, например, капелькам воды в земных облаках.

Имеется ли космическая пыль на других небесных телах? Еще в 1907 г. Н. А. Морозов показал, что поверхность Луны покрыта слоем пыли. Часть ее образовалась при ударе метеорных тел. Радиометрические наблюдения за скоростью остывания лунной поверхности во время лунных затмений показывают, что размеры этих пылинок менее 100 μ. На Марсе 16 января 1950 г. наблюдалось облако на высоте 100 *км*, которое Эпик считает возникшим при падении крупного метеорита [998].

Еще в 1922 г. В. Г. Фесенков [428] указал на возможность захвата межпланетных пылинок внешней атмосферой Земли. В 1954 г.

к этому вопросу вновь вернулся Ягер. Суточный прирост ΔM массы Земли за счет этой пыли, при ее пространственной плотности ρ, приближенно равен $\Delta M = 10^{23} v_g \rho$ граммов, где v_g есть геоцентрическая скорость пылинок, а $\rho \approx 10^{-23}$ $г/см^3$.

Заключение. Каково же общее количество метеорной материи, осаждающееся на Землю за год? Учитывая завышенные оценки космической пыли за счет индустриальных примесей, можно думать, что метеоры за сутки дают несколько десятков килограммов, метеориты — порядка 1 m, кратерообразующие метеориты в среднем менее 1 m, все телескопические метеоры — несколько тонн и микрометеориты несколько десятков тонн. Все вместе приводит к $M_0 = 10^{-16}$ $г/сек \cdot см^2$ и вряд ли в нынешнюю эпоху превосходит эту величину на 1 порядок. Таким образом, за год на всю Землю осаждается более 16 000 тонн метеорной материи.

ЛИТЕРАТУРА

К ВВЕДЕНИЮ

I. Классические работы. Работы исторического значения (в хронологическом порядке)

1. Chladni E. F. F., Ueber der Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, Рига, 1794.
2. Стойкович А., О воздушных камнях и их происхождении, Харьков, 1807, 270 стр.
3. Борноволоков Н. Т.. Технол. журн. 8, 6, 101—140, ч. 2 и 4, 1811.
4. Мухин И., О чудесных дождях (или необыкновенных) и о низпадающих из воздуха камнях (аэролитах), СПБ., 1819, 207 + XXII.
5. Chladni E. F. F., Ueber Feuermeteore und über die mit denselben herabgefallenen Massen, Wien, 1819.
6. Перевощиков Д., О падающих звездах, Отеч. Записки, 1839, № 5.
7. Schweizer B. J., Beobachtungen von Sternschnuppen d. August-Periode auf die Observatorium d. Konstantinowsche Messinstituts, Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы, 1852, № 4, отд. оттиск, 31 стр.
8. Хандриков М., Догадки о происхождении падающих звезд, Матем. сб. 2, 1867. Определение путей метеоров, там же 3, 1868, 5, 1870.
9. Гебель А. Ф., Об аэролитах в России. Зап. Росс. Ак. наук 12, 1868.
10. Скиапарелли Дж., Письма к Секки, Матем. сб. 5, 1869—1870. Перев. А. Крапоткина; ср. [108].
11. Клейбер И. А., Астрономическая теория падающих звезд, СПб., 1884, 294 стр.
12. Клейбер И. А., Определение орбит метеорных потоков, СПб., 1891, 330 стр.
13. Бредихин Ф. А., Etudes sup l'origine des météores cosmiques, Спб., 1903, 364 стр.; см. Этюды о происхождении космических метеоров, изд. АН СССР, 1954, 606 стр.
14. Newton H. A., Abstract of a memoir on shooting stars., Am. J. Sci. (II), 39, 193, 1865 (17 глав); Ср. Mem. Nat. Ac. Sci., vol. I, No 3, 1866.

II. Общие обзоры по метеорам; библиография

15. Абельман И. С., О движении некоторых метеорных потоков, СПб., 1898, 68 стр. (отд. оттиск из Изв. РАО 7, 1898).
16. Астапович И. С., Федынский В. В., Метеоры, Изд. АН СССР, 1940, 128 стр.
17. Астапович И. С., Метеоры, Сборник «Вселенная», Госкультпросветиздат, 1955.
18. Астапович И. С., Обзор развития советской метеорной астрономии в СССР за 20 лет, Природа 26, № 12, 8—24, 1937. Лит-ра 124 назв.
19. Ватсон Ф., Между планетами, Гостехиздат, 1947, 227 стр. Перев. с англ.

20. Вернадский В. И., Об изучении космической пыли, Мироведение 23, № 3, 1934.
21. Ворошилов К. А. и Станюкович К. П., Метеорная астрономия в СССР за 20 лет. Мироведение 26, № 6, 1937.
22. Кринов Е. Л., Метеориты, Изд. АН СССР, 1948, 336 стр.
23. Кринов Е. Л., Основы метеоритики, Гостехиздат, 1955.
24. Левин Б. Ю., Физическая теория метеоров и метеорная материя в межпланетном пространстве, Изд. АН СССР, 1956, Лит-ра 307 назв.
25. Симон К. Р., Иностранная универсальная библиография. М., 1940, 70 стр.
26. Струве О. В., Librorum in Bibliotheca Speculae Pulcovensis, Отдел 91, СПб., 1860; 2-е изд., СПб., 1880, стр. 457—478.
27. Федынский В. В., Метеоры, БСЭ, II изд., т. 27, 1954.
28. Федынский В. В., Метеоры, М., Гостехиздат, 1955.
29. Федынский В. В., Метеоры, Сборн. «Астрономия в СССР за тридцать лет (1917—1937)», М., Гостехиздат, 1948. Библиография на стр. 240—245, сост. С. А. Шорыгиным.
30. Шнейдер Г., Очерк истории библиографии, М., 1929, 56 стр.
31. Шорыгин С. А., Аннотированный указатель астрономической литературы, АЖ 12—29 (с ноября 1935 г. по конец 1952 г. вышел 81 №).
32. Реферативный журнал «Астрономия и геодезия», М., выходит с конца 1953 г. ежемесячно. См. раздел «Метеоры и метеориты».
33. Astronomisches Jahresbericht, Berlin, Bd. 1—54, 1899—1954 (Sternschnuppen).
34. Bibliographie mensuelle rapide, Paris, 1933—1941, § 86 (Météores).
35. Denning W. F., Progress of meteoric astronomy from 1798 to 1910. Science Progress in XIX century, 1910, No 1.
36. Farrington O. C., Meteorites, Chicago, 1915, 233 + X, 65 рис.
37. Feliciano J., Cometas, estrellas cadentes e bolides. Saô Paulo, 1899, vol. 1—2.
38. Harrison Brown. Bibliographie on meteorites, Chicago, 1953.
39. Heide F., Kleine Meteoritenkunde, Jena, 1934, 120 + VI, 92 рис. Второе изд., 1955.
40. Herz N., Die Sternschnuppen. Valentiner's Handwörterbuch der Astronomie 2, 169, 1898.
41. Hoffmeister C., Die Meteore, Leipzig, 1937.
42. Hoffmeister C., Meteorströme, Weimar, 1948.
43. Houzeau J. C., Vademecum de l'Astronomie, Bruxelles, 1882, 795—806.
44. Houzeau J. C., Lancaster A., Bibliographie générale de l'astronomie, Bruxelles, 1882, 2, § 18—29, 709—763.
45. Lovell A. C. B., Meteor astronomy, Oxford, 1954. См. № 461.
46. Nininger H. H., Our stone pelted planet, New York, 1933, 237 стр.
47. Olivier Ch. P., Meteors. Baltimoré, 1925, 276 + XIX, 23 табл.
48. Plavec M., Meteorickè roje, Praha, 1956, 273 str.
49. Porter G. C., Comets and meteors, London, 1950.
50. Schulhof L., BA. 11, 126—144, 225—240, 325—336, 406—424, 1894.
51. Quetelet A., Sur la physique du globe, Bruxelles, 1861.
52. Wülfing, Meteoriten in Sammlungen und ihre Litteratur, Stuttgart, 1898.
См. также библиографии в № 89, 118, 341, 344.

III. Периодические издания

53. Метеоритика. Изд. Комитета по метеоритам АН СССР. Сборники работ (с 1941 г.).
54. Метеорный бюллетень в «Известиях Туркменского филиала АН СССР» (с середины 1951 г. «Известия Академии наук Туркменской ССР»), Ашхабад. Выходит с 1946 г. 6 раз в год.
55. Бюллетень Комиссии по кометам и метеорам Астросовета АН СССР. Изд. АН Тадж. ССР, Сталинабад (с 1957 г.).

56. Acta geochimica et cosmochimica, London. Изд. с 1952 г.
57. Contrib. of the Univ. of Iowa obs., публ. с 1930 г. в PA; с 1941 по 1951 под заглавием Contr. of the Soc. on Res. in Meteoritics.
58. Meteor News, публ. с 1934 г. в Journ. RAS Canada под ред. П. М. Миллмана; возобновлен после войны с 1951 г.
59. Meteor Notes, публ. в PA под ред. Ч. П. Оливье; прекращен в связи с закрытием этого журнала в 1951 г.
60. Meteoritics, вып. 1—4. Изд. с 1952 г., расширенное продолжение [57].
61. Trans. IAU (отчеты метеорной комиссии № 22) 1—9, 1924—1955 (обзоры по метеорам, основная библиография).
См. также №№ 302, 341, 344, 462, 467.

К ГЛАВЕ 1

62. Энгельс Ф., Диалектика природы, М., Госполитиздат, 1948, стр. 147.
63. Араго Ф., Общепонятная астрономия, т. IV, СПб, 1861, перев. М. С. Хотинского.
64. Астапович И. С., Древнегреческий миф о Фаэтоне с точки зрения метеорной астрономии, Природа, № 7, 84—85, 1948.
65. Астапович И. С., Кометы, метеоры, затмения, М., изд. Московского планетария, 1941, 116 стр.
66. Бунак О., Употребление метеорного железа первобытным человеком, Природа, 1917, май-июнь.
67. Вялов О. С., Китайские метеориты: железный — Кумыс-Тюя (Арманты) в Джунгарии и каменный — Нан Янг-пао в юго-восточной Кансу, Метеоритика 5, 23—25, 1949.
68. Драверт П. Л., Падение метеоритов в Тобольске по летописям XVII и XVIII веков, Сибирские огни 11, № 4, 160—164, 1935.
69. Морозов Н. А., Метеорные катастрофы и их влияние на умы людей, Мироведение 18, № 3, 149—153, 1929.
70. Предтеченский Е., Кометы и падающие звезды, 1896 (истор. часть).
71. Святский Д. О., Астрономические явления в русских летописях, Пг., 1915, стр. 168—191, оттиск из Изв. отд. русск. яз. и слов. Имп. Акад. наук, 20, кн. 1 и 2, 1915. Дополнение см. Мироведение 18, № 5, 1929.
72. Святский Д. О., К вопросу о библейском представлении тверди небесной, Мироведение 11, 134—135, 1922.
73. Святский Д. О., Сходные черты в метеорных явлениях 1908 г. на Тунгуске и XIII в. близ Великого Устюга, Мироведение 17, 117—119, 1928.
74. Щапов А. П., Сочинения, СПб, 1906. «Исторические очерки народного миросозерцания и суеверия», т. 1, стр. 46—172.
75. Antoniadi E. M., Journ. RAS Canada 33, 177—183, 1939.
76. Bornitz H., Sirius 33, 270—273, 1900.
77. Chant C. A., Journ. RAS Canada 37, 127, 1943.
78. Iba J., Appendices to the fragmentary notes on the astronomy in Japan, № 2, 3, 4, 1933.
79. Mohammed Khan R. A., PA 46, № 7, 1938.
80. Penya P. A., BSAF 16, 503, 1902.
81. Smiths. Contrib. astroph. 2, № 6, 1957.
См. также №№ 1, 2, 4, 5, 46, 51.

К ГЛАВЕ 2

82. Астапович И. С., Большой Тунгусский метеорит, Природа 40, № 2 и 3, 1951.
83. Астапович И. С., Опыт методики визуального изучения метеоров, Тр. Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР 2, 5—121, 1956, Ашхабад.
См. исторический обзор, стр. 21—35.

84. Блажко С. Н., О спектре метеора 1907, августа 12, АЖ 9, № 3—4, 146—162, 1932.
85. Бредихин Ф. А., О выделении метеоров из комет, Изв. РАО 1, 41—116, 1892.
86. Бюлл. САО № 22—23, 1957 (см. стр. 43—64 и библиографию).
87. Гумбольдт А., Космос, ч. I и III, М., 1863.
88. Гут В., Метеорная астрономия, Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии, 6, № 4, 65—76, 1955, лит-ра 78 назв.
89. Крапоткин А., Перечень некоторых статей о болидах. Манускрипт 1868 г. в библиотеке ГАО, Пулково, отдел 95.
90. Ловелл Б., Клэгг Д., Радиоастрономия, М., ИЛ, 1953, 240 стр., гл. 5—11.
91. Лукреций К., О природе вещей, т. II, М., 1947, стр. 565, фрагменты Эпикура и Эмпедокла.
92. Семенов Ф. А., Автобиография, Пг., 1920, изд. РОЛМ.
93. Струве В. Я., Etudes d'astronomie stèllaire, СПб., 1847; см. Этюды звездной астрономии. Перев. М. С. Эйгенсона, изд. АН СССР, сер. «Классики науки», 1953, 236 стр.
94. Федынский В. В., На конференции по физике метеоров в Манчестере (Англия) 20—22 июля 1954 г., АЖ 31, 6, 567—574, 1954.
95. Федынский В. В., Станюкович К. П., Результаты фотографического изучения одного яркого метеора, АЖ 12, № 5, 440—449, 1935.
96. Швейцер Б. Я., Наблюдения над падающими звездами августовского периода, Моск. ведомости, 1852, № 102, литер. отдел. Ср. [7].
97. Biot E., Catalogue des ètoiles filantes etc., Mem. sav. etr. 10, 129, 1846, Paris, также Note Supplèmentaire, Paris, 1846.
98. Chasles M., CR 12, 499, 527 и 587, 1841.
99. Chladni E. F. F., Ann. d. Phys. 68, 329, 1821; 71, 359, 1822; 75, 229, 1823; Ann. d. Phys. 2, 151, 1824; 6, 21, 161, 1826; 8, 45, 1826 (дополнения к [5]).
100. Heis E., Resultate der in den 43 Jahren 1833 bis 1875 angest. Sternschnuppenbeobachtungen, Köln, 1877.
101. Herrick E. C., Am. J. Sci. (1) 40, 349, 1841.
102. Hoff K. E. A., Ann. d. Phys. 18, 174, 1830; 24, 221, 1832; 34, 339, 1835 (продолжение [99]).
103. Lovitz, Description d'un météore remarcable, Спб., 1790.
104. Meunier, St., Météorites, Encycl. Chimique 2, 532, Paris, 1884.
105. Perrey A., Bull. Ac. Sci. Bruxelles 19, 386, 1865; 20, 12 et 390, 1865.
106. Rémusat A., J. de Phys. et de Chim. 88, 348, 1825.
107. Scheuchzer J. J., Naturgeschichte des Schweizerlandes. Zürich, 1706—1708, vol. 1—3.
108. Schiaparelli G. V., Entwurf einer astronomischen Theorie der Sternschnuppen, Stettin, 1871 (перев. Г. Богуславского).
109. Schmidt J. F. J., Resultate aus zehnjährigen Beobachtungen, Berlin, 1852.
110. Souchtein, AN. 1836, 303.
111. Whipple F. L., Harvard Meteor Program, Harv. Repr., II, 19, 1947= = Techn. Repr. № 1.
См. также №№ 1, 2, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 22, 50, 63, 68, 71, 802.

К ГЛАВЕ 3

112. Астапович И. С., О некоторых метеорных методах исследования стратосферы, АЖ 16, 28—41, 1939.
113. Атмосферы Земли и планет. Сборник под ред. Д. П. Койпера, ИЛ, 1951, 408 стр; 2-е изд. оригинала, Chicago, 1951.
114. Вавилов С. И., ред., Труды I Всесоюзной конференции по изучению стратосферы, Л., 1935, 927 стр.

115. Вопросы ракетной техники, № 4, 1953 (перевод работы: Newell H. E., High altitude rocket research).
116. Дуккерт П., Распространение волн взрывов в атмосфере, М., Гостехиздат, 1934.
117. Менделеев Д. И., О весе литра воздуха. Временник Главной палаты мер и весов, ч. 1, 1894.
118. Митра С. К., Верхняя атмосфера, М., ИЛ, 1955, 640 стр., гл. XIII.
119. Розенберг Г. В., УФН 34, 445, 1948; 39, 471—473, 1949; 46, 1, 131—133, 1952; 50, 1, 149—151, 1953.
120. Успехи физических наук 63, вып. 1а и 1б, 1957.
121. Хвостиков И. А., Свечение ночного неба, Изд. АН СССР, 1948, 496 стр., 2-е изд.
122. Штауде Н. М., Труды Комиссии по изуч. стратосферы, т. I, 1936.
123. Штермер К., Проблема полярных сияний, М., Гостехиздат, 1933 (истор. часть). См. L. Harang, The aurorae, 1952, London.
124. Boyd R. L. F., Seaton M. J., ed., Rocket exploration of the upper atmosphere. London, 1954, 376 стр. См. № 177.
125. Chapman S., Geomagnetismus, vol. I—II, 1049 + X стр., Oxford, 1940.
126. Kuiper G., ed., The Earth as a planet, Chicago, 1954, 751 стр.
См. также №№ 146, 170, 184, 283, 288, 302, 377, 385, 417, 541, 563, 591, 593, 657, 677, 687, 701, 722, 730, 732, 737, 740, 741, 742, 745, 749, 750, 754, 757, 770, 782, 783, 796, 800, 805, 854, 866, 900, 909, 911, 914, 927а, 943.

К ГЛАВЕ 4

127. Вавилов С. И., Глаз и Солнце. Изд. АН СССР, 1950, 5-е изд., 124 стр.
128. Исаков Л. Д., Природа 31, № 2, 58—60, 1943.
129. Кекчеев К. Х., Ночное зрение, М., Оборонгиз, 1942, 72 стр.; 2-е изд., 1946 г., 128 стр.
130. Кравков С. В., Глаз и его работа, М. — Л., 1950, 4-е изд., 532 стр.
131. Луизов А. В., Инерция зрения, Природа 36, № 9, 13—19, 1947; Едва заметное изменение яркости, Природа 39, № 9, 55—58, 1950.
132. Мартин Л., Введение в прикладную оптику, М. — Л., 1935, 240 стр. (гл. 5 и др.).
133. Поль Р. В., Введение в оптику, М. — Л., Гостехиздат, 1947, 484 стр.
134. Проблемы физиологической оптики. Том 3, 1946 и 4, 1947, Москва.
135. Слюсарев Г. Г., Геометрическая оптика, М. — Л., 1946, 332 стр. (гл. 9).
136. Справочник по военной оптике, Гостехиздат, М. — Л., 1945, 263 стр., под ред. С. И. Вавилова и М. В. Севастьяновой, стр. 28—47.
137. Сытинская Н. Н., Уч. зап. ЛГУ № 116, серия матем. наук, вып. 18 (астрономия), стр. 158—173, 1949.
138. Osthoff H., AN 178, 4, 57—70, 1908.
См. также №№ 84, 382.

К ГЛАВЕ 5

139. Астапович И. С., Астрономический режим юго-западного Туркменистана, АЦ № 66, 6—8, 1947.
140. Астапович И. С., Дифференциальные изменения длины и яркости метеоров, Бюлл. КН ВАГО № 41, 224—225, 1936.
141. Астапович И. С., Некоторые результаты наблюдений метеоров в высокогорных условиях, АЦ № 67, 7—8, 1947.
142. Астапович И. С., Об одной систематической ошибке в определении высот метеоров, АЖ 12, № 3, 252—255, 1935.
143. Астапович И. С., Некоторые результаты обработки метеоров по наблюдениям в 1925 г., АБ РОЛМ № 24, 1—2, 1929.
144. Изв. РАО 8, № 4—6, 7—8. 1900.

145. Калитин Н. Н., Освещенность во время сумерек, Природа 26, № 7, 18—22, 1937. Таблица продолжительности сумерек — см., напр., В. В. Витковский, Изв. РОЛМ 3, № 1, 16, 1914.
146. Калитин Н. Н., Актинометрия, М. — Л., Гидрометиздат, 1938, 324 стр.
147. Куликовский П. Г., Справочник астронома-любителя, Гостехиздат, 1949, 316 стр.; 2-е изд., 1953, 432 стр.
148. Станюкович К. П., Метод одностороннего определения высот и геоцентрических скоростей метеоров, Бюлл. КН МОЛА № 16, 27—33, 1932.
149. Тихов Г. А., Наблюдения Леонид, произведенные с воздушного шара. Основные труды, т. I (астрофизика), Алма-Ата, 1954, 336 стр.
150. Шаронов В. В., Измерение и расчет видимости далеких предметов, М. — Л, Гостехиздат, 1947, 284 стр.
151. Шаронов В. В., Освещенность в лунные ночи, АЖ 20, 1, 21—33, 1943.
152. Шаронов В. В., Таблицы для расчета природной освещенности и видимости, М. — Л, изд. АН СССР, 1945, 198 стр.
153. Guth V., Leonidy v poslednich letech. Říse Hvězd 15, 1—2, 1934.

К ГЛАВЕ 6

154. Астапович И. С., Итоги исследования метеоров в Туркменистане в 1942—1945 гг., Изв. ТФАН № 5, 105—112, 1946. Лит-ра 46 назв.
155. Астапович И. С., Комплексные наблюдения Персеид 1947, августа 8—14 в Ашхабаде, АЦ № 65, 5—9, 1947.
156. Астапович И. С., Метеоры, БСЭ, 1-е изд., 39, 150—152, 1938.
157. Астапович. И. С., Новый способ определения истинного числа метеоров (на англ. яз.), АБ РОЛМ № 26, 4, 1929.
158. Астапович И. С., Об одном появлении группы падающих звезд, АБ РОЛМ № 24, 2—3, 1929.
159. Астапович И. С., Обработка метеоров за 1925 г., Мироведение 18, 201, 1929.
160. Астапович И. С., Опыт систематизации метеоров. Бюлл. КН ВАГО № 21—22, 75—82, 1933. Лит-ра 34 назв.
161. Астапович И. С., Персеиды 1950 г. по наблюдениям в Ашхабаде, АЦ № 105, 6—9, 1950.
162. Астапович И. С., Радионаблюдения метеоров в Туркменистане в 1944—1945 годах. Изв. ТФАН № 3—4, 163—169, 1946.
163. Астапович И. С., Физические явления при полете метеоров, Мироведение 23, № 3, 196—215, 1934. Лит-ра 32 назв.
164. Васильев И. Е., Станюкович К. П., Лириды в 1930 г., Бюлл. КН МОЛА № 15, 5—11, 1932.
165. Елисеева Л. Г., Методика визуальных наблюдений метеоров в Ашхабаде. Изв. ТФАН № 1, 9—96, 1949, Метеорный бюлл. № 1, 1—2, 1949.
166. Иванов Н. И., Работы ТАО в области метеорной астрономии, Труды ТАО 5, 107—115, 1935.
167. Петров В. Н., Некоторые проблемы физики метеоров, УФН 22, 4, 449—464, 1939.
168. Федынский В. В., Пути метеорной астрофизики, Мироведение 23, № 3, 185—195, 1934.
См. также №№ 18, 141.

К ГЛАВЕ 7

169. Астапович И. С, Корреспондирующие наблюдения телескопических метеоров в 1930 г., Бюлл. КН ВАГО, № 17, 40—42, 1932.
170. Астапович И. С., Метеорный эффект Деллинджера. Докл. НИИЗМ, № 1, 11—14, 1947.

171. Астапович И. С., Некоторые физические явления при полете метеоритов в земной атмосфере, Метеоритика 7, 125—130, 1950. Лит-ра 47 назв.
172. Астапович И. С., О звуках при полете болидов, Мироведение 18, № 6, 337—339, 1929. См. Метеоритика 9, 71—101, 1951.
173. Астапович И. С., О природе телескопических метеоров, АЖ 12, № 1, 60—100, 1935.
174. Астапович И. С., Современные задачи любителя в метеорной астрономии, Мироведение 18, 73—80, 1929.
175. Бахарев А. М., Предварительная эфемерида и орбита потока Персеид по наблюдениям телеметеоров в 1938 г., Цирк. Тадж.АО № 52, 1—2, 1943.
176. Бахарев А. М., Результаты 12-летних исследований телескопических метеоров на Сталинабадской астрономической обсерватории, Метеоритика, 7, 81—94, 1950.
177. Бойд Р. Л. Ф. и Ситон М. Дж., Ракетные исследования верхней атмосферы, ИЛ, М., 1957, 416 стр.
178. Драверт П. Л., К вопросу об ощущении лучистой теплоты болидов, Природа 27, № 3, 108—109, 1938. См. № 513.
179. Калашников А. Г., О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом, ДАН СССР 66, № 3, 373—376, 1949. См. № 163, 762.
180. Кринов Е. Л., ДАН СССР 64, № 4, 475—178, 1949.
181. Субботина Н. М., Изв. РОЛМ, 1, 157, 1912; 2, 199—200, 1913.
182. Сытинская Н. Н., Фотографические методы метеорной астрономии. Труды I Всес. конф. по изуч. стратосферы, стр. 497—503, 1935; ср. ее же: Инструментальные методы метеорной астрономии. Тезисы докл. I Всес. съезда ВАГО, М., 1934, стр. 81.
183. Сытинская Н. Н., Фотометр для измерения яркости метеорных следов, АЖ 16, № 5, 51—53, 1939.
184. Федынский В. В., Метеорные следы и серебристые облака в верхних слоях атмосферы, Метеоритика 7, 95—112, 1950.
185. Федынский В. В., Радиометоды изучения метеоров. Тр. V Совещания по космогонии, М., 1956, стр. 356—388.
186. Федынский В. В., Результаты наблюдений метеорных следов в Таджикистане в 1934—1938 гг., АЖ 21, № 6, 291—306, 1944. Лит-ра 57 назв.
187. Цераский В. К., Sur le vitesses des Perséides, Анн. Моск. обс., II сер. 5, 34—35, 1911; то же «Избранные работы по астрономии», М., 1953, стр. 59—60.
188. Cook A. F. в книге: Kaiser T. R., ed., Meteors. London — New York, 1955, стр. 8—15.
189. Elkin W. L., AJ 20, 102, 469, 1899. См. № 277.
190. Kresak L., Práce Astr. Obs. Skalnate Pleso, 1, 19, 1955.
191. McKinley D. W. R., McKinley B., Canad. J. of Phys. 29, 111—112, 1951.
192. Millman P. M., Dom. Obs. Ottawa Contr. 2, № 17, 1954 (Ср. Sci. 120, № 3113, 325—328, 1954).
193. Millman P. M., Hoffleit D., Harv. Ann. 105, 31, p. 616 и 621, 1937.
194. Öpik E. J., Irish Astr. J. 2, № 7, 193—202, 1953 (см. Цвикки Ф., Морфология крупных скоплений вещества во Вселенной, сборник «Проблемы космической аэродинамики», 272 стр., М., 1953.
195. Öpik E. J., Tartu Obs. Publ. 27, 2, 3—8, 1930.
196. Öpik E. J., Harv. Circ., № 388—392, 1934.
197. Richter N., Sterne, 29, № 9—10, 196—200, 1953.

198. Villard O. G., Peterson A. M., Manning L. A., Eshleman K. R., Conven. Rec. Inst. Radio Engrs., 1953, 2.
199. Wright F. W., Jacchia L. G., Whipple F. L., AJ 59, № 10, 400—406, 1954.
См. также №№ 23, 84, 90, 95, 160, 162, 163, 278, 485, 486, 499, 500.

К ГЛАВЕ 8

200. Астапович И. С., Вторая конференция по кометной и метеорной астрономии, АЖ 14, 3, 249—250, 1937.
201. Астапович И. С., К наблюдателям падающих звезд, Мироведение 17, 1, 34—36, 1928.
202. Астапович И. С., Наблюдения потока Леонид в Восточной Сибири в 1932 г., Бюлл. КН ВАГО № 35, 184—186, 1935.
203. Астапович И. С., О системе угловых скоростей метеоров, Изв. ТФАН, № 1, 55—58, 1949.
204. Астапович И. С., О средней продолжительности полета метеоров, Бюлл КН ВАГО № 28, 129, 1934.
205. Астапович И. С., О точности наблюдений падающих звезд, Мироведение 25, 6, 48—51, 1936.
206. Астапович И. С., Физические свойства Персеид 1921 г., Бюлл. КН МОЛА № 12, 93—97, 1928.
207. Барабашев Н. П., Хронографические наблюдения Персеид, РАЖ 2, 4, 30—31, 1925 (на нем. яз.).
208. Беликов Ю., Ворошилов К., Штепан В., Ориониды в 1935 г., Бюлл. КН ВАГО № 38—39, 203—206, 1936.
209. Бредихин Ф. А., О персеидах, наблюдавшихся в России в 1894 г., Зап. Росс. Ак. наук 1, 33, 1894 (на фр. яз.).
210. Бронштэн В. А., Наблюдения метеоров в июне-сентябре 1931 г., Бюлл. КН ВАГО № 21—22, 68—72, 1933.
211. Дагаев М. М., Федынский В. В., Инструкция для наблюдений метеоров, Изд. АН СССР, ВАГО, 1949, 26 стр.
212. Дюков И. А., Результаты наблюдений Персеид в 1918—1920 годах, РАЖ 2, 1, 91—96, 1925.
213. Ермаков П. В., Об ошибках при наблюдении метеоров, Бюлл. КН ВАГО № 44, 253—258, 1937.
214. Карта для наблюдения потока Леонид, Н.-Новгород, 1900 г. (звезды до 6 вел.; на основе карты, приложенной к обращению С. П. Глазенапа в Изв. РАО 8, № 4—6, 123—125, 1900).
215. Краткие указания для наблюдений падающих звезд, имеющих целью определение радиантов метеорных потоков, Изд. РОЛМ, 1925, 6 стр. (написана В. А. Мальцевым совм. с Н. М. Штауде).
216. Куликовский П. Г., Справочник астронома-любителя, М., Гостехиздат, 1949, стр. 187—196; 2-е изд., 1953, стр. 261—275.
217. Максутов Д. Д., Анаберрационные отражающие поверхности и системы и новые способы их испытания, Труды ГОИ 8, вып. 86, 1932.
218. Максутов Д. Д., Астрономическая оптика, М., Гостехиздат, 1946, 368 стр.
219. Мальцев В. А., Инструкция для наблюдений падающих звезд. Русск. астр. кал., Пост. часть, 4-е изд., Н.-Новгород, 1930, 533 стр. (стр. 344—369).
220. Мельников О. А., Оптика линзовых и зеркальных астрономических телескопов. «Курс астрофизики и звездной астрономии» под ред. А. А. Михайлова, т. 1, Гостехиздат, 1951, стр. 39—108.
221. Мессер Я., Звездный атлас для небесных наблюдений, СПб., 1901, 3-е изд. (2 карты полушарий, 26 карт масштаба 1° ~ 3,5 *мм* до 6 зв. вел., до склонения — 35°).

222. Метеорный отдел Колнаба МОВАГО, Коллоквиум 9 февраля 1933 г. Бюлл. КН ВАГО № 23, 83—85, 1933.
223. Метеорный отдел Коллектива наблюдателей МОВАГО, Коллоквиум 22 января 1934 г., Бюлл. КН ВАГО № 28, 123—125, 1934.
224. Михайлов А. А., Звездный атлас, содержащий для обоих полушарий все звезды до 8,25 величины, М., 1952, 60 стр. и 20 листов карт.
225. Михайлов А. А., Атлас Северного звездного неба, Изд. МОЛА, 1920 (звезды до 7,5 зв. вел., 15 карт с текстом).
226. Моро-Ано М., Фотометрия кратковременных и переменных световых явлений, М., ОНТИ, 1939, стр. 18.
227. Петров В. Н., Лириды 1935 г., Бюлл. КН ВАГО, № 38—39, 206—208, 1936.
228. Покровский К. Д., Звездный атлас для небесных наблюдений, Берлин, 1923, 3-е изд., 16 стр. и 12 карт сев. и экв. области, карта Цераского для Персеид, гномонические сетки Лоренцони.
229. Проскурина Е. М., Звездные карты в гномонической проекции для наблюдения метеоров, 4 карты с сеткой координат на отдельной кальке, под ред. И. С. Астаповича, Изд. АН СССР, ВАГО, 1950 (см. [231]).
230. Проскурина Е. М., К методике определения радиантов метеорных потоков, Изв. ТФАН СССР, № 5, 71—74, 1950.
231. Проскурина Е. М., Новые карты звездного неба в гномонической проекции, Изв. ТФАН СССР, 1, 1946 (см. [229]).
232. Проскурина Е. М., Об определении угловых скоростей метеоров, Изв. ТФАН СССР, № 5, 96—98, 1950.
233. Справочная книга оптика-механика. Т. I и II, ОНТИ, 1936.
234. Субботина Н. М., Изв. РОЛМ 1, 157, 1912; 2, 199—200, 1913.
235. Федынский В. В., Инструкция для наблюдений метеоров, Бюлл. ВАГО, № 2, 16—21, 1939. См. Бюлл. КН ВАГО, № 16, 21—25, 1932 и № 45, 261—267, 1937.
236. Федынский В. В., Машбиц Б. М., О звездных картах для наблюдений метеоров, Мироведение 19, 5—6, 148—149, 1930.
237. Федынский В. В., Определение цвета метеоров, АЖ 7, 3—4, 223—231, 1930.
238. Федынский В. В., Машбиц Б. М., Экспериментальное изучение ошибок при наблюдении метеоров, Мироведение 19, 5—6, 142, 1930.
239. Цераский В. К., Carte pour l'observation des ètoiles filantes. Отд. оттиск (2 стр.) из Анн. Моск. обс., 2 серия 5, 34—35, 1911. (Карта в проекции Гаусса — Ламберта, минимально искажающей углы. Отд. изд. МОЛА, М., 1914.) Прил. к атласу К. Д. Покровского и к Мироведению 21, № 4, 1932 (перечерчена для Леонид). На ее основе — карта для Лирид, изд. КН ВАГО (литограф.) М., без года.
240. Штауде Н. М., Задачи практической метеорной астрономии, Мироведение 11, № 2, 1922; ср. там же 9, № 40, 1920.
241. Штауде Н. М., Новый способ обработки наблюдений падающих звезд, Изв. НИЛ 2, 1922; там же 6, 1—7, 1923. См. также РАЖ 1, 3—4, 90—97, 1924 и 2, 1, 1925.
242. Guth V., Gnomonicky Atlas hvezdne oblohy, Praha, 1940 (звездный атлас в гномонической проекции, 14 карт всего неба до 6,5 вел. с двумя сетками координат, масштаб в центре 1° ~ 3,5 *мм*. Содержит 7796 звезд).
243. Millman P. M., Journ. RAS Canada 31, № 6, 255—272, 1937 (отд. оттиски). Comm. D. D. Obs. № 6, General Instruction for meteor observing, 24 стр., 1937 и 1940.
244. Rohrbach C., Sternkarten in gnomonischer Projection, Berlin, 1895 (12 карт мелкого масштаба).
245. Watson F., PA 43, 1935.

246. Young R. K., Publ. Dominion obs. Ottawa. 2, № 7, 161—164, 1915 (Атлас неба из 20 карт в гномонической проекции; отдельно литографированы Американским метеорным обществом).
См. также №№ 84, 142, 160, 164, 174, 196, 322.

К ГЛАВЕ 9

247. Астапович И. С., Исследование фотографий трех метеоров, АЖ **12**, 200—204, 1935.
248. Астапович И. С., Фотографические наблюдения Персеид 1948 г. в Ашхабаде, Изв. АН Туркм. ССР, № 2, 94—95, 1952.
248а. Астапович И. С., Эффективность камер при фотографировании метеоров, Изв. АН Туркм. ССР, № 6, 1957.
249. Бугославская Н. Я., Сравнительное исследование фотографических объективов с точки зрения их применения в астрономии, АЖ **16**, № 5, 54—65, 1939.
250. Бурмистров Ф. Л., Точная фотография, М. — Л., Оборонгиз, 1939, 344 стр.
251. Геворгян П. О., Метеорная фотография в Ереванской астрономической обсерватории 1939—1940 г., Бюлл. Ереванской обс. № 5, 35—40, 1942.
252. Головня А. Д., Иофис Е. А., Современная техника фотографического процесса, М., 1949, 46 стр.
253. Гришин Н. И., О фотографировании метеоров, Метеоритика **7**, 70—76, 1950.
254. Гришин Н. И., О фотографировании метеоров, Бюлл. ВАГО № 8 (15), 14—21, 1950.
255. Гришин Н. И. и Мансурова К. С., Фотографическое изучение метеоров Московским отделением ВАГО в 1949—1950 г., Бюлл. ВАГО № 10 (17), 19—27, 1951.
256. Дейч А. Н., Некоторые специальные задачи астрометрии, разрешаемые фотографическим методом. «Курс астрофизики и звездной астрономии» под ред. А. А. Михайлова, т. 1, Гостехиздат, 1951, гл. 15, стр. 257.
257. Джуманиязов В., Исследование проникающей способности десяти объективов, Изв. АН Туркм. ССР, № 6, 93—95, 1953.
258. Иофис Е. А., Практика цветной фотографии, М., 1950, 62 стр.
259. Катасев Л. А., Определение орбит метеоров по фотографиям Сталинабадской астрономической обсерватории, Труды САО **3**, 1, 5—41, 1950. Ср. также [422].
260. Каценеленбоген Э. Д., Свойства и применение фотографических материалов, М., Госкиноиздат, 1950, 184 стр.
261. Максутов Д. Д., Выбор рациональной оптики для фотографирования и спектрографирования метеоров, Бюлл. КН ВАГО № 29, 131—133, 1935.
262. Сытинская Н. Н., Исследование эффективности объективов и фотоматериалов для съемки метеоров. Уч. зап. ЛГУ № 12, 66—72, 1937. См. [182].
263. Сытинская Н. Н., Применение фотографии к изучению интенсивности свечения метеоров, Бюлл. Ком. по исслед. стратосферы, № 1, 19—22, 1936. Ср. [182].
264. Сытинская Н. Н., Фотографические и визуальные наблюдения потока Персеид в 1935 г. Бюлл., Ереванской обс., 1938, стр. 42—52.
265. Федынский В. В., О фотографировании метеоров, Мироведение **24**, 196—202, 1935.
266. Фотообъективы, систематизация и пособие к выбору. Состав. Оптическая секция ОНТС, Ленинград, 1931, 96 стр.
267. Хотинок Р. Л., Зубаиров М. Х., Результаты фотографических наблюдений метеорного потока Персеид в Ашхабаде в августе 1950 г., Изв. АН Туркм. ССР, № 2, 95—96, 1952.

268. Шаронов В. В., Фотографическая иррадиация и ее влияние на снимки планетных дисков, АЖ **27**, 2, 116—122, 1950.
269. Campbell D. A., Irish Astr. J. **3**, № 6, 185, 1955.
270. Fisher W. J., Olmsted M., Harv. Ann. **87**, pt. 3, 233, 1931 и Olmsted M., ibid. **82**, № 8, 179—195.
271. Jacchia L. G., Harv. Obs. Techn. Repr. № 2, 3 и 4, 1948—1949.
272. King H. C., Optician **126**, № 3261, 270—272, 1953.
273. Liller W., Whipple F. L., в сборнике Rocket exploration of the upper atmosphere [124], стр. 112—130 (рус. пер. в [177], стр. 135—156). См. также Sky a. Tel. **8**, № 4, 1949.
274. Link F., Čas. Česk. ústavů astr. **3**, 3, 38, 1953.
275. Millman P. M., Journ. RAS Canada **31**, 295—310, 1937.
276. Millman P. M., Hoffleit D., Harv. Ann. **105**, 601—621, 1937.
277. Olivier Ch. P., AJ **46**, № 5, 41—57, 1937.
278. Sykora J. J., AN **186**, 111, 1910, ср. ibid **178**, 86, 1908; BSAF **38**, 64—71, 1924, Mem. Spett. Ital. **31**, 81—83, 1902.
279. Whipple F. L., Proc. Am. Phil. Soc. **79**, 4, 499—503, 1938; Rev. Mod. Phys. **4**, 248, 1943. Smiths. Contr. astroph. **1**, № 1, 1956; № 2, 1957. Ср. AJ **62**, 37, 1957.
См. также №№ 88, 182, 218, 432.

К ГЛАВЕ 10

280. Альперт Я. Л., УФН **38**, 321, 1949.
281. Ананьева Л. Я., Евдокимов Ю. В., Радиолокационные наблюдения Драконид 8—10 октября 1955 г., АЦ № 165, 16, 1955.
282. Астапович И. С., Радионаблюдения телеметеорного дождя потока Геминид 1953 г., АЦ № 169, 17—20, 1956.
283. Гневышев М. Н., О влиянии падающих звезд на распространение радиоволн, Климат и Погода, № 2 (53), 17—19, 1934.
284. Иванов Н. А., О влиянии метеорной ионизации на распространение радиоволн, АЖ **8**, № 3—4, 240—253, 1931.
285. Костылев К. В., Пробные радиолокационные наблюдения метеоров на астрономической обсерватории им. Энгельгардта, АЦ № 163, 17—20, 1955.
286. Левин Б. Ю., Астрономический календарь на 1947 г., стр. 121. Горький, 1947.
287. Левин Б. Ю., Наблюдения Драконид, АЦ № 57, 2, 1946.
288. Ловелл А., Метеорная ионизация и атмосферные аномалии, УФН **41**, № 1, 9—43, 1950.
289. Чечик П. О., Радиотехника и электроника в астрономии, Госэнергоиздат, 1953, стр. 104.
290. Almond M., Bullough K., Hawkins G. S., Joddr. Bank Ann. (I), **I**, 13—21, 1952.
291. Almond M., Davies J. G., Lovell A. C. B., MN **111**, 585, 1951; **112**, 21—39, 1952; **113**, 411—427, 1953.
292. Aspinall N. A., Clegg J. A., Hawkins G. S., Phil. Mag. **39**, 577, 1948.
293. Clegg J. A., Davidson J. A., Phil. Mag. **41**, 77, 1950.
294. Closs R. L., Clegg J. A., Kaiser T. R., Phil. Mag. **44**, 313—324, 1953.
295. Davies J. G., Ellyett D., Phil. Mag. **40**, 614, 1949.
296. Dieminger W., Arch. d. elektr. Uebertrag. **7**, 12, 556—560, 1953.
297. Ellyett C. D., Roth K. W., Austr. J. Phys. **8**, 3, 390—401, 1955 (ср. **8**, 1, 148—166).
298. Forsyth P. A., Vogan E. L., Can. J. Phys. **33**, 5, 176—188, 1955.
299. Hey J. S., Stewart, Nature **158**, 481—482, 1946.
300. Hines C. O., Can. J. Phys. **33**, 9, 493—503, **33**, 10, 600—606 и 609, 1955.

301. Kaiser T. R., Adv. in Phys. 2, № 8, 495, 544, 1953.
302. Kaiser T. R., ed., Meteors, London, 1955.
303. Liller W., Cruft Lab. Harv. Un. Techn. Rep., № 65, 1949.
304. Lindblad B., Lund Obs. Medd. (I), № 179, 1952; № 189, 1956.
305. Lovell A. C. B., Clegg J. A., Proc. Phys. Soc. 60, 491, 1948.
306. Manning L. A., Villard O. G., Peterson A. M., J. Geophys. Res. 57, 387, 1952.
307. Manning L. A., Villard O. G., Peterson A. M., J. Appl. Phys. 20, 475, 1949.
308. McKinley D. W. R., Ap. J. 113, 225—267, 1951.
309. McKinley D. W. R., Millman P. M., PIRE 37, 364, 1949.
310. McKinley D. W. R., Ap. J. 119, 3, 519—530, 1954; 122, 3, 513—519, 1955.
311. McKinley D. W. R., Millman P. M., Can. J. Phys. 31, 171—181, 758—767, 1953.
312. McKinley D. W. R., Millman P. M., Can. J. Phys. A 27, 53, 1949.
313. McKinley D. W. R., в книге: Meteors, ed. Kaiser, London, 1955, стр. 65—72.
314. McKinley D. W. R., Can. J. Phys. 29, 403—426, 1951 и 32, 450—467, 1954.
315. Millman P. M., Journ. RAS Canada 44, 209, 1950.
316. Volmer P., CR 237, 18, 1085—1087.
317. Weiss A. A., Austr. J. Phys. 8, 2, 279—288, 1955.
См. также №№ 90, 154, 155, 162, 185, 192, 461.

К ГЛАВЕ 11

318. Астапович И. С., Метеорный поток кометы Джакобини — Циннера (Драконіды), Бюлл. КН ВАГО, № 42, 230—234, 1936.
319. Астапович И. С., Новое определение средней гелиоцентрической скорости метеоров по методу вариации, ДАН СССР 1, № 5, 261—263, 1934.
320. Астапович И. С., О количестве метеорного вещества, выпадающего на Землю, Природа 27, № 1, 78—79, 1938.
321. Астапович И. С., Баранцева В. И., Годовой ход часовых чисел метеоров северной полярной области по наблюдениям 1930—1932 гг., Бюлл. КН ВАГО № 26—27, 119—121, 1934.
322. Лозинская А. М., Персеиды в 1923 г., Бюлл. КН ВАГО, № 25, 102—104, 1934.
323. Набоков М. Е., Мироведение 1 (36), 10, 1912.
324. Нардин В. В., Распределение метеоров по яркости в функции скорости, Изв. АН Туркм. ССР, № 3, 95, 1953.
325. Штауде Н. М., Изв. НИЛ 1, 1919 и AN 218, 155, 1921.
326. Backhouse T. W., Obs. 7, 299, 1884.
327. Cook A. G., Obs. 38, 136—142, 1915.
328. Herschel A. S., MN 24, 133 и 189, 1864.
329. McIntosh R. A., Journ. RAS. Canada 26, 196, 1932.
330. Mohammed Khan R. A., J. Hyderabad Acad. Studies, 6, 7—8, 1943.
331. Newton H. A., Am. J. of. Sci. (2) 38, 135, 1864.
332. Oepik E. J., Tartu Obs. Publ. 25, № 1, 1922, 56 стр.
333. Oepik E., Ueber Korrespondierende statistische Beobachtungen, AN 219, 93—98, 1923.
См. также №№ 11, 157, 173, 302, 435, 436.

К ГЛАВЕ 12

334. Аленич А. А., Визначення радиантів падучих зір. Зап. Подольск. ун-та 2, 1—4, 1926.
335. Астапович И. С., Двадцать шесть метеорных потоков, связанных с кометами, АЦ № 142, 6—10, 1953.

336. Астапович И. С., Метеорные потоки южного полушария, Русск. астр. кал. 32, 140—144, 1929.
337. Астапович И. С., О некоторых кометных радиантах, АБ РОЛМ № 25, 1929.
338. Астапович И. С., Основной каталог метеорных радиантов XIX в., Изд. АН Туркм. ССР, Ашхабад, 1956, 106 стр.
339. Астапович И. С., Радианты главнейших потоков по китайским наблюдениям X—XII века, АЦ № 113—114, 13—19, 1951.
340. Астапович И. С., Эклиптикальная связка орбит потоков метеорных тел в солнечной системе, Изв. АН Туркм. ССР, № 1, 1950, стр. 95—96.
341. Бронштэн В. А., сост., Указатель к «Бюлл. Всес. Астр.-геод. о-ва», 1925—1952, Изд. АН СССР, 1953, стр. 20—23.
342. Дубяго А. Д., Определение орбит, Гостехиздат, 1949, 444 стр.
343. Катасев Л. А., Соснова А. К., Результаты фотографического изучения метеоров на Сталинабадской обсерватории, Труды САО 4, 42—50, 1954.
344. Корытников С. Н., сост., Указатель содержания «Астрономического циркуляра» АН СССР, № 1—100 (1940—1950 гг.), стр. 25 и № 101—150 (1950—1954 гг.), стр. 31—32.
345. Крамер Е. Н., Кометные радианты и связь метеорных потоков с кометами, Изв. Астр. обс. Одесск. ун-та 3, 163—247, 1953 (лит-ра 72 назв.).
346. Крамер Е. Н., Кометные радианты, Труды Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР, 1, 3—75, 1955 (лит-ра 26 назв.).
347. Мальцев В. А., АБ РОЛМ № 7—12; 14—16; 18; 21—23 (1924—1928).
348. Мальцев В. А., Главнейшие радианты метеорных потоков, Русск. астр. кал., Пост. часть, 4-е изд., Н.-Новг. 1930, стр. 448—453.
349. Мальцев В. А., Цирк. ТАО № 1—5, 15, 21 и 26, 1933—1934.
350. Проскурина Е. М., Предварительный каталог метеорных радиантов по наблюдениям в Ашхабаде в 1934 г., Изв. ТФАН № 3, 66—72, 1949 (см. [424]).
351. Саврухин А. П., Исследование метеоров по фотографическим данным, Труды САО 4, 51—55, 1954.
352. Сакк В. Я., Деякі результати спостережень телескопічних метеорів, Наук. зап. Криворожського пед. ін-ту 1, 25—34, 1941.
353. Станюкович К. П., Определение радиантов, скоростей и высот метеоров по односторонним фотографиям, Бюлл. ВАГО № 4, 3—10, 1939.
354. Сытинская Н. Н., Окончательный каталог 827 метеорных радиантов и соответствующих орбит. Уч. зап. ЛГУ, № 12, 73—102, 1937.
355. Цераский В. К., Об определении радианта метеорных потоков вообще и Персеид в частности, М., 1914, 7 стр.
356. Циркуляры Тадж. АО № 11, 34, 35, 43, 48, 50, 59—60.
357. Denning W. F., General catalogue of the radiant points. Mem. RAS 53, 203—293, 1899.
358. Denning W. F., MN 72, 423—451 и 631, 1912; 76, 219—239, 252, 913, 1916; 84, 37—56, 1923.
359. Denning W. F., Obs. 41, № 521, 21, 1918; Мироведение 10, 1921.
360. Erman A., AN 17, 10, 1840.
361. Hirose H., Tomita K., Tokyo Astr. Bull. № 77, 755—762, 1955.
362. Hoffmeister C., Die Meteore. Weimar, 1948, 286 стр., 55 фиг., 54 карты.
363. Kleiber J. A., AN 110, 373, 1884; MN 52, 341, 1892; BA 5, 184, 1888.
364. McIntosh R. A., Tr. N.-Zealand Inst. 60, 448 (1931); 63, 443, 1934; Tr. R. S. of. N.-Z. 66, 60, 1937 (Bull. N.-Z. Astr. Soc. № 5, 21, 24, 1937); 69, 4, 1940, MN 95, 709, 1935.

365. Niessl G., Hoffmeister C., Katalog d. Bahnbestimmungsgrossen 611 heller Meteore, Wien, 1925, 70 S; оттиск из Denkschr. Wien Ak. **100**, 1925.
366. Olivier Ch. P., Tr. Am. Phil. Soc. **22**, ч. 1, 1911 (обозн. M1); Publ. Leander McCorm. Obs. **2**, ч. 4, 1914 (обозн. M2); **2**, ч. 7, 1920 (обозн. M3); 5, ч. 1, 1929 (обозн. M4); PA с **37**, 1929 по **58**, 1950.
367. Pokrovsky K., Schaine G., Les radiantes cométaires et la connection entre les cométes et les courants météoriques. Труды Пермского ун-та, т. 1, 1918 (1919), Пермь. Radiantes des Geminides, des Orionides, des γ- ét δ-Aquarides d'apres les observations en 1868—1874, ibid. **1**, 1—53, 1919.
368. Prentice J. P. M., Journ. BAA **51**, 164—167, 1941.
369. Whipple F. L., AJ **59**, 201—217, 1954.
370. Whipple F. L., Proc. Am. Phil. Soc. **82**, 275—290, 1940; **83**, 711—745, 1940.
371. Wylie C. C., PA **38**, 246, 1930 до **58**, 1950.
См. также №№ 8, 11, 12, 13, 33, 43, 47, 90, 95, 166, 173, 277, 279, 302.

К ГЛАВЕ 13

372. Астапович И. С., Болид 5 мая 1933 г. в Таджикистане, Бюлл. ВАГО, № 4, 23—26, 1939.
373. Астапович И. С., Высоты и скорости метеоров по работам Аризонской экспедиции, Мироведение **26**, № 4, 217—220, 1937; Природа, **25**, 1, 75—77, 1936.
374. Астапович И. С., Об одном методе определения элементов траектории метеорного тела в атмосфере, АЖ **15**, 2, 110—117, 1938.
375. Астапович И. С., О получении относительных высот метеоров из статистических наблюдений в одном пункте, Бюлл. Ерев. обс., № 4, 11—12, 1941.
376. Астапович И. С., Определение высот потока Орионид 21—23 сентября 1933 г. односторонним методом, Бюлл. КН ВАГО № 35, 183—184, 1935.
377. Астапович И. С., О «голубых» следах метеоров, АЦ № 121, 4—5, 1951.
378. Астапович И. С., Федынский В. В., О высотах метеоров, ДАН СССР **2**, № 3—4, 197—201, 1935.
379. Блажко С. Н., Об определении пути метеора в атмосфере, Русск. астр. кал. **13**, 1907, приложение, стр. 1—5.
380. Глушко Л. Г., Старкова А. Г., Обработка корреспондирующих фотографий двух метеоров, Бюлл. ВАГО № 7 (14), 28—31, 1949.
381. Зоткин И. Т., Приближенное определение траектории болида в атмосфере, Бюлл. ВАГО, № 13 (20), 25—28, 1953.
382. Калитин Н. Н., Форма небесного свода, Природа **38**, 4, 7—10, 1949.
383. Капустян Е. К., Траектория дневного болида 12 июля 1948 г. над Кара-Кумами, Изв. ТФАН СССР, № 2, 93—95, 1950.
384. Катасев Л. А., Высоты, скорости и орбиты трех фотографических метеоров, Цирк. САО № 83—84, 1—6, 1950.
385. Левин Б. Ю., Распределение высот метеоров, АЖ **15**, 2, 118—129, 1938; **16**, 31—45, 1939; **26**, 115—123, 1949.
386. Маева С. В., Высота, скорость и торможение метеора 11 августа 1948 г., Бюлл. ВАГО № 7 (14), 23—28, 1949.
387. Пинегина Н. И., Обработка фотографий метеора 11—12 августа 1948 г. Бюлл. ВАГО, № 10 (17), 28—36, 1951.
388. Станюкович К. П., Применение некоторых эмпирических зависимостей к изучению метеоров, АЖ **10**, № 4, 457—464, 1933. См. Бюлл. ВАГО № 16 (23), 1955.

389. Статистический метод определения средней высоты возгорания метеоров. Зап. Харьк. ун-та, 1915, стр. 1—8 (отд. оттиск).
390. Тихов Г. А., Исследование пути Томаковского метеорита, Известия нар. учил. Екатериносл. губ., отд. оттиск, Екатеринослав, 1907.
391. Хотинок Р. Л., Обработка односторонней фотографии метеора 1948 августа 11. Изв. АН Туркм. ССР, № 4, 74—77, 1952.
392. Шарбе С. Б., Определение высот падающих звезд, Русск. астр. кал. 8, 1902.
393. Analysis of meteor heights, Harv. Obs. Tercentary papers. № 30, 1937.
394. Bessel F. W., Ueber Sternschnuppen. AN **16**, 345, 1839.
395. Brandes H. W., Mag. f. d. neuest. Zust. d. Naturl. **6**, 302, 1803. Ср. Berl. Astr. Jahrb. 1806, S. 211.
396. Bumba K., Link F., Publ. Obs. Nat., Praha **20**, 1948.
397. Davidson M., Jour. BAA **46**, 292, 1936.
398. Denning W. F., MN **57**, 164—169, 1897; Journ. BAA **27**, **28**, **29**, **32**, 1916—1921.
399. Guth V., Prace ven. Dr. Nuš'ovi, Praha, 1938, стр. 30—39.
400. Halley E., Phil. Tr. **30**, № 360, 178, 1719 (ср. ibid. № 159, 1714).
401. Heis E., AN **66**, 321, 1866; **72**, 42, 1868.
402. Hoffmeister C., Mitt. Stw. Sonn. № 2, 1922; № 8, 1925; № 14, 1928; № 30, 1935.
403. Jacchia L., Kopal Z., Millman P. M., Ap. J. **111**, 1, 1950.
404. Kästner, Berl. Astr. Jahrb. 1788, s. 1 6.
405. Millman P. M., McKinley D. W. R., Sky a. Tel. **8**, 114, 1949.
406. Oepik E., Harv. Ann. **105**, 562—573, 1937.
407. Porter J. G., Journ. BAA **60**, № 1, 4—17.
408. Porter J. G., MN **103**, 134—153, 1943; **104**, 257—272, 1944; возражения R. A. McIntosh'a: J. Roy. Astr. Soc. Canada **38**, 193—200, 1944 и **37**, 305—315, 1943.
409. Sawicky P., AN **228**, № 17 (5465), 297—314, 1926.
410. Shaw R. W., Boothroys S. L., Manual of Astronomy, 3rd. ed. New York, 1947 (литограф. изд.).
411. Teichgraeber A., Die Sterne, № 6, 1937.
412. Tisserand F., BA **13**, 89—98, 1894.
413. Weiss E., Denkschriften Wien Ak. IIa, **77**, 255—356, 1905.
414. Wylie C. C., AJ **54**, № 6, 187—188, 1950.
415. Списки высот см. Obs. **46**, 1923, Journ. BAA **34**, 1923 и за последующие годы (Англия), PA **35**—**60**, 1927—1952; Flower Obs. Reprints № 18, 1933 и последующие (США), Kwasan Obs. Bull. начиная с 1927 г. (Япония); см. также B. Гут, Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **6**, № 4, 68—69, 1955.
См. также №№ 1, 11, 14, 19, 24, 47, 95, 142, 148, 154, 202, 241, 259, 277, 293, 315, 331, 353, 358, 365, 517.

К ГЛАВЕ 14

416. Астапович И. С., Об орбите Дельта-Акварид. АЦ № 113—114, 20—22, 1951.
417. Астапович И. С., Скорости метеоритов в атмосфере Земли, Труды Всес. конф. по изуч. стратосферы 1934 г., Л., 1935, стр. 505—522.
418. Бахарев А. М., Результаты обработки фотографий одного метеора, Цирк. САО, № 85—87, 2—4, 1950.
419. Васильев И. Е., Федынский В. В., Фотографический метод определения угловых скоростей метеоров, Мироведение **29**, № 3, 225—227, 1934.
420. Енип В., Ханина Л., Методика определения скоростей метеоров, Изв. ТФАН № 1, стр. 73—80, 1951.

421. Елисеева Л. Г., Квадрантиды в 1946 г., Изв. ТФАН № 1, 100, 1946.
422. Катасев Л. А., Фотографические методы метеорной астрономии, Гостехиздат, 1957, 180 стр.
423. Мальцев В. А., Об определении космических гелиоцентрических скоростей метеоров. Труды ТАО 4, № 2, 3—7, 1933.
424. Проскурина Е. М., Предварительный каталог метеорных радиантов по наблюдениям в Ашхабаде в 1944 г. Труды Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР 3, 1957 (продолжение [350]).
425. Родионов В. И., Суточное смещение радиантов малых потоков. Изв. АН Туркм. ССР, № 3, 96, 1956.
426. Садыков Я. Ф., Орбиты метеорных тел по фотографическим данным. Труды Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР 2, 122—133, 1956.
427. Станюкович К. П., Определение истинных скоростей и высот метеоров методом сравнения, Бюлл. КН ВАГО, № 24, 91—93, 1934.
428. Фесенков В. Г., О проникновении метеоров в атмосферу Земли, Труды ГРАО 1, 196—205, 1922.
429. Ceplecha Z., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии 2, 114, 1951.
430. Denning W. F., Obs. 38, 104—105, 1915; PA 22, 404—405, 1914; MN 45, 408, 1885.
431. Elkin W. F., Ap. J. 12, 4—7, 1900. Ср. Publ. AAS 1, 1910.
432. Fessenkoff B., Sčigolev B., AN 220, 227—240, 1924.
433. Fisher W. J., Harv. Circ. 331, 1928 и 375, 1932. Ср. Watson F., Proc. Am. Phil. Soc. 81, 473, 1939.
434. Guth V., Catalogue of meteor trails. Praha, 1954.
435. Hepperger J., Sitzb. Wien. Ak. IIa, 132, 1925; 135, 271—285, 1926.
436. Hoffmeister C., Veroff. Univ. Stw. Berl. u. Babelsberg 9, Hf. 1, 35, 1931. Ср. Astr. Abh., Erg. Hf. 4, 5, 39, 1922.
437. Lindemann F. A., Dobson G. M. B., MN 83, 163, 1923; Ср. H. H. Waters, Journ. BAA 46, 153, 1936.
438. Link F., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии 4, 52, 1953.
439. Link F., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии 5, 56, 1954.
440. Maltzev V. A., On the relation between the geocentric and heliocentric velocities and the heights of fireballs. MN 90, 5, 568—575, 1930. Ср. Plummer H. C., там же 76, 390, 1916.
441. Maltzev V. A., On the geocentric velocities of fireballs and periodic meteors. Бюлл. ТАО, № 3, 57—62, 1934.
442. McIntosh R. A., Journ. RAS Canada 37, 305—315, 1943.
443. McIntosh R. A., MN 96, 7, 707—708, 1936. См. [14], а также: Hardcastle J. A., Journ. BAA 21, 155, 1911.
444. McKinley D. W. R., AJ 54, 179, 1949.
445. Nielsen A., Medd. ole Römer Obs. № 17, 217—228, 1943 и № 19, 245—251, 1947.
446. Niessl G., Sitzb. Wien. Ak. 83, II, 96, 1880.
447. Niessl G., Erg. d. math. Wiss. VI, 2, Hf. 3, 451, 1907.
448. Öpik E. J., Publ. Obs. astr. Tartu 30, № 5, 86, 1938. Ср. [247, 419].
449. Plavec M., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии 4, 87, 1953.
450. Whipple F. L., AJ 55, № 1, 158, 1946; 59, № 5, 202—217, 1954.
451. Wylie C. C., PA 48, 306, 1940. Также Univ. Iowa Obs. Contr. № 1, 253, 1937.

См. также №№ 11, 24, 90, 95, 148, 163, 173, 185, 187, 193. 232, 259, 265, 274, 277, 279, 290, 291, 302, 318, 319, 351, 353, 358, 361, 365, 369, 406.

К ГЛАВЕ 15

452. Астапович И. С., Максимум Скорпионид 22 июня 1949 г., АЦ № 89, 3—4, 1949.
453. Астапович И. С., Необычайный максимум метеорного потока Квадрантид в 1943 г., АЦ № 30, 2—3, 1944.

454. Астапович И. С., О геоцентрической скорости Дельта-Акварид, Изв. ТФАН № 2, 94—95, 1951. Ср. № 422.
455. Астапович И. С., О некоторых закономерностях в системах малых тел, Труды САО 4, 78—105, 1954.
456. Астапович И. С., Орбита метеорного потока Дзета-Драконид, Изв. АН Туркм. ССР, № 4, 95, 1956.
457. Астапович И. С., О результатах изучения орбит 66 метеоритов, АЖ 16, № 6, 15—42, 1939.
458. Зигель Ф. Ю., О распределении орбит потоков метеорных тел в солнечной системе, Бюлл. ВАГО № 4, 11—14, 1939.
459. Катасев Л. А., Некоторые закономерности в кометах, метеорах и астероидах, Бюлл. САО, № 14, 5—11, 1955.
460. Крамер Е. Н., О вычислении наибольшего сближения орбит Земли и кометы, Изв. ТФАН № 3, 95—96, 1950.
461. Ловелл Б., Метеорная астрономия, Физматгиз, 1958.
462. Орлов А. Я., Орлов Б. А., Курс теоретической астрономии, Гостехиздат, 1940, 198 стр.
463. Millman P. M., Journ. RAS Canada 47, 237—246, 1953.
464. Newton H. A., Am. J. Sci. (2), 39, 370, 1865.
465. Newton H. A., Am. J. Sci (1), 36, 1, 1888.
466. Pickering W. H., PA 17, 273, 1909 и 18, 262, 1910.
467. Porter J. G., Comets and meteor streams. London, 1952, 122 + VIII стр. (стр. 81—118).
468. Porter J. G., MN 104, 257, 1944.

См. также №№ 12, 24, 29 (стр. 101), 50, 291, 308, 312, 318, 340, 345, 346, 354, 361, 366, 367, 369, 370, 416, 421, 424, 426, 449.

К ГЛАВЕ 16

469. Александрова А. А., Исследование кривых изменения яркости метеоров, Изв. ТФАН № 6, 92—93, 1950.
470. Аставин-Разумин Д. Л., Определение интенсивности свечения метеоров фотометрическим методом, Бюлл. ВАГО № 9 (16), 3—6, 1950.
471. Аставин-Разумин Д. Л., Ослабление фотографического изображения метеора в зависимости от его угловой скорости, Бюлл. ВАГО № 10 (17), 42—44, 1951.
472. Астапович И. С., Абсолютная яркость болидов и метеоров, Бюлл. КН ВАГО № 16, 33—35, 1932.
472а. Левин Б. Ю., Маева С. В., Бюлл. Комиссии по кометам и метеорам Астросовета АН СССР, № 1, 29—31, 1957.
473. Мальцев В. А., Nature 132, 137, 1933.
474. Сикора И. И., Труды ТАО 6, 140, 1910.
475. Сытинская Н. Н., Изменение блеска метеора на протяжении пути, Уч. зап. ЛГУ № 31 (астрономия, вып. 5), 101—105, 1939.
476. Штауде Н. М., Труды 1 Съезда РОЛМ, Пг., 1922, стр. 132.
477. Fisher W. J., Harv. Bull. 849, 4—8, 1927.
478. Hawkins G. S., Journ. BAA 59, 8, 245—248, 1949.
479. Hoffleit D., Sky and Tel. 4, № 12, 5, 1945.
480. McIntosh R. A., Tr. R. Soc. of N.-Zeal. 72, ч. 4, 301—310, 1943.
481. Olmsted M., Harv. Bull. 888, 1931; см. Millman P. M., Wheelwright G. W., там же 872, 1930 и 885, 1931.
482. Williams J. D., Ap. J. 92, 424—433, 1940.
483. Williams J. Z., Proc. Cambr. Phil. Soc. 22, 700, 1925.

См. также №№ 24, 95, 142, 143, 159, 160, 182, 247, 263, 271, 276, 302, 406, 515, 516, 522.

К ГЛАВЕ 17

484. Аставин-Разумин Д. Л., Два метеорных спектра Персеид 1953 г., Бюлл. ВАГО № 19 (26), 36—39, 1956.
485. Астапович И. С., Современные успехи в изучении спектров метеоров, Природа **25**, № 1, 8—12, 1936.
486. Астапович И. С., Спектры метеоров, Мироведение, 24, № 5, 337—349, 1935.
487. Астапович И. С., Спектры метеоров СССР. Изв. АН Туркм. ССР, № 5, 95—96, 1955. Первое дополнение там же № 1, 100, 1956.
488. Бахарев А. М., Спектр метеора потока Персеид 10 августа 1950 г. Бюлл. САО, № 2, 3—9, 1952. См. его же: Труды САО **3**, № 1, 73, 1950.
489. Блажко С. Н., О спектре метеора, Труды II, III и IV астрономических съездов РСФСР, Л., 1930, стр. 157.
490. Бумба В., Вальничек Б., Спектр метеоров потока Персеид 1953. Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **6**, № 5, 108—111, 1955.
491. Ильясов У., Наблюдения спектров телеметеоров. Изв. АН Туркм. ССР, № 2, 95—96, 1955.
492. Blajko S. N., On the spectra of two meteors. Ap. J. 26, 341—348, 1907.
493. Cook A. F., Millman P. M., Ap. J. **121**, 1, 250—270, 1955.
494. Herschel A. S., BSAF **15**, 85—86, 1901.
495. Hnatek A., Enz. d. math. Wiss. VI, 28, 3, 1930 (см. стр. 687—691).
496. Horn d'Arturo G., Bologna Oss. Publ., **15**, 1934.
497. Konkoly N., Spectres des 140 étoiles filantes. Budapest, 1877.
498. Millman P. M., Dom. Obs. Ottawa Repr., № 45, 1950, см. [502].
499. Millman P. M., Allan A. F., Dom. Obs. Ottawa Contr. **2**, № 16, 1955, Ap. J. **121**, № 1, 1955.
500. Millman P. M., Harv. Ann. **82**, № 6, 113—146, 1932; № 7, 149—177, 1935.
501. Millman P. M., Journ. RAS Canada **46**, 121, 1952; **47**, 217, 1953; AJ **56**, 45, 1951; Sky a. Tel. **15**, 445, 1956.
502. Millman P. M., Nature **165**, 1013, 1950.
503. Russell J. B., Contr. Am. Meteoritic Soc. **4**, 250, 1950.
504. Russel D., PA **40**, № 1, 28—32, 1951.
505. Schalén S., Wernberg G., Ark. Fys. Astr. **55 A**, Nr. 27, 1937.
506. Schwassman A., A. N. **233**, № 5577, 71—74, 1928.
507. Vyssotsky A. N., Ap. J. **91**, 2, 264—266, 1940.
508. Allen W. A., White W. C., Rinehart J., J. Appl. Phys. **23**, I, 132—137, II, 138—207, III, 207—232, 1952.
509. Wood R. W., Phys. Rev. **71**, 471 A, 1947.

См. также №№ 85, 168, 261, 265, 302.

К ГЛАВЕ 18

510. Абрамов Н. А., Описание Березовского края, Зап. Русск. геогр. о-ва I, 442, 1857.
511. Астапович И. С., Исследование условий движения метеорита Хмелевка, Метеоритика 9, 32—63, 1951.
512. Астапович И. С., Исследование условий движения Чулак-Курганского звукового болида 1929 января 25. Изв. ТФАН № 2, 71, 1950.
513. Астапович И. С., К вопросу об ощущении лучистой теплоты болидов, Природа **27**, № 3, 109, 1938 (дополнение [178]).
514. Астапович И. С., Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири. АЖ **10**, № 4, 465—486, 1933.
515. Астапович И. С., Траектория и орбита сверхъяркого болида 1943, авг. 20 над Центральной пустыней Каракумов. АЦ № 35, 6, 1944.

516. Бахарев А. М., Фотометрическое исследование фотографии метеора 19 сентября 1939 года. Цирк. САО, № 79—80, 1—5, 1950.
517. Бахарев А. М., Односторонние статистические высоты и цвет телеметеоров, АЦ № 98—99, 13—14, 1950.
518. Богданова В., Суточная вариация цвета метеоров, Изв. АН Туркм. ССР, № 2, 92—93, 1951.
519. Глобус М. И., Осветительные артиллерийские снаряды, М., 1934.
520. Гульмедов Х. Д., Суточная вариация цвета метеоров, АЦ № 121, 5—6, 1951.
521. Драверт П. Л., К истории Тарского болида 1/III 1929 г., Изв. Зап.-Сиб. геогр. о-ва **7**, 1930.
522. Жиров Н. Ф., Свечение пиротехнического пламени, М.—Л., 1936, 146 стр.
523. Кулик Л. А., К вопросу о месте падения Тунгусского метеорита 1908 года. ДАН, А № 23, 399—407, 1927.
524. Мамонтов В. Н., Алтайский метеорит 1904 года, Труды Геол. муз. АН **3**, 4, 107, 127, 1910.
524а. Машбиц Б. М., Персеиды 1926 года, АЖ **9**, 1—2, 102—120, 1932; Бюлл. КН МОЛА, № 14, 1929.
525. Милованов В. Ф., Определение коэффициента корреляции между цветом и скоростью метеоров, Изв. ТФАН, № 1, 96, 1951.
526. Тихов Г. А., Главнейшие способы определения цвета звезд, Русск. астр. кал., Н.-Новгород, 1923 (приложение).
527. Федоров Н. Ф., Общее цветоведение, М., 1939, 228 стр., 2-е изд.
528. Флери П., Цвета и их измерения (колориметрия), М.—Л., 1932, 36 стр.
529. Фриш С. Э., Свечение смесей паров и газов, Уч. Зап. ЛГУ, № 17, 133—148, 1937.
530. Шайн Г. А., О зависимости между цветом метеоров и их яркостью, Изв. РАО **19**, № 1, 21—22, 1913.
531. Язлиев С., Азимут движения метеоров разного цвета, Изв. АН Туркм. ССР, № 3, 96, 1952.
532. Bouma P. J., Physical aspects of coloure. Endhoven, 1947, 312 стр.
533. Hoffleit D., Sky and Tel. **10**, 4, 93—94, 1951.
534. Jacchia L. G., AJ **62**, 10, 360—362, 1957. Ср. Plavec M., Říše hvězd **33**, № 2, 40, 1952.
535. Poey A., CR **43**, 1129, 1202, 1856; **44**, 28, 1857; **51**, 1089, 1860.
536. Wegener A., Nova Acta Acad. Leop., Halle, 1918, **104**, 1—34, лит-ра 58 назв.
537. Wichello H., Journ. BAA **51**, 33, 1940.
538. Wrede, Gilb. Ann. d. Phys. **18**, 431, 1804.

См. также №№ 71, 85, 161, 163, 171, 173, 178, 193, 237, 318, 413, 501.

К ГЛАВЕ 19

539. Астапович И. С., Отношение продольных размеров метеора к поперечным, АЖ **12**, 3, 256—259, 1935.
540. Любарский К. А., Исследование обстоятельств падения каменного метеоритного дождя Венгерово, Метеоритика **13**, 92—103, 1955.
541. Федынский В. В., Болид с ярким следом 24 сентября 1948 г., Метеоритика **12**, 14—28, 1955.
542. Штауде Н. М., Изв. РАО **22**, 1916.
543. Haidinger W., Sitzb. Wien. Ak. (II) **43**, 389—426, 1861; **49**, 5, 1864; **58**, 467—515, 1868.
544. Smith Lawrence, Am. J. Sci. (2), 19, 1885.
545. Oepik E., Publ. Obs. Tartu **25**, 1, 1—56, 1922; **25**, 4, 1—70, 1923.

См. также №№ 11, 104, 173, 472, 511.

К ГЛАВЕ 20

546. Кротов П. А., Приложение к заседанию О-ва естествоисп. Казанского ун-та, № 94, 1887.
547. Крылов А. Н., О вращении продолговатого снаряда, Собр. трудов, 4, 1937 (имеется отдельное издание, Л., 1933).
548. Толстопятов М., Аэролиты, Русский Вестник **45**, 651, 1863.
549. Koog J. M., Ugtenbogoort J. W., Ballistics of the future. Haarlem, 1946, 472 стр.
См. также №№ 5, 11, 113, 160, 163, 254, 370, 605.

К ГЛАВЕ 21

550. Агаджанова А. С., О неслучайном распределении падений метеоров потока Персеид, Изв. ТФАН СССР, № 1, 95, 1951.
551. Аленич А. А., Изв. РАО **19**, 6, 182, 1913; **22**, 1, 1916.
552. Астапович И. С., Метеоритика **7**, 134, 1950.
553. Астапович И. С., Некоторые вопросы происхождения метеорной материи, АЖ **18**, № 1, 58—72, 1941.
554. Астапович И. С., Неожиданный звездный поток 21/VI 1937 г., Природа **29**, № 7, 105, 1940.
555. Астапович И. С., Новейшие успехи в изучении метеоров, Природа **30**, № 4, 7—27, 1941.
556. Астапович И. С., Одновременное появление четырех метеоров, Мироведение **18**, 340, 1929.
557. Астапович И. С., О предельной скорости, при которой возможно падение метеорита на Землю, Изв. ТФАН, № 3, 93—94, 1949.
558. Астапович И. С., Телескопическое наблюдение метеора минус первой величины, Бюлл. КН ВАГО, № 43, 228—229, 1937.
559. Возарова М., Кресак Л., К строению метеорного потока Персеид, Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **4**, № 6, 128—139, 1953.
560. Изв. РОЛМ № 2 (53), 1926.
561. Кринов Е. Л., Морфологическое изучение каменных метеоритов последних падений, Метеоритика **12**, 29—53, 1955.
562. Кринов Е. Л., Некоторые закономерности падений каменных метеоритов, ДАН СССР **90**, № 6, 979—982, 1953.
563. Левин Б. Ю., Некоторые вопросы движения метеорных тел в атмосфере Земли, Метеоритика **7**, 113—123, 1950.
564. Саврухин А. П., Клочковатость строения метеорного потока Персеид по наблюдениям 1951 г. на базисе 3780 *км*, АЦ № 121, 9—11, 1951.
565. Субботин А. Ф., Счет метеоров 13 августа 1928 г., Мироведение **18**, № 1, 53—54, 1929.
566. Радзиевский В. В., К вопросу о распаде метеорных «близнецов», АЖ **31**, № 5, 433—435, 1954. См. также АЖ **28**, 363—372, 1951.
567. Тейфель В. Г., О метеорных «роях», АЦ № 138, 10—11, 1953.
568. Цераский В. К., РАК **8**, 1902, Н.-Новгород (приложение, стр. 40—44).
569. Шайн Г. А., Вычисление радианта Персеид, Изв. РАО **16**, 5, 197, 1910.
570. Ястребцев В. В., Мироведение **1**, № 2, 23, 1912.
571. Butler, Astr. Rund. **2**, 287, 1900; Изв. РАО **8**, 7—9, 1901.
572. Ceplecha Z., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **4**, 5, 113—119, 1953.
573. Hoffleit D., Harv. Circ., 420, 1937.
574. Hoffleit D., Harv. Bull. 901, 3—7, 1935.
575. Jacchia L. G., Harv. Repr. (II) 31, 1949; 405, 1954.
576. Jacchia L. G., Sky and Tel. **14**, № 10, 412—414, 1955; ср. [302].
577. Jacchia L. G., Ap. J. **121**, №. 2, 521—527, 1955.
578. McCrosky R. E., AJ **60**, № 5, 170, 1955.
579. Mohammed Khan R. A., Hyderabad Acad. Studies. № 2, p. 13, 1940.

580. Oepik E., Les particules solides dans les astres. Liège, 1955, p. 125—146.
581. Plavec M., CR **231**, 7, 434, 1950 и **231**, 8, 469, 1950.
582. Plavec M., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **4**, № 3, 60—67, 1953.
583. Prior G. T., Hey M. H., Catalogue of meteorites. London, 1953, 432 стр.
584. Svoboda J., AN **204**, 339—342, 1917.
585. Smith H. J., Ap. J. **119**, 438—442, 1954.
586. Whipple F. L., Mém. Soc. scient. Liège **13**, 1—2, 321—328, 1953.
587. Whipple F. L., AJ **57**, № 1, 28—29, 1952.
См. также №№ 158, 161, 163, 174, 417.

К ГЛАВЕ 22

588. Астапович И. С., Новый метод определения величины торможения метеоров в атмосфере Земли, АЖ **12**, 1, 101—105, 1935.
589. Астапович И. С., О болиде 4 августа 1928 г., Мироведение **18**, 201, 1929.
590. Астапович И. С., Об определении истинной скорости болидов в атмосфере, Мироведение **19**, 1, 58—59, 1930.
591. Астапович И. С., Попытка определения торможения метеоров в стратосфере Земли по визуальным наблюдениям, Изв. ТФАН, № 3—4, 170—174, 1946.
592. Елисеева Л. Г., Распределение метеоров с торможением по продолжительности и цвету, Изв. ТФАН № 3—4, 192—193, 1946.
593. Уиппл Ф., Яккия Л., Копал З., Сезонные изменения плотности в верхних слоях атмосферы. Сб. Атмосферы Земли и планет, под ред. Д. П. Койпера, ИЛ, 1951 (гл. 5, стр. 169—180).
594. Фесенков В. Г., К вопросу о микрометеоритах, Метеоритика **12**, 3—14, 1955.
595. Фесенков В. Г., О движении Сихотэ-Алинского метеорита в атмосфере, Метеоритика **9**, 3—26, 1951; поправка там же **12**, 72—75, 1955.
596. Хотинок Р. Л., Обработка односторонней фотографии метеора 1948 августа 11, Изв. АН Туркм. ССР, № 4, 74—77, 1952.
597. Ceplecha Z., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **5**, № 3, 60—63, 1954.
598. Ceplecha Z., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **4**, 3, 55—60, 1953.
599. McKinley D. W. R., J. Appl. Phys. **22**, 202—213, 1951.
600. Niessl G., Smiths. Misc. Coll. **66**, № 16, 1917.
601. Niessl G., Sitzb. Wien. Ak. IIa **114**, 1477—1519, 1905; **121**, 1823, 1912.
602. Thomas R. N., Harv. Repr. II, 34 (Techn. Rep. № 5, 1950).
603. Wegener A., Naturwiss. **15**, 286—288, 1927.
604. Whipple F. L., Proc. Nat. Ac. Sci **36**, № 12, 687—695, 1950; **37**, № 1, 19—29, 1951.
См. также №№ 24, 84, 95, 163, 193, 259, 277, 279, 417, 420, 422, 428, 432, 508, 515, 683.

К ГЛАВЕ 23

I. Внешняя баллистика

605. Венцель Д. А., Окунев Б. Н., Шапиро Я. М., Внешняя баллистика, т. 1—2, Л., 1933—1934.
606. Крылов А. Н., Вычисление траектории снаряда. В соч. «Лекции о приближенных вычислениях», гл. VII, № 101—106, стр. 315—339. Изд. 5-е, М.— Л., 1950, 400 стр.
607. Морозов Н. А., Законы сопротивления упругой среды движущимся телам, СПб., 1908, 64 стр.
608. Окунев Б. Н., Основы баллистики, 1, вып. 1—2, М., 1943.

609. Окунев Б. Н., Вращательное движение артиллерийского снаряда, М.— Л., 1943.
610. Оппоков Г. В., Внешняя баллистика, М., 1940.
611. Tsien H. S., J. Aerod. Sci. **13**, 653, 1946.

II. Аэродинамика, газовая динамика. Учет трения и сжатия

612. Абрамович Г. Н., Прикладная газовая динамика, М.— Л., 1951, 512 стр.
613. Гольдштейн С., ред. Современное состояние гидродинамики вязкой жидкости, т. 1—2, М.— Л., 1948, 378 и 407 стр.
614. Жуковский Н. Е., Полное собр. соч., т. 2—4, М.—Л., 1935—1937.
615. Ньютон И., Математические начала натуральной философии. Собр. трудов акад. А. Н. Крылова, 7, М.— Л., 1936.
616. Седов Л. И., Газовая динамика, БСЭ, **10**, 28—37, 1952.
617. Станюкович К. П., Теория неустановившихся течений газа, изд. Бюро новой техники, 1948.
618. Станюкович К. П., Неустановившиеся движения сплошной среды, Гостехиздат, 1955.
619. Уханов Н. С., Задачник по экспериментальной аэродинамике, М.— Л., 1938, 158 стр.
620. Чаплыгин С. А., О газовых струях, Собр. соч., т. 2. М.— Л., 1948.
621. Юрьев Б. Н., Аэродинамика, БСЭ **3**, 593—600, М., 1950.

III. Ударные волны

622. Добровольский О. В., Взрывная волна, связанная с движением метеорного тела. Бюлл. САО, № 5, 11—16, 1953.
623. Зельдович Я. Б., Теория ударных волн и введение в газовую динамику, Изд. АН СССР, 1946, 186 стр., лит-ра 128 назв.
624. Ландау Л. Д., Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения. Прикл. матем. и мех. **9**, 4, 286—292, 1945.
625. Ландау Л. Д., Станюкович К. П., ДАН СССР **47**, № 4, 1945.
626. Покровский Г. И., Направленное действие взрыва. Воениздат, 1942.
627. Hugoniot H., J. Ec. Polytechn. **57**, 1887; **58**, 1889.
628. Mach E. и др., Sitzb. Wien. Ak. **72**, 1875; **75**, 1877; **77**, 1878.
629. Michel Levy, Muraour H., CR **198**, 825, 1499, 1766, 2091 и др., 1934.

IV. Сверхзвуковые скорости

630. Беккер Д., Новые результаты по исследованию больших сверхзвуковых скоростей и неустановившихся течений газа в лаборатории в Ленгли. Сб. «Механика», вып. 1 (5), 50—63, ИЛ, 1951 (в заглавии ошибка: лаборатория не «в Ленгли», а «имени Ланглея»).
631. Гейнеман М., К теории лобового сопротивления в сильно разреженных газах. Сб. «Механика», вып. 2 (6), 28—37, 1951.
632. Гримминггер Г., Виллиамс Е., Джинг Г., Подъемная сила наклонных тел вращения при очень больших числах Маха. Сб. «Механика», вып. 5 (9), 15—39, 1951.
633. Зегер Р., Исследования в области аэрофизики. Сб. «Вопросы ракетной техники», вып. 3 (9), 3—8, 1952.
634. Карман Т., Сверхзвуковая аэродинамика (принципы и приложения). ИЛ, 1948, 100 стр.
635. Левинсон Я. И., Аэродинамика больших скоростей (газовая динамика), М., 1948, 336 стр.
636. Липман Г. В., Панет А. Е., Введение в аэродинамику сжимаемой жидкости, ИЛ, 1949, 332 стр.

637. Швейкерт Г., К теории давления газа на движущуюся стенку. Сб. «Механика», вып. 4, ИЛ, 1950, 77—91.
638. Эпштейн П., О сопротивлении сфер при движении в газах. Сб. «Газовая динамика», ИЛ, 1950. Там же см. Ш. Тзян, Аэродинамика разреженных газов.

V. Механика тел переменной массы

639. Гинзбург И. П., Об уравнениях движения твердого тела переменной массы. Уч. зап. ЛГУ, № 114, 205—216, 1949.
640. Катасев Л. А., О применении уравнения Мещерского в теории движения метеорного тела в атмосфере. Бюлл. САО, № 1, 27—31, 1952.
641. Космодемьянский А. А., Механика тел переменной массы. Изд. ВВА им. Жуковского, 1947.
642. Космодемьянский А. А., Общие теоремы механики тел переменной массы. Труды ВВА им. Жуковского, вып. 184, 1946.
643. Мещерский И. В., Задача из динамики переменных масс. Пг., 1918.
644. Мещерский И. В., Работы по механике тел переменной массы, М., Гостехиздат, 1949, стр. 258—270.

VI. Аэродинамическое нагревание. Теплопередача

645. Вопросы ракетной техники **4**, 1954; **5**, 1955; **6**, 1956; **7**, 1957; **8**, 1958.
646. Калихман Л. Е., Сопротивление и теплоотдача плоской пластинки в потоке газа при больших скоростях. Прикл. матем. и мех. **9**, 3, 245—256, 1945.
647. Кондратюк Ю. В., Завоевание межпланетных пространств. Оборонгиз, 2-е изд., 1947, 82 стр. (см. стр. 60—62).
648. Седов Л. И., Трение и теплообмен в газе. В статье «Газовая динамика», БСЭ, 2-е изд., **10**, 36—37, 1952.
649. Allen H. J., Look B. C., NACA W — 7, 1946.
650. Birkhoff и др., J. Appl. Phys. **19**, 563, 1948.
651. Emmons H. W., Brainerd J. G., J. Appl. Mech. 1941, Sept., стр. 105—110.
652. Hicks B. C., NACA E — 88, 1946.
653. Manildi J. F., Sixth Int. Congr. Appl. Mech., 1946, Paris.
654. Taylor G. J., Pr. Phys. Soc. London **201**, 178, 1950.
655. Rinehart J. S., Rev. Sci. Instr. **21**, 339, 1950.
656. Wood G. P., Techn. Notes NACA, № 1114, янв. 1947. Ср. Nature **180**, 1168, 1957.
См. также № 508.

К ГЛАВЕ 24

657. Астапович И. С., Дрейф метеорных следов и внешняя составляющая солнечно-суточной геомагнитной вариации, Докл. НИИЗМ № 1, 1947.
658. Астапович И. С., О движении болидов в атмосфере, АБ РОЛМ № 25, 4, 1929.
659. Астапович И. С., Температура упавших метеоритов, Мироведение **24**, 1, 87—88, 1935.
660. Левин Б. Ю., Элементы физической теории метеоров, АЖ **17**, 3, 12—41, 1940; **18**, 4—5, 331—342, 1941; ср. ДАН СССР 25, № 5, 372 — 375, 1939.
661. Оболенский Н. В., Физическая теория метеоров Линдемана и Добсона, Метеорол. вестн. № 8, 1927.
662. Северный А. Б., Абсолютная яркость метеоров и верхние слои атмосферы, Труды Всес. конф. по изуч. стратосф. 1934 г., 489—496, 1935. Ср. его же: АЖ **11**, 2, 132—139, 1934.

663. Станюкович К. П., Относительное давление верхних слоев атмосферы по наблюдениям метеоров, Бюлл. КН ВАГО № 32, 155—157, 1935.
664. Фесенков В. Г., Захват метеоров атмосферой Земли, Труды ГРАО **1**, 143—176, 1922.
665. Штауде Н. М., Ветчинкин В. П., Попытка определения физических условий при полете и свечении метеоров, Изв. РОЛМ **16**, № 2 (57), 26—27, 1927.
666. Burgatti P., Rend. Acc. dei Lincei **5**, 614, 1927.
667. Cook M. A., Thomas R. N., AJ **55**, 167, 1950.
668. Cook M. A., Eyring H., Thomas R. N., Ap. J. **113**, 1951, 435—481.
669. Davidson R. M., Journ. BAA **23**, 321—325 и 393—395, 1913.
670. Fisher W. J., Proc. Nat. Ac. Sci. **19**, № 3, 1933; Harv. Circ. 385, 1934.
671. Gaede W., Ann. d. Phys. **41**, 378, 1913.
672. Herlofson N., Ark. f. Fys. **3**, № 1/3, 247—297, 1951.
673. Hoffmeister C., AN **221**, 353, 1924. См. C. E. Stromeyer, Journ. BAA **36**, 245—247, 1926.
674. Hoppe J., AN **262**, 169—198, 1937; **264**, 233, 1937; **266**, 342, 1938; **283**, 95—108, 1956; **234**, 31—32, 1957; Mitt. Un. Sternw. Jena № 22, 1956; № 23, 1956; № 30, 1957; № 37, 1957.
675. Hoppe J., Jena Univ. Wiss. Zts. **3**, 503—517, 1953/1954.
676. Jacchia L. J. и др., Harv. Repr. II—26, II—31 и II—32, 1949; 405, 1954.
677. Lindemann F. A., Dobson G. M. B., Proc. Roy. Met. Soc. **102**, 411—437, 1922; **103**, 339—342, 1923; Nature **118**, 195, 1926. См. Radakowič, Met. Zts. **43**, 12, 441, 1926; реферат. [661].
678. Maris H. B., Nature **120**, 839 и 954, 1927.
679. Niessl G., Sitzb. Wien. Ak. **99**, IIa, 27, 1890.
680. Oepik E., Acta et Comment. Univ. Tartu (Dorpat) A **26**, 2, 1—33, 1933; Publ. astr. obs. Tartu **28**, № 6, 1936; **29**, № 5, 69, 1937. Am. J. Phys. **26**, 70, 1958.
681. Popoff K., Probleme der Astronomie, Seeliger-Festschr., 169—175, Berlin, 1924. Ср. его же: Mathematik u. ihre Anwend. in Monogr. u. Lehrbüchern, Bd. II, 214, Leipzig, 1932.
682. Schwarzbach H., AN **245**, 355, 1931.
683. Schwinner R., Die Erde als Himmelkörper. Lehrb. d. phys. Geol. Bd. I, 1936, 356 стр. (см. стр. 122—129).
684. Sparrow C. M. B., Ap. J. **63**, 90—110, 1926; Radakowič, Met. Zts. **44**, 326, 1927.
685. Thomas R. N., Whipple F. L., Ap. J. **113**, 1951. Harv. Repr. 355, 1951.
686. Wegener A., Schr. d. Ges. zu Beförd. d. ges. Nat. zu Marburg, 14, 1, 44, 1917.
687. Wegener A., Sitz. d. Ges. zu Beford. d. ges. Nat. zu Marburg **2**, 4—7, 1919.
688. Whipple F. L., Harv. Repr. **152**, 1938. PASP **67**, № 399, 1955.
См. также №№ 11, 24, 29, 41, 95, 108, 163, 167, 168, 171, 279, 417, 428, 543, 545, 555, 602, 640, 695, 714, 815, 824.

К ГЛАВЕ 25

689. Сытинская Н. Н., Фотометрическое определение масс метеоров, Уч. зап. ЛГУ, № 53, 38—58, 1939. См. также Природа **29**, № 4, 62—66, 1940.
690. Fabry Ch., Ap. J. **30**, 318 и 400, 1909; BSAF **43**, 362, 1929.
691. Glaisher J., Am. J. Sci. (2) **38**, 434, 1864.
692. Harkness, Am. J. Sci. (2) **45**, 134, 237, 1867.
693. Herschel A., Proc. Br. Met. Soc. **2**, 16, 1865; Proc. Roy. Inst. Lond. **5**, 164, 1869.
694. Jacchia L. G., Harv. Obs. Techn. Repr., № 10, 1952.

695. Maris H. B., Terr. Magn. **33**, 233, 1929; **34**, 309, 1930.
696. Oepik E., Harv. Repr. 100, 1933; Armagh obs. Leafl. № 30, 35, 1955.
697. Pickering W., Ap. J. **29**, 365, 1909 и **31**, 88—89, 1910; AJ **33**, 88, 1910; Harv. Ann. 141, 1909.
698. Sands F., Wash. Obs. 1867, 19—30, 1867.
699. Wylie C. C., PA **42**, 469—471, 1934.
700. Young C. A., General Astronomy, 1888.
См. также №№ 24, 41, 113, 237, 271, 279, 545, 640, 677.

К ГЛАВЕ 26

701. Морган М., Ионосферное распространение ультракоротких волн. Вопросы радиолокационной техники, 6 (18), 160—165, 1953.
702. Святский Д. О., Леониды в 1832 г., Мироведение **11**, № 2, 134, 1922.
703. Appleton E. V., Naismith R., Proc. Phys. Soc. **59**, 461—473, 1947.
704. Bailey A., Thomson H., Bell System Techn. J. № 4, 1935.
705. Bhar J. N., Nature **139**, 470, 1937.
706. Billam E. B., Browne J. C., в сб. [302], стр. 73—77.
707. Burckard O., Terr. Magn. Atm. El. **53**, 63—65, 1948.
708. Eckersley T. L., J. Inst. El. Eng. **71**, 406, 1932; **86**, 548, 1940; Nature **140**, 846, 1937. Ср. Appleton E., Naismith R., Ingram L., Phil. Trans (A) **236**, 191, 1937; Appleton E., Piddington J. Proc. R. S. (A) **164**, 467, 1938.
709. Eckersley T. L., Nature **162**, 24—25, 1948.
710. Eshleman K. R., Manning L. A., PIRE **42**, № 3, 530—536, 1954.
711. Gautier T. N., PIRE **40**, № 1, 110, 1952.
712. Greenhow J. S., Proc. Phys. Soc. (B), 3, **65**, 169—181, 1952.
713. Hantsfield W. L., J. Geoph. Res. **60**, № 1, 53—56, 1955.
714. Herlofson N., Phys. Soc. Rep. Progr. Phys. **11**, 444, 1948.
715. Hey J. S., Nature **160**, 74—76, 1947.
716. Yokoyama E., Proc. Imp. Ac. Tokyo **6**, № 4, 154—157, 1930.
717. Kaiser T. R., Closs R. L., Phil. Mag. **52**, 1, 43, № 336, 1—32.
718. Lovell A. C. B., Nature **160**, 76—78, 1947.
719. Lovell A. C. B., Sci. Progr. **38**, 22, 1950.
720. Manning A., van Valkenberg M., PIRE **40**, № 1, 110, 1952.
721. Millman P. M., Journ. RAS Canada, № 6, 1949.
722. Mitra S. K., Syam J., Ghose B. N., Nature **133**, 533—534, 1934.
723. Nagaoka M., Proc. Imp. Ac. Tokyo **56**, 223—236, 1929.
724. Pickard G. W., PIRE **19**, 1160—1170, 1931.
725. Pierce J. A., Phys. Rev. (2), **59**, № 8, 625—626, 1941; PIRE **26**, 892, 1938.
726. Pineo V. C., PIRE **40**, № 1, 110, 1952.
727. Schafer J. P., Goodall W. M., PIRE **20**, № 7, 1131—1148, 1932.
728. Skellett A. M., Phys. Rev. (2), **37**, № 12, 1668, 1931; см. Publ. AAS **7**, № 4, 101, 1932.
729. Skellett A. M., PIRE **23**, 2, 132—149, 1935; **20**, 1933—1940, 1932.
730. Villard O. G., Peterson A. M., Manning L. A., Eshleman V. R., — Conv. Rec. Inst. Rad. Eng., ч. 2, 94—98, 1953; PIRE **43**, № 10, 1473—1481, 1955.
731. Whipple F. L., Ap. J. **121**, 1, № 241—249, 1955.
См. также №№ 90, 162, 163, 170, 174, 282, 283, 284, 285, 288, 299, 301, 302, 314, 555.

К ГЛАВЕ 27

732. Астапович И. С., Некоторые проявления солнечной активности в метеорных явлениях, Бюлл. КИСО, № 5—6 (19—20), 71—73, 1950.
733. Астапович И. С., Федынский В. В., О газовых следах двух болидов 1937 г., августа 11/12, АЖ **17**, 5, 32—43, 1940.

734. Бахарев А. М., Метеорный след 11 августа 1942 г., Цирк. САО, № 53, 2—3, 1941. Ср. № 79—80, 1—50, 1950.
735. Врангель Ф. П. Путешествие по Сибири, СПб., 1841; его же, Phys. Beobachtungen, СПб., 1827.
736. Добровольский О. В., Диффузия метеорных следов, Бюлл. САО, № 1, 15—26, 1952.
737. Петров В. Н., Исследование движений в стратосфере по метеорным следам, Природа **29**, № 10, 51—53, 1940.
738. Сытинская Н. Н., Фотометр для измерения яркости метеорных следов, АЖ **16**, № 5, 51—53, 1939. (Об изготовлении светящейся шкалы см., напр., Левшин В. Л., Светящиеся составы, М.—Л., 1936, 134 стр.)
739. Федынский В. В., Ночные светящиеся метеорные следы. Труды Тадж. АО **2**, 3—46, 1941.
740. Федынский В. В., Сопоставление визуальных и радиолокационных определений дрейфа метеорных следов, АЦ № 155, 17—22, 1954.
741. Федынский В. В., Сопоставление визуальных и радиолокационных определений дрейфа метеорных следов, Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **7**, 3, 59—64, 1956.
742. Фесенков В. Г., Болид 11 октября 1948 г., Метеоритика **6**, 58—63, 1949.
743. Цесевич В. П., Ширина метеорных следов, Цирк. САО, № 5, 3, 1935.
744. Эсенов М., Длительность свечения метеорных следов в функции яркости метеора, Метеорный бюлл. № 3, 1952; Изв. АН Туркм. ССР, № 3, 95—96, 1952.
745. Bumba V., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **4**, № 6, 147—158, 1953.
746. Clegg J. A., Closs R. L., Pr. Phys. Soc. (B) **64**, 718—719, 1951.
747. Feinstein J., Geoph. Res. **56**, 37, 1951.
748. Hoffmeister C., AN **198**, № 4733, 83—86, 1914; Mohammed Khan R. A., PA **56**, № 9, 1948.
749. Olivier Ch. P., Pr. Am. Phil. Soc. **85**, 93—135, 1942; **91**, 315—327, 1947; **101**, 296—315, 1957.
750. Pierce J., Phys. Rev. **71**, 88—92, 1947.
751. Plavec M., Říše Hvězd **33**, № 2, 40, 1952. См. также обзор: Journ. RAS Canada **44**, 209—220, 1950; Nature **178**, 161, 1956; AJ **61**, 174, 1956; **62**, 98, 1958.
752. Trowbridge C. C., Ap. J. **26**, 95—116, 1907.
753. Trowbridge C. C., Pop. Sci. Month. **79**, 191—203, 1911; Obc. **31**, 402—407, 1908; Wash. Nat. Ac. Proc. **10**, 24—41, 1924; Month. Weath. Rev. **35**, № 9, 1907 и **44**, № 6, 1918; ср. Phys. Rev. **11**, 484, 1918.
754. Weil M., PA **30**, 524—535, 1922.
755. Whipple F. L., Journ. RAS, Canada **48**, № 3, 123, 1954; Vega, № 18—20, 79, 1954.
См. также №№ 112, 124, 155, 161, 163, 186, 302, 372, 376, 377, 684.

К ГЛАВЕ 28

756. Астапович И. С., Болид 20/VIII 1925 г., Изв. НИЛ **16**, 1—2, 189—200, 1930.
757. Астапович И. С., Звуковые явления, одновременные с полетом болидов, Метеоритика **9**, 71—101, 1951. Лит-ра 39 назв.
758. Астапович И. С., О двух электрофонных болидах в Туркменистане, Изв. ТФАН СССР 1, 95, 1949.
759. Бахарев А. М., Комплексные наблюдения метеоров потока Персеид на Сталинабадской астрономической обсерватории, АЦ № 105, 9—10, 1950.
760. Врангель Ф. П., Ann. d. Phys. u. d. Chem. **85** (9), 157, 1827; см. [735].
761. Драверт П. Л., Электрофонные болиды в Западной Сибири. Бюлл. ЦКМКА (машинописный), № 18, 1—2, 1940; № 12, 3, 1940; № 45, 3—4, 1944.

762. Калашников А. Г., Магнитный эффект метеоров, Изв. АН СССР, серия геоф., № 6, 7—20, 1952 (см. [179]).
763. Кринов Е. Л., Сихотэ-Алинский метеоритный дождь, М.—Л., 1948, 64 стр.
764. Погода, № 5, 17, 1940.
765. Прендель Р., Каменный дождь, Литер. прилож. «Нивы», сент. 1898, стр. 118—131.
766. Святский Д. О., Магнитные бури и северные сияния, Изв. РОЛМ **16**, 1 (56), 3—4, 1927; ср. там же **15**, 4 (55), 69—70, 1926.
767. Стекольников И. С., Физика молнии и грозозащита, М.—Л., 1943, 230 стр.
768. Турчинович Н. Т., К вопросу о звуках во время северных сияний, Мироведение **8**, № 1 (36), 62, 1919; см. там же **5**, № 1, 1916 и **6**, № 4, 1917.
769. Федынский В. В., Простейшие астрономические наблюдения, Мироведение **20**, 118, 1931.
770. Хлюстов Ю. Н., Влияние полета ярких метеоров на радиоприем, Бюлл. ВАГО № 10 (17), 37—38, 1951.
771. Шайн Г. А., Природа **10**, № 4—6, 77—78, 1921.
772. Beals C. S., Quart. Journ. R. Met. Soc. **59**, 71—78, 1933. Ср. его же Journ. RAS Canada **27**, 184—200, 1933; PASP **44**, 256—257, 1932.
773. Chant C. A., Journ. RAS Canada **17**, 273—284, 1923; **32**, 313—314, 1938.
774. Eve A. S., Suppl. to Nature **137**, № 3472, 1936.
775. Heywood G. S. P., Starbuck L., Met. Mag. **73**, 238 и 300—301, 1938.
776. Kolsky H., Nature **173**, 77, 1954.
777. Massena, Bull. Meteor. Oss. Coll. Romana **7**, 95, 1868.
778. Takakura T., Tokyo Obs. Repr. 132 = Publ. Astr. Soc. Jap. **7**, № 4, 1955.
779. Wortmell T. A., Phil. Tr. (A) **238**, 249—303, 1939.
См. также №№ 1, 2, 4, 5, 18, 22, 23, 36, 71, 82, 154, 162, 163, 170, 171, 172, 179, 514, 538, 555, 599, 735.

К ГЛАВЕ 29

780. Астапович И. С., Инструкция для наблюдений болидов, Бюлл. ВАГО № 5, 8—14, 1940.
781. Астапович И. С., Исследование траекторий некоторых метеоритов и болидов, Труды Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР, 2, 150—170, 1956, лит-ра 39 назв.
782. Астапович И. С., Метеорные методы исследования стратосферы, Уч. Зап. Саратовского ун-та **15**, вып. 3, астр.-физ., 82—99, 1940.
783. Астапович И. С., Пылевые следы болидов, Уч. Зап. Туркм. гос. ун-та **6**, 35—48, 1956; лит-ра 28 назв.
784. Ватолин Н., Пыль, М.—Л., 1935, 80 стр.
785. Вейцер Ю. И., Лучинский Г. П., Химия и физика маскирующих дымов, М.—Л., Оборонгиз, 1938, 320 стр.; имеется 2-е изд., 1947.
786. Дебабов Д. Г., Редкое зрелище — падение метеора, Огонек № 1, 12, 1944.
787. Джиббс, Аэрозоли, М., 1929.
788. Драверт П. Л., Воздушные страхи Тобольска в старину, «Сибирские Огни», Новосибирск, 1940.
789. Изв. РАО **7**, № 7—9, 12, Журнал общего собрания от 17/XII 1898 г., сообщение С. П. Глазенапа.
790. Козлов П. К., Изв. Русск. геогр. о-ва **43**, 215, 1907.
791. Кринов Е. Л., Инструкция по наблюдению падений, поискам и сбору метеоритов, Изд. АН СССР, 1950, 32 стр.

792. Любарский К. А., Статистическое изучение болидов, Метеоритика **11**, 153—164, 1954.
793. Падение метеорита в Приморской области, Изв. РОЛМ 5, № 6 (24) 297—298, 1916.
794. Полатбеков П. Ф., Исследование оптических свойств метеоритного вещества, Изв. АН Каз. ССР, сер. астр. и физ., вып. 3, 1948, стр. 42—51.
795. Русские богатыри. Былина. Обработка И. Карнауховой, М. — Л., 1949, 136 стр. (см. стр. 24, 28, 31 и 36).
796. Саврухин А. П., Исследование болида 1950 июня 23 и дрейфа его следа, Изв. АН Туркм. ССР, № 2, 69—73, 1951.
797. Терентьева А. К., Телескопические наблюдения метеоров в конусе зари, АЦ № 169, 16—17, 1956.
798. Уайлоу-Грей, Паттерсон, Дым. Исследование в области аэродисперсных систем, М. — Л., 1934, 172 стр. (гл. 13, 14).
799. Фесенков В. Г., Обстоятельства падения Сихотэ-Алинского метеорита, Изв. АН Каз. ССР, сер. астр. и физ., вып. 3, 1948, 3—11.
800. Фесенков В. Г., Помутнение атмосферы, произведенное падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г., Метеоритика **6**, 8—12, 1949.
801. Шифрин К. С., Рассеяние света в мутной среде, М. — Л., 1951, 228 стр., лит-ра 128 назв.
802. Buchner O., Quellenverzeichnis zur Litteratur der Meteoriten. Frankfurt a. M,. **1**, 1861 u **2**, 1863.
803. Einbu S., Skr. Norsk. Vet.-Ak., Oslo, Nr. 11, 1—23, 1941.
804. Fischer, Mém. Imp. Ac. Sc., СПб., **6**, 50.
805. Hulburt E. O., PASP **44**, 178, 1932.
806. Kahlke S., Ann. d. Hydrogr. **49**, 294—298, 1921.
807. Kulin G., Beob. Zirk. **21**, 73, 1939 (см. Saget J., BSAF **54**, 169—171, 1940, и Corlin A., PA **47**, 525, 1941).
808. Malsch W., Zts. angew. Meteor. **50**, 325, 1933.
809. Monning O. E., PA **48**, 93, 1940 (см. Journ. RAS Canada **38**, 256—257, 1944).
810. Nielsen A., Medd. Ole Rømer Obs. (Aarhus), № 23, 336, 1953.
811. Nininger H. H., Sky and Tel. **7**, 12, 293—295, 1948.
812. Silberschlag, Theorie der am 23. Julius 1762 erschienenem Feuerkugel, Magdeburg, Stendal u. Leipzig, 1764.
813. Union Obs. Circ. № 1, 1912.
814. Zanotti F. M., Comm. Bonon. II, ч. I, 464, 1745 (Bologna).
См. также №№ 5, 41, 47, 51, 68, 71, 82, 83, 270, 365, 372, 400, 402, 433, 434, 455, 541, 543, 745, 753, 754.

К ГЛАВЕ 30

815. Астапович И. С., Метеоритные кратеры на поверхности Земли, Мироведение **25**, 2, 92—104, 1936, лит-ра 20 назв.
816. Астапович И. С., О проникновении в почву обычных и кратерообразующих метеоритов, Изв. ТФАН СССР, № 1, 90—96, 1946.
817. Астапович И. С., Скорость падения метеоритов на земную поверхность, Изв. ТФАН СССР, № 5—6, 167—170, 1945.
818. Бахарев А. М., О предполагаемом падении метеорита на Восточном Памире, Метеоритика **11**, 183—191, 1954.
819. Внуков В., Физика и оборона страны, ч. 1, Гостехиздат, 1934.
820. Драверт П. Л., Метеоритные кратеры на земной поверхности, «Рабочий Путь» (Омск), № 226, 27/X 1933 г., стр. 3.
821. Кринов Е. Л., Итоги четырехлетних полевых работ по изучению падения и сбору Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя, Метеоритика **10**, 83—99, 1952.
822. Кринов Е. Л., Тунгусский метеорит, Изд. АН СССР, 1949.

823. Маиевский Н. В., Курс внешней баллистики, СПб., 1870.
824. Станюкович К. П., Элементы физической теории метеоров и кратерообразующих метеоритов, Метеоритика **7**, 39—62, 1950.
825. Станюкович К. П., Федынский В. В., О разрушительном действии метеоритных ударов, ДАН **57**, № 2, 129—132, 1947.
826. Шипулин Ф. К., Сихотэ-Алинский метеорит, Владивосток, Примиздат, 1947, 40 стр.
827. Baldwin R. B., The face of the Moon. Chicago, 1949 (App.), лит-ра 126 назв.
28. Karpoff R., Meteoritics **1**, 31—38, 1953.
29. Lunnon R. G., Phil. Mag. (6), № 277, p. 179, 1924.
30. Millman P. M., Publ. Obs. Ottawa **18**, № 4, 61—82, 1956.
31. Prior G. P., Hey M. H., Catalogue of meteorites, Lond., 1953, 432 + XXVIII pp.
832. Scorer R. S., Proc. RAS **201**, 152—156, 1950.
833. Spencer L. J., Min. Mag. **23**, 388, 1933.
834. Watson F., PA **44**, No 1, 1936 (= Harv. Repr. 113).
См. также №№ 23, 36, 82, 417, 605, 670.

К ГЛАВЕ 31

835. Астапович И. С., Видимые звуковые волны взрыва, Природа **38**, 1949.
836. Астапович И. С., О мощности звуковых детонаций Чулак-Курганского болида, Изв. ТФАН, № 2, 77—80, 1946.
837. Баклунд О. О., Природа **6**, 213—228, 1917.
838. Вознесенский А. В., Падение метеорита 30 июня 1908 г. в верховьях реки Хатанги, Мироведение **14**, 25—38, 1925.
839. Крендалл И. Б., Акустика, Л., 1934, 170 стр.
840. Кулик Л. А., Природа **8**, № 4—6, 1919; **10**, 4—6, 1921.
841. Маноцков А. Ю., О верхнем пределе высот слышимости болидов, Бюлл. КН ВАГО, № 38—39, 210, 1936.
842. Рэлей, Теория звука, т. **1—2**, М.—Л., 1955, 2-е издание.
843. Ржевкин С. Н., Ухо на разведке, Свердловск, 1942, 111 стр.
844. Эйхенвальд А. А., Акустические волны большой амплитуды, УФН **14**, № 5, 552—585, 1934. См. «Избранные работы», М., 1956, стр. 167—209 (то же).
845. Эсклангон Э., Акустика орудий и снарядов, Л., 1929, литографир. изд. ВТА, перев. с франц.
846. Fabry Ch., BSAF **33**, 448—451, 1919.
847. Haidinger W., Phil. Mag. (4) **22**, 349 и 442, 1861; см. CR **53**, 456, 1861; Brit. Ass. Rep. № 2, 15, 1861; см. [543].
848. Hart M. D., Proc. R. S. **105** (A), 80, 1924.
849. Morf A., Ann. d. schweiz. Zentralanst, Zürich, 1918.
850. Niessl G., Denkschr. Wien. Ak. IIa **34**, 1879.
851. Nölke F., Phys. Zts. **17**, 31—35, 1916.
852. Schrödinger A., Phys. Zts. **18**, 445, 1917.
853. Wegener A., Naturwiss. **5**, 37 и 615, 1917.
854. Whipple F. J. W., M. N. Geophys. Suppl. **2**, № 2, 89—96, 1928.
См. также №№ 2, 5, 22, 71, 102, 103, 104, 112, 116, 163, 171, 172, 511, 512, 514, 524, 543, 686, 782, 822, 832, 856, 857, 866.

К ГЛАВЕ 32

855. Астапович И. С., Новое о космической природе метеорных тел Природа **29**, 1, 16—17, 1940.
856. Астапович И. С., Новые исследования падения большого Сибирского метеорита 30 июня 1908 года, Природа **24**, № 9, 70, 1935.

857. Астапович И. С., О болиде 4 июля 1928 г., Мироведение **18**, 55—56, 1929.
858. Гутенберг Б., Основы сейсмологии, М.—Л., 1935, стр. 28.
859. Драверт П. Л., Гипергенные сейсмы, Бюлл. ЦКМКА (машинописн.), № 48, 1—4, 1944.
860. Драверт П. Л., Ишимский метеорит, «Сибирские Огни», Омск, № 2, 1934.
861. Обручев В. А., Природа **22**, № 5, 113—114, 1933.
862. Сидоров М. К., О землетрясениях в Коле и метеорах. «Живописное Обозрение», изд. Н. Зуева, СПб., 1875.
863. Тресков А. А., К вопросу о сейсмических волнах, сопровождавших падение Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г., АЖ **11**, № 6, 597—599, 1934.
864. Фонтон С. С., О падении каменного метеорита Еленовка, Метеоритика **11**, 169—176, 1954.
865. Щербаков А., Тобольские губ. ведомости № 18, 1866.
866. Astapowitsch J. S., Air waves caused by the fall of the great meteorite on June 30-th 1908 in Central Siberia, Quart. Journ. Roy. Met. Soc. **60**, № 257, 493—504, 1934.
867. Menning, Erdlebenkunde. Leipzig, 1909, стр. 77.
868. Rzehak A., Ztbl. f. Min. Petr. u. Krist. 1922, 408.
869. Quervain A., de, Gerl. Btr. z. Geoph. **14**, 4 [1915].
См. также №№ 5, 82, 511, 514, 540, 822, 838.

К ГЛАВЕ 33

870. Астапович И. С., Высоты телескопических метеоров по наблюдениям в Ашхабаде, АЦ № 77—78, 12—13, 1948.
871. Астапович И. С., Некоторые вопросы происхождения метеорной материи, АЖ **18**, № 1, 58—72, 1941.
872. Астапович И. С., О высотах телеметеоров по ашхабадским наблюдениям, Труды САО **4**, 68—77, 1954.
873. Астапович И. С., О получении относительных высот метеоров из статистических наблюдений в одном пункте, Бюлл. Ерев. АО, 4, 11—12, 1941.
874. Астапович И. С., Определение параллаксов телескопических метеоров, АЦ № 68, 9—11, 1947.
875. Бахарев А. М., Высоты телеметеоров потока Персеид по односторонним наблюдениям, Цирк. САО № 52, 5, 1947, № 56, 1—3, 1948.
876. Бахарев А. М., Новый радиант телеметеоров вблизи северного полюса мира, АЦ № 46, 5, 1945.
877. Бахарев А. М., Об ошибках при наблюдении телеметеоров, Бюлл. САО, № 8, 21—24, 1953.
878. Бахарев А. М., Организация исследований в области метеорной астрономии в Таджикской астрономической обсерватории, Природа **33**, № 2, 94, 1944.
879. Бахарев А. М., Радианты и орбиты Персеид и Орионид в 1942 г. по телескопическим наблюдениям, Бюлл. ВАГО, № 4 (11), 19—22, 1948.
880. Бахарев А. М., Радианты некоторых потоков по наблюдениям телескопических метеоров в 1942 и 1945 годах, Цирк. Тадж. АО № 66, 2—4, 1948. Ср. АЦ № 65, 9, 1947 и № 88, 7, 1949.
881. Бахарев А. М., Телеметеоры потока Лирид в 1953 г., АЦ № 138, 9, 1953.
882. Бахарев А. М., Телескопические метеоры в 1937—1939 гг., Труды Тадж. АО **2**, 47—89, 1941.
883. Бахарев А. М., Телескопические наблюдения метеоров в 1941 г., Бюлл. ВАГО, № 3 (10), 9—19, 1948.

884. Бахарев А. М., Добровольский О. В., Высоты и радианты телескопических метеоров в 1947—1948 гг., Бюлл. САО № 3, 17—29, 1953.
885. Бронштэн В. А., Каталог телескопических метеоров, Бюлл. КН ВАГО, № 46, 279—282, 1937.
886. Бронштэн В. А., Опыт обработки телескопических метеоров, АЖ **13**, 6, 538—546, 1936.
887. Затейщиков Г. О., Наблюдения телеметеоров летом 1939 г. в Таджикистане, АЖ **22**, 1, 41—44, 1945.
888. Кравчук И. К., Наблюдения телескопических метеоров 21—24 апреля 1940 г., Бюлл. ВАГО, № 6, 24—26, 1940.
889. Орлов С. В., Наблюдения метеоров с концов базиса, Цирк. САО, № 64—65, 1948.
890. Отчет Кафедры астрономии Саратовского гос. ун-та за 1938 г., АЖ **16**, № 3, 111, 1939.
891. Проскуряков В., Кравчук И., Наблюдения телескопических метеоров на Киевской астрономической обсерватории в 1940 г., Публ. Киевской АО, № 3, 77—83, 1950.
892. Терентьева А. К., Наблюдения телеметеоров в Ашхабаде в 1954 г., Изв. АН Туркм. ССР, № 6, 91—92, 1954; см. также № 6, 95—96, 1955.
893. Терентьева А. К., Новое определение высот телеметеоров в Ашхабаде в 1955 г., АЦ № 169, 13—15, 1956.
894. Штепан В. Е., Инструкция к наблюдениям телескопических метеоров, Бюлл. ВАГО, № 5, 1940.
895. Штепан В. Е., Каталог телескопических метеоров, Труды Ин-та физ. и геоф. АН Туркм. ССР 1, 73—99, 1955.
896. Штепан В. Е., К вопросу о выборе инструмента и карт для наблюдений телескопических метеоров, Бюлл. КН ВАГО, № 46, 262—284, 1937.
897. Штепан В. Е., Некоторые результаты изучения телескопических метеоров, Изв. АН Туркм. ССР, № 5, 98—100, 1953.
898. Штепан В. Е., Об угловых скоростях телескопических метеоров, АЖ **16**, 4, 49—51, 1937.
899. Штепан В. Е., Телескопические метеоры, Природа **35**, № 1, 57—59, 1946.
900. Dubin M., Rocket exploration of the upper atmosphere, см. [124], стр. 26—27; см. его же в сб. Meteors, ed. Kaiser T. R., London, 1955.
901. Hoppe J. AN **251**, № 6007—6008, 1934.
902. Humphreys W. J., Ap. J. **36**, 274—278, 1912.
903. Kresák L. и M., Pracé Astr. Obs. Skalnate Pleso **1**, 36—81, 1955.
904. Mclntosh R. A., Journ. BAA **46**, 2, 73—75, 1935.
905. Oepik E., Harv. Circ. 355, 1—12, 1930.
906. Teichgräber A., AN **262**, № 6288, 487—490. Ср. Die Sterne, 1937, Hf. **6**.
907. Van den Berg S., Journ. BAA **59**, № 1, 36, 1948.
См. также №№ 169, 173, 176, 195, 282, 352, 366, 428, 545, 594, 604, 664, 797.

К ГЛАВЕ 34

908. Андреев В. Н., Загадочное затмение, Природа **29**, № 2, 1940.
909. Астапович И. С., Об атмосферной природе зодиакального света, АЦ № 123, 10—12, 1952.
910. Астапович И. С., Пыльная буря над Центральным Копет-Дагом, Природа **44**, № 7, 98—99, 1955.
911. Астапович И. С., Серебристые облака, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геоф. № 2, 1939, 183—204, лит-ра 190 назв.
912. Астапович И. С., Серебристые облака в Забайкалье, Бюлл. КН ВАГО, № 16, 25—27, 1932.
913. Брукс К., Климаты прошлого, М., Гидрометиздат, 1952, 358 стр.

914. Гришин Н. И., Метеорологические условия появления серебристых облаков, Бюлл. ВАГО, № 15 (22), 3—9, 1954.
915. Дивари Н. Б., Фотометрические наблюдения ночного неба, Природа **42**, № 3, 88—89, 1953.
916. Драверт П. Л., Космическое облако над Ямало-Ненецким округом, Журн. «Омская область», № 5, 1941.
917. Затейщиков Г. О., Бронштэн В. А., Серебристые облака в 1936 г., Метеор. и гидр. **4**, № 11—12, 3—24, 1938, лит-ра 32 назв. См. Сборник работ студенч. научных кружков МГУ, вып. 5, 3—8, 1938.
918. Калитин Н. Н., Космическая пыль по актинометрическим наблюдениям, ДАН **44**, № 9, 395; ср. его же: Лучи Солнца, изд. АН СССР, 112 стр.; ср. Zacharow J., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **3**, № 6, 82—85, 1952.
919. Кринов Е. Л., Форма и поверхностная структура коры плавления индивидуальных экземпляров Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя, Метеоритика **8**, 99, 1950.
920. Морозов В. М., Измерения яркости дневного неба фотоэлектрическими фотометрами, поднимаемыми на ракетах, УФН **53**, 1, 142—145, 1954.
921. Ракипова Л. Р., О возможности влияния пыли на вертикальные движения воздуха, Изв. АН СССР, сер. геоф., № 1, 15—19, 1947.
922. Руднев Д. Д., Труды студенческих научных кружков физ.-матем. факультета СПб. университета, т. **1**, вып. 1, 69—70, 1910.
923. Святский Д. О., Иллюминация сумерек, Природа и люди, № 17, 1908.
924. Святский Д. О., К вопросу о появлении звезд днем помимо затмения, Мироведение **8**, № 1 (36), 59, 1919.
925. Святский Д. О., Оптические аномалии древних лет, Мироведение 16, 252—253, 1927.
926. Сытинская Н. Н., Масса космических метеоров, Природа **29**, № 4, 62—65, 1940.
927. Тихомиров Е. И., Серебристые облака, Метеор. и гидр. **1**, № 3—4; (11—12), 52—57, 1935, лит-ра 18 назв.
927а. Федынский В. В., Метеорные следы и серебристые облака в верхних слоях атмосферы, Метеоритика **7**, 95—112, 1950.
928. Федынский В. В., Об обработке односторонних наблюдений серебристых облаков, АЖ **16**, 1, 42—46, 1939.
929. Фесенков В. Г., Космическая материя и зодиакальный свет, Метеоритика **2**, 8, 1941.
930. Фесенков В. Г., О деятельности Комитета по метеоритам АН СССР и других научно-исследовательских учреждений, работающих в области метеоритики, за 1949 г., Метеоритика **8**, 33, 1950.
931. Цераский В. К., Астрономический фотометр и его применение, Изв. Моск. метеоролог. о-ва, М., 1887, 82 стр., § 21, стр. 76—81. Ср. его же: Анналы Моск. обс. (2) **11**, 1—2, 177—180, 1890.
932. Черняев В. И., Фукс М. Ф., Спектр неба в сумерки, ДАН СССР **14**, 77—79, 1937.
933. Чхаидзе Ш. М., Солнечная радиация и мутность атмосферы на горе Канобили, Бюлл. Абастум. обс. № 11, 168—169, 1950.
934. Шенрок А. А., Заря 17/30 июня 1908 г., Ежемес, метеоролог. бюлл. Главной физической обсерватории, № 26, июнь 1908, Приложение.
935. Шипчинский В., Необычайная заря 30 июня н. ст., Метеор. вестн. **18**, 2, 219, 1908.
936. Bornitz H., Sirius **34**, 9, 1901.
937. Cabannes J., Dufay J., Gauzit J., CR, **206**, 1525—1528, 1938; ср. Ap. J. **88**, 164, 1938.
938. Dallavalle J. M., Micromeritics, 2 ed., New York, 1948, 555 стр.
939. Elvey C. T., Ap. J. **97**, 65, 1943.
940. Flight W., Geol. Mag., 1882, 360—362.

941. Hann-Süring, Lehrb. d. Meteorologie, 4. Aufl. 1926, s. 104.
942. Heis E., Wochenschr. f. Astroph. **7**, 376, 1864. Ср. Изв. РАО **6**, 319, 1897.
943. Hoffmeister C., Mitt. Stw. Sonneberg, № 11, 1927; № 19, 1931; № 26, 1934; № 32, 1937. Ср. Zts. f. ang. Meteor. **49**, 267, 1932.
944. Hoffmeister C., Zts. f. Astroph. **19**, № 2, 116—131, 1939.
945. Jouaust R., Vassy E., CR **213**, 139, 1941.
946. Link F., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **2**, № 1, 1—6, 1950; **4**, № 1, 9—10, 1954; **7**, № 4, 1956.
947. Mém. Soc. Roy. Liège (IV), **15**, 1954.
948. Mohammed Khan R. A., Osmanian Univ. Res. J. (Science) **13**, 1948, а также за годы 1946, 1947 (Synopsis of meteor observations). Ср. Nature **148**, 372, 1941.
949. Nölke F., Peterm. Mitt. 1912, Hf. 3.
950. Shapley H., J. of. Geol. **29**, 502, 1921.
951. Švestka Z., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **2**, № 3, 4—43, 1950.
952. Švestka Z., Bouška J., Бюлл. астр. ин-тов Чехословакии **2**, № 1, 6—7, 1950.
953. Symons G. J., Harrison R. S., Eruption of Krakatoa and subsequent phenomena, London, 1888.
954. Teichgräber A., AN **267**, 337, 1938.
955. Vazquez G., Sky and Tel. **6**, № 6, p. 5, 1947.
956. Vestine E. H., Journ. RAS Canada **26**, 249—279 и 309—312, 1933. См. также №№ 11, 41, 82, 121, 330, 555, 800, 871.

К ГЛАВЕ 35

957. Астапович И. С., О выпадении каменного града вблизи г. Стерлитамака в 1824 г., Метеоритика **10**, 137—153, 1952. Лит-ра 62 назв.
958. Астапович И. С., Пыльная буря 6—9 октября 1928 г. в Новой Зеландии, Мироведение **19**, 143, 1930.
959. Астапович И. С., Разгадка тайны Стерлитамакского каменного града, Природа **39**, 5, 40—44, 1950.
960. Балясный В. А., Мироведение, № 41, 1921. См. Изв. РАО **7**, 30—33, 1899.
961. Вернадский В. И., Об изучении космической пыли, Мироведение **21**, № 5, 32—41, 1932.
962. Вернадский В. И., О необходимости организованной научной работы по космической пыли, Проблемы Арктики, № 5, 55—64, 1941.
963. Дивари Н. Б., О сборе космической пыли на леднике Туюксу (Северный Тянь-Шань). Метеоритика **4**, 122, 1948.
964. Драверт П. Л., Ванадий и никель в осадочных породах южной части Омской области, Журн. «Омская область», № 2, 71—73, 1939.
965. Драверт П. Л., О метеорной пыли 2/VII 1941 г. в Омске и некоторые мысли о космической пыли вообще, Метеоритика **4**, 115—119, 1948.
966. Драверт П. Л., О находке никель и медь содержащих минералов в пермских отложениях Тетюшского кантона Татарской республики, Изд. Сиб. с.-х. академии, Омск, 1923.
967. Карпинский А. П., Зап. Минер. о-ва **40**, 1, 20, 1902.
968. Кринов Е. Л., Фонтон С. С., Обнаружение метеоритной пыли на месте падения Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя, ДАН СССР **75**, № 6, 1227—1230, 1952. Ср. Метеоритика **11**, 122—131, 1954.
969. Крылов, Падающие камни, Природа, № 1, 1875.
970. Кузнецов С. С., Основы геологии, Учпедгиз, 1933, 408 стр.
971. Кулик Л. А., Отчет Метеоритной экспедиции о работах, произведенных с 19 мая 1921 по 29 ноября 1922 г., ИАН СССР, 391—410, 1922.
972. Ленц Р. О., Изв. Росс. геогр. о-ва **18**, 3, 37—40, 1882.

973. О геологических фактах, имеющих космогоническое значение, Изв. АН СССР, сер. геоф., № 3, 94—96, 1951.
974. Пилипенко П. П., О Летяжевском метеорите падения 1917 г., Уч. Зап. Сарат. гос. ун-та 1, вып. 3, 1924.
975. Письма и бумаги имп. Петра Великого 3, 608, СПб., 1893.
976. Роговский П., Метеоролог. вестник 24, 610—611, 323—326, 1914.
976а. Чирвинский П. Н., К вопросу о сборе космической пыли, АЖ 20, № 2, 1942.
977. Чирвинский П. Н., Черкас В. К., Почему так трудно доказать присутствие космической пыли на земной поверхности, Мироведение 18, 113—115, 1929. Ср. Zentralbl. f. Min., Geol. u. Pal. (A) № 3, 127—129, 1929.
978. Шведов Ф., Журн. Русск. физ.-хим. о-ва 12, 138, 175 и 235, 1880 и 13, 1881. Его же, Sur l'origine de la grêle, Одесса, 1882, стр. 14. Ср. Святский Д. О., Мироведение 8, 1 (36), 63, 1919.
979. Arago F., Astronomie Populaire 4, 208, 1857.
980. Bowen E. G.,Austr. J. Phys. 6, № 4, 490—497, 1953. См. [1003].
981. Buddhue J. D., Meteoritic dust, Univ. New-Mexico publ. on Meteoritics, № 2, 1950, 102 стр.
982 Ditte A., Ann. Rep. Smiths. Inst., 235—244, 1904.
983. Ehrenberg, Ber. Ak. Berlin, 1848, 370.
984. Hoffleit D., Harv. Obs. Techn. Rep. № 9 (=Harv. Repr. II—43), 1952, 45 стр. Библиография работ по космической пыли с аннотациями и рефератами, 505 назв.
985. Hoppe J., Zimmermann H., Sterne 30, Nr. 3, 33—36, 1954.
986. Jager C. de, Colloque à Liège 1954, 174—182, 1955.
987. Jung, Bull. Soc. Vaudoise sc. nat., Lausanne, 14, 493, 1877; CR 83, 242, 1877.
988. Kryżanowsky W. J., Astapowitsch I. S., Zusammenstoss mit dem Erde. Die Koralle, Berlin 5, 175, 1929.
989. Lassault A. V., Tscherm. Miner. Petr. Mitt., Wien 3, 517, 1880.
990. Mierbach O., Haben die Leoniden Einfluss auf das Wetter? Киев, 1927, 11 стр.
991. Murray J., Proc. R. S. Edinburg 9, 285, 1876 и 12, 491—496, 1883. См. Отчет «Челленджера» 5, Deap Sea Deposits, 1891.
992. Murray J., Hjort J., The Depths of the Ocean, London, 1912, pt. 6, 154—155.
993. Nininger H. H., Sci. Month. 60, 1940.
994. Norris D. K., Hogg A. S., Ap. J. 54, № 7, 192—193, 1949.
995. Oepik E., Irish Astr. J. 1, № 5, 145—148, 1951.
996. Petterson H., Rotschi H., Geoch. et Cosmoch. Acta 2, № 2, 81—90, 1952; ср. Nature 166, 308, 1950.
997. Rudaux L., La Nature 61, 437, 1933.
998. Struve O., Dust in Solar System. Sky and Tel. 10, № 4, 88, 1951.
999. Swinbank W. C., Austr. J. Phys. 7, № 2, 354—358, 1954; Martyn D. F., ibid., стр. 358—364.
1000. Thomsen W. J., Sky. a. Tel. 12, № 6, 147—148, 1953.
1001. Tissandier G., Les. poussières de l'air, Paris, 1877.
1002. Whipple F. L., Science 110, 1949, от 28/X. Proc. Nat. Ac. Sci. 36, 687, 1950.
1003. Whipple F. L., Hawkins G. S., J. of Meteorol. 13, № 3, 236—240, 1956.
1004. Wylie C. C., PA 51, 120—121, 1943.
См. также №№ 63, 71, 104, 916.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ В ЛИТЕРАТУРЕ

АБ РОЛМ	— Астрономический бюллетень Русского общества любителей мироведения
АЖ	— Астрономический журнал
АЦ	— Астрономический циркуляр
БСЭ	— Большая Советская Энциклопедия
Бюлл. ВАГО	— Бюллетень Всесоюзного астрономо-геодезического общества
Бюлл. КИСО	— Бюллетень Комиссии по исследованию Солнца
Бюлл. КН ВАГО	— Бюллетень Коллектива наблюдателей Всесоюзного астрономо-геодезического общества
Бюлл. КН МОЛА	— Бюллетень Коллектива наблюдателей Московского общества любителей астрономии
Бюлл. ЦКМКА	— Бюллетень Центральной комиссии по метеорам, кометам и астероидам
ДАН СССР	— Доклады Академии наук СССР
Докл. НИИЗМ	— Доклады Научно-исследовательского института земного магнетизма
ИАН СССР	— Известия Академии наук СССР
Изв. ГАО	— Известия Главной астрономической обсерватории АН СССР
Изв. ГРАО	— Известия Главной Российской астрономической обсерватории
Изв. НИЛ	— Известия Научного института им. Лесгафта
Изв. РАО	— Известия Русского астрономического общества
Изв. РОЛМ	— Известия Русского общества любителей мироведения
Изв. ТФАН	— Известия Туркменского филиала Академии наук СССР
РАЖ	— Русский астрономический журнал
Тр. АОЛГУ	— Труды Астрономической обсерватории Ленинградского государственного университета
Тр. ГОИ	— Труды Государственного оптического института
Тр. ГРАО	— Труды Главной Российской астрономической обсерватории
Тр. САО	— Труды Сталинабадской астрономической обсерватории
Тр. ТАО	— Труды Ташкентской астрономической обсерватории
УФН	— Успехи физических наук
Цирк. ГАО	— Циркуляр Главной астрономической обсерватории АН СССР
Цирк. САО	— Циркуляр Сталинабадской астрономической обсерватории
Цирк. Тадж. АО	— Циркуляр Таджикской астрономической обсерватории
AJ	— Astronomical Journal
Am. J. of Sci.	— American Journal of Science
AN	— Astronomische Nachrichten
Astr. Abh.	— Astronomische Abhandlungen
Ap. J.	— Astrophysical Journal

40 Зак. 3211. И. С. Астапович

Ann. d. Phys.	— Annalen der Physik
Austr. J. Phys.	— Australian Journal of Physics
BA	— Bulletin astronomique
BSAF	— Bulletin de la Société astronomique de France
Can. J. Phys.	— Canadian Journal of Physics
Čas.Česk.ústavů astr.	— Časopis Československu ústavů astronomickýc h
Comm. D. D. obs.	— Communications of the David Dunlap observatory
CR	— Comptes rendus de l'Academie des sciences de Paris
Dom. obs. Ottawa contr.	— Dominion observatory Ottawa contributions
Harv. Ann.	— Harvard observatory Annals
Jodr. Bank Ann.	— Jodrell Bank Annals
J. Appl. Phys.	— Journal of Applied Physics
J. Geoph. Res.	— Journal of Geophysical Research
Journ. BAA	— Journal of the British Astronomical Association
Journ. RAS Canada	— Journal of the Royal Astronomical Society of Canada
Lund obs. Medd.	— Lund observatorium Meddelande
Mem. RAS	— Memoirs of the Royal Astronomical Society
Mitt. Stw. Sonn.	— Mitteilungen der Uniwersitätssternwarte zu Sonneberg
MN	— Monthly Notices of the Royal Astronomical Society
NACA	— National Advisory Commitee of Aeronautics
Obs.	— Observatory
PA	— Popular Astronomy
PASP	— Publications of the Astronomical Society of the Pacific
Publ. AAS	— Publications of the American Astronomical Society
Phil. Mag.	— Philosophical Magazine
Phil. Trans.	— Philosophical Transactions of the Royal Society
PIRE	— Proceedings of the Institute of Radio Engineers
Proc. Am. Phil. Soc.	— Proceedings of the Philosophical Society of America
Proc. Phys. Soc.	— Proceedings of the Physical Society
Proc. RS (A)	— Proceedings of the Royal Society (London), serie A.
Rev. Mod. Phys.	— Revue of Modern Physics
Sci.	— Science
Sitzb. Wien Ak.	— Sitzungsberichte der Königliche Akademie der Wissenschaften in Wien
Trans. IAU	— Transactions of the International Astronomical Union

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абельман И. С. 41, 57
Абрамов Н. А. 325
Авиценна (Ибн-Сина) 42
Агаджанова А. С. 362
Алексеев С. П. 520
Алексей Михайлович 43
Аленич А. А. 208, 360
Аллен К. 169, 431
Алликальт Н. 432
Аллисон 442
Альберт Великий 28
Альгазен 42
Аль Фергани 42
Аморетти 475
Анаксагр 41
Андреев В. Н. 563
Антоний Пий 33
Аполлоний Пергский 41
Араго Ф. 48, 185, 267, 474, 476, 562
Аргеландер Ф. 541, 546, 551
Аргентов А. 517
Аристотель 32, 41, 62, 64
Арчимис 298
Аставин-Разумин Д. Л. 112, 287, 289, 294, 309, 312
Астапович В. С. 81, 96
Астапович Е. П. 428
Астапович И. С. 29, 55—57, 59, 76, 80—83, 88, 99, 100, 105, 115, 119, 136, 172, 175, 178, 183, 184, 186, 204, 208, 225, 226, 237, 243, 246, 248, 250, 251, 266, 268, 278, 290, 293, 301, 305, 308, 309, 312, 315, 321, 329, 330, 333, 334, 345, 348, 350, 354, 360, 370, 371, 390, 398, 431, 432, 440, 452, 453, 477, 478, 484, 488, 542, 543, 546, 551, 552, 555, 556, 558, 559, 571—573
Астахов А. С. 154

Баддхью Дж. 586, 587
Бадманжанов Ц. Г. 17, 469, 490
Бакгауз Т. 60, 81, 571
Балдуин Р. 516
Бальби 475
Балясный В. А. 134, 490, 581
Барабашев Н. П. 115, 248, 574
Баранцева В. И. 173
Бармин А. В. 576
Барнард Э. 133, 135, 136
Барринджер 64, 511, 512
Бассиан 33
Батлер 133, 290, 352, 478
Баумгауэр 579
Бауэр 567
Бахарев А. М. 58, 104, 115, 184, 187, 204, 248, 308, 312, 315, 322, 358, 439, 543, 546, 547—549, 551, 554—558
Бахе 48
Бачельдер 581
Бекон 394
Белопольский А. А. 12, 64
Белорицкий 138
Белявский С. И. 186
Бенценберг И. Ф. 42, 46, 63, 216, 242, 273, 360
Бер 359
Берверт 468
Берг С., ван ден 555
Бергстрем 499
Бериазе В. 31
Бернар 575
Бернулли Д. 381
Бертельс Е. Э. 31
Бессель Ф. 203, 216, 225
Бечварж А. 61, 546
Бивен 46
Био Ж. Д. 27, 42, 46, 50, 476
Биэла И. 51
Блажко С. Н. 12, 54, 65, 76, 134, 217, 226, 298, 299, 303, 305, 308, 312, 316, 404, 454
Бланшар 492
Блеекер 492
Блох М. 134
Блохинцев Д. И. 521
Богданова В. 323
Богдонов 400
Богуславский Г. 49, 50, 64, 185
Бойс 490
Боков 391
Бонилла 304
Бонплан 46, 63
Бонч-Бруевич М. А. 154, 433
Борн 565
Борниц Г. 357, 476, 569
Босс 524
Боушка И. 56, 61, 455, 569
Боуэн Э. 145, 581
Брандес Г. В. 42, 46, 48, 63, 64, 172, 216, 242, 273, 360
Браун Г. 10, 28, 444
Брауниг 298
Бредихин Ф. А. 12, 28, 52, 53, 57, 64, 115, 186, 187
Брезина А. 503
Бриджмен 510, 515
Брикар 575
Бронштэн В. А. 12, 124, 556, 557, 564, 571
Брох Ф. 455
Брукс 348, 358, 541, 569
Бугославская Н. Я. 138
Бумба В. 61, 233, 241, 456
Бун 514
Бунин И. 34
Бургатти П. 405
Бурмистров Ф. Л. 140
Бурнаев А. А. 483
Бухнер О. 28, 476
Бхар Дж. 433
Бьянкони 443
Бэкер 60, 138, 144
Бэли 433
Бэрд Р. 92, 131, 184
Бюллаф 425

Вавилов С. И. 77, 84
Вазкова Е. 136
Валентинер 28
Валлис 381
Васенко Е. П. 555
Васильев И. Е. 137
Васнецов А. М. 179
Васси Э. 575
Васюков А. 482
Вахман 299
Введенский Б. В. 154
Вегард Л. 572, 575
Вегенер А. 76, 322, 364, 375, 376, 501, 511, 512, 525, 572
Вейделер 443
Вейнек Л. 54, 64, 132
Вейсс Э. 50, 51, 54, 185, 203, 217, 225, 252, 326, 439, 443, 468
Вейтхен-Хатт 500
Венкатараман 154, 167
Вергилий 32, 459
Верещерин 482
Вернадский В. И. 59, 582
Вершинин 460
Ветчинкин В. П. 56, 389, 408
Виллард О. 56, 167, 435, 456
Вильев А. 53
Вильямс Дж. 183, 184
Винкель 496
Виннеке 541
Вислиценус И. 133
Виткевич В. И. 72
Возарова М. 61, 362
Вознесенский А. В. 525, 537
Волков 490
Волосов Д. С. 143, 144
Вольмер 168
Вольф М. 54, 132, 135, 136, 188, 492
Врангель Ф. П. 470
Вреде 326, 468
Врубен 298
Всеволод 531
Вукс М. Ф. 574
Выдрин 39
Высотский А. Н. 306
Вюльфинг 28

Габидуалин Х. 482
Гайдингер В. 56, 404, 405, 476
Галле И. 216, 225, 444, 468
Галлей Э. 42, 43, 278, 370, 474
Гамбергерус 562
Гантмахер Ф. Р. 411
Гармашев Л. П. 329
Гаррот 167
Гартлей 584
Гаусс К. Ф. 460
Гейс 52, 174, 185, 186, 216, 357, 559
Гелиогабал 33
Гемфрис У. 572, 574
Гендерсон 471
Генкин И. Л. 555
Герасимович Б. П. 229
Герзон 425
Герман 475
Геродот 32
Геррик Э. 48, 185, 476
Герц 28
Гершпрунг 136, 273
Гершель А. 54, 60, 216, 255, 266, 298, 417, 442, 444, 499
Гетц В. 574
Гётчинсон 16
Гизлер М. Ю. 331
Гильденбрандсон 444
Гинге 430
Гинзбург И. П. 411, 424
Глазенап С. П. 57, 115, 217
Глеймер 417
Гмелин Старший 470
Гозе 433
Гози Ж. 575
Голенищев 62
Головин Ф. А. 576
Головкова Л. И. 429, 559
Гольдштейн С. 382
Гомер 32
Гофмейстер К. 29, 54, 61, 92, 176, 183, 199, 203, 205, 216, 217, 225, 231, 235, 236, 238, 242, 243, 250, 251, 256, 293, 322, 341, 357, 369, 407, 418, 431, 443, 476, 540, 551, 554, 572—574
Графф 478
Грег 185
Григорий Турский 474
Григорьева С. Н. 352, 357
Гринхоу Дж. 66, 76, 167, 270, 294, 438
Гринштейн Дж. 569
Гришин Н. И. 147, 308, 311, 371, 571, 572
Грюнвальд 403
Гудолл 433, 460
Гузо 28
Гульмедов Х. Д. 282, 293, 320, 323, 456
Гумбольдт А. 46, 48, 63, 430, 442, 460
Гут В. 29, 60, 61, 116, 217, 223, 229, 248
Гутенберг 548
Гэде 406—408
Гюгонио К. 383

Давыдов В. Д. 343
Даль В. И. 39
Далькамбр 166
Дамах 32
Данте 38
Дантон А. 567
Дарвин Дж. 536
Дарлинг 552
Дебабов Д. Г. 485, 490
Дежарден 575
Делош 40
Деминев О. В. 471, 571
Деннинг В. Ф. 52, 60, 65, 173—175, 178, 184, 187, 201, 203, 208, 212, 223, 254, 255, 268, 280, 348, 352, 357, 358, 364, 368, 443, 448, 468, 477, 524, 540, 541, 551, 552, 559
Дерфель 46, 47, 474
Десятова О. 325
Джауд 35
Джефферсон Т. 46
Джехангир 35
Джуманиязов О. 139
Дивари Н. Б. 572, 582, 587
Димитров Г. 260
Диоген Аполлонийский 41
Дитте А. 585
Дмитрюков 430
Добровольский О. В. 411, 451, 547, 555, 558
Добсон Дж. 56, 65, 76, 243, 371, 406, 417, 554
Драверт П. Л. 325, 442, 468, 533, 536, 538, 582, 584
Дубин М. 544
Дэви Г. 46
Дэвидсон Р. 168, 266, 404
Дэвис Дж. 56, 66, 158, 162, 270, 271, 544
Дюбуа 381
Дюков И. А. 203, 248
Дюран-Гревилль 524
Дюрер А. 19
Дюфе Ж. 574, 575

Евдокимов Н. Н. 356, 358
Евклид 83

Евстахий 588
Елисеева Л. Г. 160, 282
Ефтеев В. И. 458

Жуковский В. А. 32
Жуковский Н. Е. 384
Жуо Р. 575

Забудский Н. А. 381
Залесский П. К. 12, 58, 186
Затейщиков Г. О. 137, 308, 315, 555, 571
Зевакина Р. А. 461
Зегер 414
Зейдлиц-Штюблер 500
Зернов 519
Зигель Ф. Ю. 268
Зильбершлаг 443
Зинченко Н4 136
Зискин М. 82
Златинский В. М. 360

Ибн-аль-Джауси 42
Иван Грозный 39
Иванов Н. А. 65, 154, 433
Иессе О. 228, 571
Изенберг 390
Изотов А. А. 259
Имото С. 42
Иокояма Э. 433, 465
Иохансен 400
Ито 433

Йельструп 471

Кабани Ж. 575
Кавина 474
Каврайский В. В. 217
Кадыров М. Х. 184, 357, 555
Казаков С. А. 120
Кайзер Т. 56, 168, 425, 439
Калашников А. Г. 460—462
Калеб 551
Калитин Н. Н. 231, 565—567
Кальке С. 492
Калькун 512, 514
Кант И. 50
Капица П. Л. 409
Карамзин Н. М. 38, 42
Карман Т. 382
Карон 136
Карпинский А. П. 581
Карпов 514
Каслер 575
Касьянов В. 357
Катасев Л. А. 58, 93, 137, 257, 269, 371, 411, 422, 555
Кашанова З. А. 555
Кащеев Б. Л. 56, 158, 160, 258, 271
Кейв 471
Кёль Т. 476, 477
Кемтц 468
Кениссе Ф. 198, 360
Кеплер И. 63, 474, 562
Кервэн К. 538, 572
Керолир 333
Кестнер 46
Кетле А. 27, 50, 203, 216, 460, 476
Кинг А. 60, 203, 254
Кинслер 401
Киркуд Д. 28, 468
Кирпищиков 460
Кирх 474
Кирхгоф Г. Р. 383
Кисслинг 562
Классен 315
Клегг Дж. 56, 168, 169, 187, 188, 200, 201, 270, 294, 438
Клейбер И. А. 28, 53, 57, 64, 95, 176, 177, 179, 185, 208, 252, 259, 260, 268, 292, 303, 340, 404, 406, 573, 578
Клинкерфюс 51
Клиффорд Х. Э. 132
Клюкина Г. 310
Клявин 514
Кнопф 243, 477
Козлов П. К. 490, 531
Козодаев С. С. 483
Койл 465
Коллинсон 341
Колтон 442
Колумб Х. 38
Кольский 463
Комаки К. 61
Конколи П. 298, 442, 443
Конт О. 297
Копал З. 76
Корню 444
Космодемьянский А. А. 411
Косолапов П. 325
Костерзитц 133
Костылев К. В. 56, 158
Кравчук И. К. 553
Крамер Е. Н. 133, 137, 187, 188, 266, 293, 309, 310, 315, 450, 489, 587
Крапоткин А. 28
Крафт 12, 40, 43, 63, 360
Кребс 442
Кресак Л. 61, 362, 544, 551
Кресак М. 544, 551
Кринов Е. Л. 56, 59, 290, 328, 353, 458, 491, 501, 506, 565, 580, 581, 583, 588, 589
Кропачев А. М. 539
Крузенштерн И. Ф. 475
Крупп 394
Крылов А. Н. 500
Крылов Ф. 562
Кубокава 341, 352
Кувье-Гравье 40, 49, 50, 174, 175, 251, 431, 476, 555
Кузмин Г. 183
Кук М. А. 56, 168, 169, 187, 188, 200, 201, 270, 294, 438
Куксон 203
Кулик Л. А. 59, 468, 476, 505, 512, 577
Кулин Г. 484
Куратов 430
Кэннингем 157

Лагоу 76
Лазаревский В. С. 329
Ланс Р. 538
Лакруа 33, 512
Ланланд 37
Ланге Г. А. 329
Ландсберг 579, 586
Ланкастер 28
Ла Паз Л. 60, 558
Лаплас П. С. 50
Ларионов 52
Ласо 580
Леверрье У. 50
Леви М. 405
Левин Б. Ю. 56, 233, 240, 268, 410, 416, 420, 468, 559
Левинсон-Лессинг Ф. Ю. 319
Ленин В. И. 10

Лесневский 52
Леушин В. А. 154
Ликосфен 474
Линк Ф. 60, 217, 233, 241, 567, 568
Линке Ф. 565, 575
Линдблад Б. 61
Линдеман Ф. 56, 65,76, 243, 371, 406, 417, 554
Линн 42
Липпман 582
Лихтенберг 46
Ловелл Б. 56, 60, 159, 169, 200, 270, 271, 294, 425, 438
Лозинская А. М. 124, 177
Локе Дж. 48, 64, 185
Лоуэлл П. 302
Лыткина Т. Е. 190, 199, 203
Льюис 132
Лэй Г. 132
Лэннон 499
Любарский К. А. 137, 301, 308, 309, 371, 476, 477

Магги 404
Магомет 34
Маддрилл 480
Мадиган 512
Маневский Н. В. 381, 508
Майкельсон А. 398
Мак-Интош Р. А. 62, 173, 183, 236, 239, 244, 251, 254—256
Мак-Кинли Д. 56, 60, 110—112, 155, 157, 162, 188, 270, 271, 294, 364, 377, 432, 437, 438, 464
Макленнан 403
Максутов Д. Д. 127, 138, 142—144, 148
Малин Д. Ф. 483
Маллок 383, 524
Мальцев В. А. 12, 58, 59, 186, 190, 199, 217, 244, 251, 255, 364, 375
Малюга Д. П. 587
Мамонтов В. Н. 65, 525, 537
Мани К. 537
Маннинг Л. 56, 167, 438, 456
Маноцков А. Ю. 248, 432, 524
Маркс М. О. 580
Мартиноцци 405
Мартыненко В. В. 137, 301, 310, 371
Маскелайн Н. 42
Массена 460
Матгиссен 444
Ма Туан-лин 35, 42, 467, 489,
Мауэр 573
Мах Л. 381
Мах Э. 56, 381, 524
Машбиц Б. М. 92, 116, 117, 124, 136, 203, 314
Медведев Я. 12, 43, 63
Меддер И. 216
Мейденбауэр 443
Мейер В. 468, 511
Меннинг 538
Менье С. 580, 583
Меррей 18, 584—586
Месон 334, 540
Меткоф 291
Мещерский И. Г. 411, 424
Милашенко 577
Миллман П. М. 29, 55, 56, 60, 76, 144, 155, 157, 161—163, 167, 184, 187, 207, 234, 235, 240, 244, 258, 269—271, 292, 293, 298, 301—307, 315, 316, 318, 364, 377, 405, 427, 437, 439, 452, 453, 464, 516, 587
Милованов В. Ф. 321
Минохарис 433
Мирбах О. 581
Мискавайхи 42
Митра С. К. 433
Михаил Сирнец 562
Михайлов А. А. 138, 546

Моденов П. С. 483
Модестов 120
Моисеев Н. Д. 57
Молчанов П. А. 73
Мольвейде 216
Моннинг 484
Монод 512
Монтанари 46, 63, 474
Морозов Г. А. 334, 358, 484, 560
Морозов Н. А. 589
Морф 528
Мохаммед Хан Р. 62, 175, 280, 360, 468, 469
Мохоровичич 451
Музафаров 308
Мультон Ф. 499
Мунро 471
Муратов С. В. 136
Мухин И. 325, 468
Мухтарова 363
Мушенбрук 40
Мушкетов И. В. 533, 534, 537
Мэран 536
Мэрис Г. 408, 417, 433
Мюраур А. 405

Набоков М. Е. 178, 315
Нагаока 433, 492
Найнинджер Г. 56, 60, 468, 493, 500, 506, 508, 511, 512, 567, 583, 589
Нардин В. В. 214, 215, 283
Насыров Г. А. 149
Натансон С. Г. 57, 266
Науменко Н. Т. 490
Неймайр 185
Неуймин Г. Н. 291, 292
Николе М. 167
Нильсен А. 61
Ниссль Г. 54, 203, 204, 216, 225, 236, 242, 243' 252, 254, 256, 259, 369, 376, 476, 540
Норденшельд Э. 64, 578, 580, 581, 583
Нордквист 583
Нориндер 467
Нуссельт 331
Нушль Ф. 60
Ньютон Г. А. 28, 49, 50, 60, 64, 175, 177, 179, 183, 216, 235, 237, 243, 267, 541, 554
Ньютон И. 313, 364, 380
Нэсмит Р. 431, 436, 439

Обручев В. А. 537, 587
Ожильви 470
Олбриттон 514
Олдермен 512
Оливер 400
Оливье И. 29, 56, 60, 65, 183, 187, 244, 268, 442, 450, 468, 541, 552, 559
Олмонд М. 270
Олмстед Д. 48, 60, 64, 185, 225, 444, 477
Ольберс Г. 216, 221, 225, 291
Онихимовский В. В. 515
Оппольцер Э. 50, 568
Орлов А. Я. 186
Орлов С. В. 564
Орлов 537

Павлов А. П. 64
Павлов И. П. 85
Пализа И. 552
Паллас П. С. 44, 63
Папе 51, 541
Парацельс Т. 43
Перевощиков Д. М. 64
Перман 514
Перрайн 442

Перри А. 27
Петерс Х. 50
Петерсон А. 56, 167, 456
Петров В. Н. 541, 555
Петров Ю. Н. 487, 492
Печковский 52
Пиддингтон Дж. 436
Пикар 166, 432, 433
Пиккеринг В. 120, 247, 267, 417, 418
Пиктэ 579
Пилипенко П. П. 469
Пильби 512
Пирс 167, 169, 431, 434, 436
Плавец М. 29, 61, 217, 355
Плиний Старший 32
Плутарх Херонейский 32, 41
Погсон 51
Пойнтинг 355
Покровский Г. И. 399
Покровский К. Д. 65, 186, 217, 266
Полак И. Ф. 308
Полуянов А. И. 294
Померанцев И. И. 58, 186
Попов А. С. 154
Попов К. 386
Портер Дж. 55, 60, 236, 238, 244, 254, 269
Потанин Г. Н. 562
Поултер 358, 551
Прайор Дж. 28, 504
Прентис Дж. 60
Пржевальский Н. М. 531
Прингл Дж. 475
Прокудин-Горский 147
Проскурина Е. М. 116, 119, 120, 209, 244, 247, 555
Пти Ф. 54, 216
Пушкин А. С. 15

Радзиевский В. В. 355
Разумова Е. Ф. 212, 213
Разыев Х. 282
Райт Ф. 477
Ракипова Л. Р. 566, 568
Рамзай В. 299
Расселл Дж. 306
Рафаэль 474
Рашков 52
Рейд 394
Рейман 220, 541
Рейнвальд И. А. 511, 512
Ренар 18, 584
Ренкин 383
Рёш 588
Ривес 512
Риман 383
Риттер 430
Робертсон 355
Роговский П. 581
Розенхаген 500, 501
Романец М. К. 548
Рорбах К. 116
Ростовцев Н. А. 482
Ростро 443
Роуленд 292
Рубцов Л. 158
Руднев Д. Д. 564
Рутнер Э. 356
Рытов С. М. 462
Рэлей Дж. У. 76, 383, 390, 405
Рюдо Л. 134, 578, 579

Савицкий П. А. 12, 217, 237, 322, 554, 555
Саврухин А. П. 240, 257, 361, 363, 371, 489, 555
Садыков Я. Ф. 229, 257
Саже Ж. 144, 484

Сакали М. А. 538
Сакк В. В. 548
Сарыбатыров Р. 18
Саха М. Н. 441
Свингс П. 575
Свифт Л. 560
Свобода И. 50, 65, 203, 362
Святский Д. О. 27, 43, 360, 458, 482
Северный А. Б. 239, 409, 478
Седов Л. И. 389
Секки А. 216, 298, 443
Селиванов С. М. 330, 352, 358, 560
Селлардс 512
Семенов С. 325
Семенов Ф. А. 49, 64
Сенека 214
Сердюченко Г. П. 31
Сеченов И. М. 89
Сиам Дж. 433
Сидоров М. К. 536
Сикора И. И. 12, 54, 58, 60, 65, 134, 136, 217, 286, 288, 290, 478
Сикора Н. 136
Сильвестри 580
Симон 468
Симоненко А. Н. 142, 195
Симпсон 512
Синютин Д. И. 229
Ситник Г. Ф. 308
Ситников П. Ф. 260
Скеллетт А. 433—435
Скиапарелли Дж. 28, 50—53, 56, 64, 176, 185, 355, 357, 364, 404, 405, 569, 570
Скорер Р. 522, 528
Скребец А. Ф. 483
Слоницкий А. Л. 486, 490
Слюсарев Г. Г. 77, 144
Смирнов А. 482
Смит Л. 335
Сов 512
Сойфер Д. 329
Соснова А. К. 257
Союти 34
Спарроу К. 407, 408, 433
Спенсер Л. 512, 514, 589
Спиридонова С. 136
Спэйн К. 98
Станюкович К. П. 56, 93, 124, 136, 137, 187, 207, 217, 230, 237, 238, 291, 300, 308, 351, 363, 364, 365, 389, 390, 409, 471, 478
Стермер К. 471, 575
Стивенс 442
Стивенсон 346
Стойкович А. 40, 468
Струве В. Я. 28
Стьюарт Дж. 56, 156, 187, 200, 201, 239, 437
Субботин А. Ф. 322, 360
Субботина Н. М. 59, 203, 248
Сытинская Н. Н. 57, 136, 138, 139, 186, 273, 286—288, 316, 329, 337, 418, 450, 568
Сэндс Ф. 417

Табит ибн Синана 42, 62
Такакура Т. 400, 463, 466
Таккини 352
Татаринов Г. Т. 515
Татищев А. 12, 43, 44, 63
Тейфель В. Г. 572
Тейхгребер А. 556
Тепмен 185
Терентьева А. К. 177, 230, 549, 555
Тиссандье Г. 580, 583
Тиссеран Ф. 225
Титов А. М. 331
Тихов Г. А. 64, 65, 93, 217, 316, 369

Томас Р. 291, 398, 400, 424
Томита К. 257
Томсон В. 433, 471
Траубридж К. 65, 444, 455, 492
Траян 33
Трикотский С. С. 453
Трутце Ю. Л. 112, 294
Трэйл К. 357
Турцев А. А. 319
Турчинович Н. Т. 470

Уайли К. 60, 177, 244, 418, 468, 568
Уиппл Ф. Дж. У. 527, 528, 536
Уиппл Ф. Л. 29, 55, 56, 60, 65, 66, 76, 136, 144, 233, 244, 256, 269, 364, 366, 371, 374, 387, 410, 413, 416, 418—422, 424, 440, 450, 456, 477, 478, 548, 568, 570, 586
Уитни 225
Уокер 49, 242
Уормелл Т. 459, 471
Уотсон Ф. 203, 477, 568
Уотсон-Уатт 466, 467
Успенский Т. В. 482
Уэллс 61, 162
Уэстленд 346

Фаас В. А. 471
Фабри Ч. 417, 528, 575
Фай 443
Фаркьюэрсон 430
Фармер 436
Фаррингтон О. 359, 397, 405, 458, 468, 499
Федоров Л. А. 43
Федоров Л. 325, 576
Федынский В. В. 12, 29, 55, 56, 59, 61, 116, 124, 133, 137, 154, 186, 187, 199, 203, 237, 243, 291, 301, 312, 314, 364, 365, 390, 417, 453, 455, 468, 486, 492
Фейдж 400
Феличьяно Дж. 28
Фельденхауэр 48
Ферсман А. Е. 59
Фесенков В. Г. 12, 59, 73, 260, 387, 404, 450, 451, 501, 553, 565, 566, 570, 573
Фиалко Е. И. 56, 158
Филимонихин В. А. 137
Фишер В. 136, 260, 292, 408, 421, 476, 477, 508, 585
Фишер 475
Фламмарион К. 280, 578
Фок В. А. 154
Фонтон С. С. 580, 581, 583, 589
Форд 522
Франкль Ф. И. 389
Фрелихнус 562
Фрич 133
Фэри 46

Хабрехт И. 474
Хазенауэр 480
Халин Б. 471
Хаммитт 400
Хаммонд 351
Хан 35
Ханбердыев А. Х. 322
Хандрикс 145
Ханстеен 470
Харанг 436
Харакеста 251
Харкнесс 417
Хартсфильд 432
Хасегава И. 42
Хастинг 167
Хаусдорф Ф. 567

Хвостиков И. А. 73, 572
Хей Дж. 28, 156, 157, 187, 200, 201, 239, 364, 437, 504, 506
Хейнеман 388
Хейс Э. 570
Хейског 483
Хеппергер И. 176
Хербигер 583
Херлофсон Н. 56, 158, 169, 413, 437
Хирозе Х. 257
Хитрово В. Н. 564
Хладни Э. Ф. 12, 26, 27, 44—46, 56, 63, 64, 97, 291, 305, 340, 364, 390, 405, 459, 468, 476, 502, 536, 562
Хлюстов Ю. Н. 166, 464, 465
Холл 440
Холст Х., ван де 586
Хоппе И. 55, 56, 203, 251, 268, 339, 364, 374, 410, 412, 413, 416, 421, 551
Хортон 401
Хотинок Р. Л. 207
Хоукинс Г. 289, 294, 461
Хофф К. Э. А. 27, 468, 476
Хоффлейт Д. 284, 286, 287, 356, 363, 477
Худяков И. А. 517
Хусаинов С. Х. 487

Цанотти Ф. 475
Цедренус 561
Цезарь Ю. 458
Ценнек 433
Цеплеха З. 61, 115, 124, 217, 292, 351, 352, 374
Цераский В. К. 12, 55, 119, 208, 243, 247, 360, 570
Цесевич В. П. 292, 353, 442, 543
Цециоли 52, 182, 559
Циммерман Г. 351, 352
Циннер 47
Циолковский К. Э. 411

Чабб 512
Чаллис 430
Чаманлал 154, 167
Чартерс 390, 398
Чепмен С. 199, 466
Червякова А. Ф. 282
Черкас В. К. 582
Чермак 319
Чернов В. М. 308, 542, 569
Черняев В. И. 574
Чечик П. О. 56
Чирвинский П Н. 291, 319, 395, 506, 582
Чуриловский В. Н. 143
Чхандзе Ш. М. 566

Шайн Г. А. 65, 266, 291, 321, 360, 468, 481
Шак 331
Шален С. 569
Шаль 27, 50, 446
Шарбе С. Б. 65, 186, 217
Шарлье 444
Шаронов В. В. 149
Шарпантье 283
Шафарик В. 64, 327, 541, 551
Шаффер 185
Швассман А. 299
Шведов Ф. Я. 303, 583
Швейкерт 388
Швейцер Б. Я. 12, 52
Швестка З. 569
Швиннер Р. 409
Шеберле 216, 225
Шейхцер И. 43

Шенрок А. А. 564
Шепли Х. 60
Шереметев Б. П. 63, 531, 576
Шефер Дж. 433, 460, 492
Шикард В. 46, 63, 474
Шиллинг Д. 37
Шипулин Ф. К. 512, 515
Шлихтер 501
Шмидт Ю. 50, 174, 251, 280, 329, 334, 352, 357, 358, 431, 442, 480, 541, 547, 558, 559
Шнеллер Г. 142
Шнуррер 562
Шортал 400
Шорыгин С. А. 29
Шпангенберг В. 451
Шредингер Э. 524
Шрейдер А. А. 484
Шретер И. 63, 540
Штауде Н. М. 56, 59, 73, 176, 186, 228, 237, 343, 251, 286, 327, 408, 567, 570, 574
Штепан В. Е. 184, 187, 215, 315, 430, 543, 545, 548, 549, 551, 552, 556, 558—560
Штернберг П. К. 54, 134, 243
Штютц 63
Шугаев 483
Шулейкин В. В. 496
Шульгоф Л. 28

Щапов А. П. 39

Эванс 440
Эвзелий Памфил 32
Эйдук Р. А. 555
Эйе 216
Эйлер Л. 381, 508
Эйнбу С. 476
Эйринг 291
Эйхенвальд А. А. 528
Эккерслей Т. 435, 436
Эллиэтт Д. 26, 158, 270
Эльви Г. 575
Элькин У. 54, 64, 133, 190, 243, 244, 269, 364, 368, 371, 372
Энгельс Ф. 41
Эпик Э. К. 12, 55, 56, 60, 81, 146, 181—183, 187, 203, 230, 233, 236, 238, 247, 255, 256, 278, 321, 328, 338, 340, 409, 415, 417, 478, 542, 547, 548, 550, 552, 554, 558, 559, 587, 589
Эпикур 41
Эплатон Э. 56, 60, 156, 431, 433, 436, 466
Эпштейн П. 390, 499
Эренберг 578
Эрман А. 49
Эрош 298
Эррулат Ф. 538
Эсклангон Э. 56, 65, 384, 528, 530
Эспинаал Н. 270

Юнг Р. 116, 580

Ягер К., де 61, 590
Яголим А. С. 206
Язлиев С. 323
Яккиа Л. 56, 60, 76, 136, 233, 240, 256, 277, 291, 368, 415, 416, 419, 420, 477
Ямамото И. 61
Ярдецкий В. 572
Ярмолюк В. А. 512, 515
Ястребцев В. В. 357
Яшнов П. И. 299, 308

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аберрация годичная 193, 194, 196
— объектива 142
— суточная 193, 195, 252
Абиссальные глубины 568
Адаптация 85, 129
— световая 85, 276
— темновая 85, 276
Адиабатическое сжатие 406, 407
Азимут направления метеоров 214, 215
Азимутальная вариация 175
Акустика болидов и метеоритов 518—532
Акустическое поле 525, 526
Анастигмат 143
Аномалия истинная 262—264
— средняя 262
— эксцентрическая 262
Аномальные метеоры 101
Антиапекс 176, 194, 215, 283, 549, 550
Антигелий 215, 550
Антирадиант 206
Апекс 172, 176, 194, 214, 215, 549, 550
Апекс-эксперимент 258, 271, 455, 550
Апланат 143
Апохромат 143
Аппульс 51
Аргумент перигелия 261, 264
Астероиды 20
Астробаллистическая область 398
Астрогеофизические процессы 473
Асферический компенсатор 143
Атласы звездные 116
Атмосфера Земли 67—76, 378
— —, движение метеоров 385—395
— —, защитная роль 378
Атмосферики 165, 166, 465
Афелийное расстояние 263
Афокальный компенсатор 143
Ахромат 143
Аэродинамическая тень 388
Аэродинамическое нагревание 388
Аэролит 26

Баллистические волны 380, 394, 401, 523, 527, 528, 530, 531
Бегущее эхо 437
Бинауральный эффект 520
Бинокуляр 130, 131
Блеск 86, 123
Болиды 16, 26, 54, 104, 280, 356, 370, 376, 377, 443, 444, 453, 473—496, 576—577
— дневные 17, 26, 482—484
— звуковые 280, 523—532
— электрофонные 468, 470
— яркие 26, 280
Большая полуось орбиты 261, 263, 269, 271
Бриллиантность изображения 142
Брокенский призрак 495
Бронтофонные явления 471, 472

Вектор скорости 196
Велограмма 243, 250, 371
Вибратор полуволновой 160
Вибрирующая камера 109, 120, 250
Вибрирующее зеркало 109, 120, 247, 250, 255
Вибрирующий телескоп 109
Взрывы в метеорах 281, 289—292
Вихревое сопротивление 381
Внешняя баллистика 379
Возбудители 89
Воздушная подушка 406, 409
Воздушные волны 382
Волновое сопротивление 383, 390
Волны Маха 380, 391, 402
Волокна 572
Вращающееся зеркало 109, 121, 288
Вращение метеорных тел 340—347
Вспышки в метеорах 281, 285, 289—292, 560
— метеорной ионизации 435—437
— слышимости радиопередач 431, 432
Вулканическая пыль 565, 568, 569, 572
Высвечивание 303, 336, 339, 434, 451
Высота исчезновения 218
— линейная 218
— однородной атмосферы 419
— появления 218
— радио 239
— фотографическая 240
Высоты метеоров 46, 47, 216—241
— —, зависимость от скорости 232—234
— —, — — элонгации радианта 236
— —, — — яркости 234—235
— —, космическая дисперсия 233
— — особых классов 240, 241
— телеметеоров 540, 542—544, 554—556
Вязкость кинематическая 383, 521

Газовая динамика 390
Геликоид 346
Гиперсейсмы 17, 458, 480, 515, 533, 535—537
— метеоритные 534
— метеорные 534
Гиперсенсибилизация 149, 301
Глаголизация 117, 118
Глория 495
Глубоководные отложения 568, 584, 585
Годичная вариация 172—174, 177, 213, 282, 551, 552
— — болидов 477
— — падений метеоритов 506
— — следов 455
— — телеметеоров 551, 552
Головная волна 390
Горизонтальные дальности 220
Гребешки 572
Громкость 519

Давление звука 519

Дальтонизм 313
Движение в сопротивляющейся среде 379—403
— тел с переменной массой 411, 415, 424, 425
Дебит космической пыли 568—570, 582, 590
Девиация 192
Деионизация 447
Децибелы 519, 520
Диаграмма направленности 152, 164, 168
Динамический диапазон уха 518
Динамическое сжатие 406, 407
Диск Рэлея 126
Дисторсия 143
Дифракционное рассеяние 494, 495
Дифракция 126
— радиоволн 155, 158—161, 164, 165
Диффузия следов 169, 451, 454, 455
Длина базиса 218
— пути 218
— —, зависимость от наклона 239
— —, — — яркости 238
— свободного пробега молекул 388, 567
— следа 446, 448
Длительность свечения 293, 294
Долгота восходящего узла 261, 264
— Солнца 263, 264, 266
Донное давление 381, 390
Доплеров свист 112, 154, 159, 161, 166, 167
Дорожка Кармана 395
Дракониды 137, 138
Дрейф следа 169, 446, 453, 455, 456
Дробление метеоритов 353—354
— метеоров 348—353
Дюриметр 109

Журнал наблюдений 125, 126

Закон Бунзена — Роско 122
— Вебера — Фехнера 84
— Вина 317
— сопротивления 376, 383, 387, 388, 411, 498
— Стефана — Больцмана 317, 406
— торможения 364, 376, 408
Звездная величина 26, 273
— — абсолютная 418—420
— — болометрическая 319, 324
— — видимая 123
Звездный дождь 18, 19
Звуковое излучение болидов 528—530
Звуковой барьер 383, 400
Звуковые волны, отражение в стратосфере 521
— —, распространение 522, 526, 527
Земная точка 95, 188
Зенитная вариация 175, 177
Зенитное притяжение 192, 193, 195, 251
Зернистость изображения 148
Зодиакальный свет 572, 573
Зона вторичной слышимости 528
— испарения 510
— молчания 528
— реакции 414
Зоны видимости 81, 82
— Френеля 114, 158, 159, 161
Зрачковый рефлекс 78
Зрачок выхода 127
Зрительный пурпур 129

Излучение метеора 324
Изосейсты 535, 538, 539
Изофоны 525, 538, 539
Импрегнация 492
Импульсные системы 158, 162—166
Инверсия температуры 71, 567
Индекс активности 178
Индуцированный заряд 471
Инерция зрения 86
Интеграл площадей 50
Интегралы Френеля 159
Инфразвуки 518
Ионизация метеорная 56, 101, 152, 409, 427—441
— — индивидуальная 428
— — массовая 428
— — термическая 441, 447
— — ударная 441, 447
— — ультрафиолетовая 44
Ионосфера 70, 71, 570
Ионы 434, 435
Иррадиация 86, 101, 147—149, 278, 335
Искусственные метеоры 384, 385, 398, 399
Испарение метеоров 415
Истечение электричества 459, 460

Кавернизация 416
Кавитация 392, 394
Камера «Супершмидт» 60, 110, 137, 138, 140
Карты для наблюдений метеоров 115, 116
Каталоги болидов 476, 477
— радиантов 208—211
Классификация метеоров 106, 107
Коагуляция 494
Количество освещения 274
Колориметрия 313, 314
Кометы 50, 51
Компоненты метеорного комплекса 354
Контрастная различимость 129
— чувствительность 84
Контрастность 147
Контурные наблюдения 229
Концентрация 204
Кора плавления 353, 395, 398
Корпускулы 67
Космическая пыль 25, 561—590
Космогенные сейсмы 533, 535
Коэффициент аккомодации 410, 418, 422
— внимания 177, 178
— восприятия 177
— восстановления 401
— вязкости, кинематический 521
— диффузии 439, 440
— поглощения 331
— полезного действия ионизации 440
— — — световой 276, 418, 420, 440
— прозрачности атмосферы 565, 566
— проницаемости 410
Коэффициент рекомбинации 434, 435
— сопротивления 412
— теплопередачи 412, 413
— формы 105, 381—383, 386, 387, 393—395, 412, 414—416
— экстинкции 496
Кривая видности 88
Критерий Бесселя 219
— K 269
— лямбда — пси 196
— одновременности 216
— Слюсарева 144
— Федынского — Лыткиной 553
Критическая частота 72
Критический уровень 70
Круг радиантов 188
Кувыркание метеорных тел 393
Культ метеоритов 32, 33
Куриная слепота 79

Ламинарные движения 392—394
Легенды о метеорах 31—36, 38—40
Линия узлов 261
Лобовое сопротивление 381

Люкс 273, 274
Люмен 273, 274

Магнитная проницаемость 319
Макрометеоры 280
Максимум яркости 280—292
Малые тела 15, 25
Марки времени 249
Масса метеоритов, дошедшая 505
— —, наибольшего экземпляра 505
— — общая 505
Масса метеорных тел 374, 417—426
— — —, изменение в полете 421, 423
— — —, общий привнос на землю 423
— — —, радиоопределения 425
Мегаметеоры 280
Международные свечи 273
Межзвездная материя 20—22
Мезосфера 71
Мениксовый компенсатор 143
— телескоп 130
Мерцание метеоров 285—293, 333
Метеор 15, 25, 26, 67
Метеорики 112
Метеоритика 23, 24
Метеоритная пыль 561
Метеоритные дожди 358, 359, 501—503
— кратеры 18, 510—515
Метеориты 17, 23, 25, 497—517, 590
—, попадание в людей 507
—, пробивная способность 509, 510
—, проникновение в почву 507—510
Метеориты:
Айова 359
Барботан 475
Богуславка 391, 396, 405, 481
Бугальди 397
Венгерово 479
Вилламетте 396
Жовтневый Хутор 353, 479, 501
Ичкала 469
Кашин 530
Крымка 538
Кузнецово 469
Кукшин 532
Кунашак 469, 479, 501
Леоновка 65
Леричи 359, 503
Л'Эгль 63, 501, 503, 538
Нортон Каунти 493, 505
Орвинио 442
Оханск 340, 442, 479
Палласово Железо 43, 44, 63
Пантар 493
Пасамонте 354, 442, 465, 500
Первомайский Поселок 154, 465, 469, 479, 501, 503
Пултуск 319, 359, 501, 503
Репеев Хутор 393, 397
Саратов 319, 359, 479, 501
Сихотэ-Алинский 18, 26, 56, 65, 275, 325, 354, 358, 396, 458, 479, 483, 491, 495, 500—503, 505, 506, 510, 512, 513, 515, 516, 565, 581, 583, 588
Старое Песьяное 346, 479
Телеутское озеро 65, 325, 354, 537
Томаковка 65, 217, 479, 531
Тунгусский 26, 37, 56, 65, 74, 105, 237, 275, 325, 458, 479, 480, 482, 490, 495, 505, 510—513, 515, 516, 522, 525, 527, 531, 532, 534—536, 563—566, 571, 577, 590
Уэстон 370
Хмелевка 227, 276, 469, 479, 480, 526
Червоный Кут 17, 479, 532
Шарлотта 319, 397
Метеорная астрономия 23, 24, 45, 53
Метеорная астрофизика 23, 24, 45
— геофизика 23, 24, 45, 56
— зона 71
— корона 427, 429, 430
— плотность 179, 550, 551
— пыль 25, 561, 569, 570, 575—583, 587
— физика 23, 24, 45, 56
Метеорные близнецы 348, 352, 355, 356
— комплексы 348—355
— — атмосферные 350—353
— — доатмосферные 350, 354, 355
— облака 361, 362, 451
— плоскости 208, 219
— потоки:
Андромедиды 40, 43, 51, 54, 63, 64, 132, 174, 179, 318, 356, 360, 368, 372, 458
Ариетиды 258, 270, 271
Боотиды 65, 174, 211, 247
Виргиниды 238, 240, 255, 268
Гамма-Аквариды 174, 195, 232, 233, 239, 258, 368
Геминиды 159, 169, 174, 195, 240, 247, 255, 256, 258, 268, 270, 295, 303, 324, 358, 368, 372, 432, 552
Геркулиды 338, 552
Дельта-Аквариды 174, 211, 239, 247, 251, 252, 255, 258, 268—270, 324, 461
Драконииды 65, 93, 98, 113, 137, 138, 157, 167, 179, 186, 195, 198, 235, 240, 247, 251, 256, 258, 270, 303, 318, 320, 329, 355, 368, 428, 431, 461, 552, 578, 579
Камелопардиды 174, 421
Каприкорниды 211, 232
Кассиопеиды 55, 136, 421
Квадрантиды 160, 174, 244, 247, 255—258, 268, 270, 461
Леониды 40, 42, 48—50, 55, 62—64, 93, 100, 115, 116, 133, 134, 166, 174, 185, 204, 232, 233, 237, 239, 240, 250, 255, 304, 320, 338, 355, 357, 368, 372, 405, 460—462, 465, 585
Лириды 48, 51, 116, 174, 185, 203, 204, 228, 240, 243, 255, 355, 360, 552
Орионииды 65, 169, 174, 204, 228, 232, 233, 237, 240, 255, 304, 324, 372, 421, 477, 552
Пегасиды 162, 552
Персеиды 40, 48, 52, 53, 55, 64, 92, 115—117, 136, 144, 166, 174, 177—179, 181—183, 185—187, 195, 198, 203, 204, 211, 229, 232, 233, 238—240, 247, 252, 255, 258, 269, 270, 295, 303, 320, 328, 356, 360, 362, 368, 372, 373, 417, 421, 433, 541, 552, 553
Сагиттариды 45
Скорпииониды 247, 255, 268
Тауриды 65, 174, 232, 240, 243, 256, 258, 269, 270, 324, 477, 552
Урсиды 258
Цетиды 211, 270
Цигниды 204, 211, 240, 253, 256, 269
— — дневные 271
Метеорные сгущения 359, 360
— тела 15, 25
— частицы 25
— шарики 25, 398, 516, 567, 580—586, 588, 589
Метеорный жезл 109, 125
Метеорный импульс, распространение 466, 467
— круг 202, 205, 206, 219
— патруль 145, 146
— поток 26
— рой 26, 356—358
— свист 112
— след 17, см. также Следы
— фон 173, 178, 181, 182
Метеороид 26
Метеорологическая теория метеоров 41, 45, 49
Метеоромагнитные явления 105, 457, 460—463
Метеороскоп

Метеоротермические явления 105, 324—326, 480
Метеороэлектрические явления 105, 457—459, 472
Метеоры аномальные 101
— двойные 349, 354
— кратные 352—354
— обычные 26, 280
— парные 354, 355
— расщепляющиеся 351
— туманные 357, 569, 570
— яркие 26
Метод предельных звезд 92
Методы наблюдения метеоров:
визуальные 108, 109, 115—131
инструментальные 109—114
колориметрический 111
метеоромагнитные 112
метеороэлектрические 112
полуинструментальные 109
радиолокационные 113, 114, 158, 249
радиотелефонные 112, 113
радиофизические 152—170, 249
спектрографический 110
фотографические 109, 110, 132—151
фотоэлектрический 111, 112
Методы определения высот метеоров:
геометрические 217, 218
двухсторонние 218—225
многосторонние 225—228
Блажко С. Н. 225, 226
геодезический 227
односторонние 218, 227, 228
Гофмейстера 228
Иессе 228
Ньютона Г. 227, 228
угловой скорости 228
Штауде Н. М. (I) 228
Штауде Н. М. (II) 228
приближенные 218
статистические 218, 229
Герасимовича Б. П. 229
Тейхгребера 229
точные 218
тригонометрические 218—225
Брандеса (I) 220, 221
Брандеса (II) 220, 221
Брандеса (III) 221
Гейса (I) 222
Гута 223, 224
Кетле 222, 223
Литтрова 222
Ньютона Г. 223
Ольберса 221
Федынского В. В. — Станюковича К. П. 224, 225
физические 217, 218, 229, 230
акустический 230
газовых следов 230
пылевых следов 230
радиолокационный 229, 230
спектров 230
Станюковича К. П. 230
Методы определения масс метеоров:
баллистический (Уиппла) 418, 419
динамический (Уиппла) 419, 420
фотометрический (Яккиа) 419, 420
Методы определения радиантов (199, 201—208):
Болина 205, 206
двухсторонние 202
Клейбера 205
Клейбера для многих наблюдений 206
Миллмана — Хоффлейт 207
многосторонние 202, 203
Ниссля 206
Федынского В. В. 207, 208
Цераского В. К. 208
Методы определения скоростей метеоров (246—252):
астрономические 246, 250—252
зенитного притяжения 251
периода обращения 250
суточного смещения 252
суточной аберрации 252
— вариации 250, 251
безынструментальные 246, 247
сравнения 247
средней угловой скорости 246
условной шкалы 246, 247
кинематические 246
полуинструментальные 247—249
вибрирующего зеркала 247, 248
визуального обтюратора 248
лабораторной шкалы 248
многогранного зеркала 248
стандартных угловых скоростей 248
хронографа 248, 249
Цераского В. К. 247
физические 246, 249, 250
обтюратора 249, 250
радиолокационные 249
смешанный 249
Методы определения торможения метеоров (366—378):
Галле 368
графический 371
индивидуальные 366
массовые 366
Ниссля 368—371
обтюратора 371—374
радиолокационные 377, 378
статистические 366, 375—377
разностный 375, 376
розы скоростей 375
статистики высот и скоростей 376
точки задержки 376, 377
Методы определения цвета метеоров (314—317):
визуальные 314, 315
дальтоников 314, 315
сравнения 314
инструментальные 315—317
интегрирования спектральных линий 316
продольного астрографа 316
светофильтров 315, 316
цветной фотографии 316, 317
цветовой температуры 316
полуинструментальные 315
светофильтров 315
телескопический 315
Мидель 380, 393
Микрометеориты 66, 387, 416, 422, 540, 548, 568, 570, 582, 586, 590
Микрометеоры 280
Модуль расстояния 277
Модуляция 158
Момент прохождения перигелия 262, 264, 265
Мощность астрографа 141
— пиковая 165
— принятого сигнала 165
Мультиплеты 302, 304, 307, 318

Наблюдения метеоров базисные 109
— — велографические 109
— — двухсторонние 108
— — многосторонние 108
— — односторонние 108
— — параллельные 108
— — телескопические 126, 127
Наклонение 261, 263
Насыщенность цвета 313, 314
Натрий метеорный 574, 575

Нистагм 79
Нутация оси вращения 343, 344

Область задержки 423
— Миликена 567, 568
— Стокса 568
Обработка наблюдений первичная 125, 126
Обтюратор 54, 120, 133, 249, 250
— визуальный 248
Огни Эльма 26, 459
Озон 459
Определение радиантов аналитическое 205—208
— — графическое 205
— —, точность 203, 204
Оптическая плотность максимальная 146, 147
Оптическое наложение радиантов 190
— сгущение 176
Орбита оскулирующая 261
Орбиты метеоров 48—50, 259—272
— —, астероидная группа 268
— —, земная группа 268
— —, пример определения 266, 267
— —, результаты определения 267, 271
— — связь с кометами и астероидами 269
Ортоскопический объектив 143
Освещенность 79, 123, 275
— мгновенная 123, 273
— от следа 490
— энергетическая 325
Оседание пылинок 496, 567—569
Острота зрения 83
— — нониальная 83
Отражение звуковых волн 521
— молекул 387
Оффускации 126
Очерченность метеоров 559
Ошибка неодновременности 116—118
— поворота 116—118
— положения метеора 116—118
— предпочтения 115, 124
— смещения 116—118
— спроса 116—118
Ошибки наблюдений метеоров 115—118, 123, 124, 546, 547
— — — систематические 123

Параллакс метеора 218
Параллактическое смещение 219
Параллактический круг 219
Параметр орбиты 263
Парусность 366
Паспортизация наблюдателя 125
Пачки метеоров 115
Перигелий 261—264
Перигелийное расстояние 263, 264
Пептизация 494
Плавление метеорных тел 410, 415
Плотность импульса 521
— метеорных тел 366
Плотность пути метеора на пластинке 287
— следа 445, 449
— электронов в следе 438
Площадь радиации 189, 190
Поглощение звука 520—523
— света 561—563, 565, 570, 587
Пограничный слой 389, 403
Показатель массы 425
— цвета 313
— — специальный 316
Поле зрения 128
— приема 159
Полуночный эффект 76
Поляризация метеорных следов 168
Полярные сияния 67, 69, 430, 463, 470, 471
Поперечная нагрузка 386
Поперечник метеора 332—337
— — линейный 332—337
— — угловой 332—337
Поправки радианта 190—196
— скорости 252—254
— — за годичную аберрацию 254
— — — притяжение Земли 253
— — — сопротивление воздуха 253
— — — суточную аберрацию 253, 254
Порог контрастности 84, 85, 127, 128
Пороговые раздражения 84
Потоки метеорных тел 20, 25
Прецессия оси вращения 343—347
Приближение Коши 159
Принцип Ольберса 219
Программа-максимум 108
Продолжительность видимости следа 445, 451, 453
Продолжительность полета метеоров 104, 119
— — —, зависимость от цвета 324
— — —, — — яркости 556, 557
— — — критическая 121, 122
Прозрачность оптики 141, 142
Проницающая сила 128, 129
— способность 141
Просветление оптики 142
Противооореольность 149
Прямолинейность траектории 135, 136
Псевдометеоры 96
Псевдотелеметеоры 548
Пульсация яркости 291, 292
Пылевая атмосфера 572, 573
Пьезоглипты 395

Равнозрачковое увеличение 127
Радиант 48, 52, 53
— видимый 190, 194, 195
— гелиоцентрический 193
— геоцентрический 193, 194, 196, 265, 266
— исправленный 193, 195, 253
— истинный 194, 196, 265
— космический 193, 243, 265
— топоцентрический 193, 253
Радианты болидов 477, 478
— метеоров 185—215
— — дневные 188
— — кометные 266
— — паразитные 190
— — побочные 190
— — поточные 190
— — спорадические 187, 190
— — стационарные 187
— — эклиптикальные 190
— телеметеоров 552—554
Радиоизлучение метеоров 112, 428, 464—466
— — собственное 166
Радиолокация метеоров 152, 156—166, 239, 377, 378, 431, 432, 435—439
Радиометеорные явления 105, 428, 464
Радиометеоры 153, 163
Радиометрическая шкала 319
Радиорадианты 188, 244
Радиоскорости 257, 258
Радиоэффект 112
Радиоэхо 153, 157, 163, 164, 428, 429, 436
Радиояркость 294, 295
Развертка 153
Размеры метеоров линейные 332—337
— — —, изменение в полете 423, 424
— пылинок 565, 568—570
Разрешающая способность 127, 140, 141
— — фотоэмульсии 148
Ранг активности 179
Распределение метеоров по яркости 180—184

Рассеяние света 570
Расстояние до метеора геоцентрическое 218
— — — топоцентрическое 218
Регмаглипты 395, 396, 402, 416
Редукция яркости 93
Рекомбинация 169, 336, 339, 434, 435, 445
Рой метеорных тел 25, 53

Сверхболиды 26, 104, 280
Светимость 273
Светлые ночи 564
— полосы 573, 574
Световой поток 273, 274, 277
Светосила 129, 139
Светочувствительность 146
Свечение метеоров 404, 405, 407, 417
— ночного неба 72, 73, 574
Сдувание капель с метеоритов 587
Сейсмические волны 533
Серебристые облака 488, 564, 570—572
Сетка Лорещони 116
— Цераского 116
Сила Магнуса 192, 344
— поля приема 159, 432
— света 231, 277, 286, 288, 410, 415, 547
— — болидов 480, 481
Силикаглас 25, 514
Система высот 231
— Шмидта 140, 144, 145
Скоролеты 241, 244, 255
Скорости метеоров 46, 54, 159—161, 242—258, 419—425
— — гиперболические 54, 55, 242—244, 256, 271
— телеметеоров 545
Скоростной напор 383
Скорость астробаллистическая 384
— атмосферная 246, 377
— галактическая 254
— гелиоцентрическая 193, 246, 250, 254, 256
— геоцентрическая 193, 194, 245—247, 251, 254, 266
— доатмосферная 374
— исправленная 253
— космическая 254
— мгновенная 193, 245, 252
— падения метеоритов 499—501
— средняя 245
— топоцентрическая 253
Следы газовые 306, 307, 333, 339, 438, 442—456
— голубые 448, 450
— ионизационные 435, 444
— ночные светящиеся 444
— пылевые 17, 105, 444, 473—496, 565, 570, 577
— самосветящиеся 444
— стойкие 451, 453, 454, 456
— электронные 333, 435
Слепое пятно 79
Смещение радианта 190, 195, 252
Сопротивление воздуха 191, 192, 380—385, 405, 497
Спектральная чувствительность 148, 149
Спектральный агрегат 301
Спектрограф метеорный 309
Спектрографирование метеоров 55, 110, 298—302
Спектроскоп окулярный 109
— прямого зрения 109
Спектроскопия визуальная 298
— — телеметеоров 307, 308
Спектры метеоров 297—312, 560
— — вращательные 303
— —, зависимость от скорости 303, 304
— — искусственных 308
— — СССР 309—312
— следов 306, 307
Сплав Вуда 415, 416
Спорадический E-слой ионосферы 157, 167, 428, 431
Спутная струя 389
Среднее суточное движение 262
Стандартная атмосфера 75, 76
Статистика метеоров 362, 363
Стационарный метеор 94, 188, 189, 212
Степень сопротивления 394
Стильб 274
Стратосфера 73, 580
Страты 337, 446
Стробоскоп 109
Структура метеора 337—339
— потока 362
— следа 339
Суточная вариация болидов 477
— — метеоров 171, 172, 243, 250, 251, 431, 436
— — —, длины 212, 213
— — —, яркости 282, 283
— — падений метеоритов 506
— — следов 455
— — телеметеоров 551
Сфера видимости 94
Сферические сгустки 454

Тангенциальная сила 386
Тахисейсмические явления 533
Тахистоскоп 248
Тектиты 25
Телескопические метеоры (телеметеоры) 26, 55, 280, 334, 335, 540—560
— —, годичная вариация 551, 552
— — двойные 560
— — кратные 560
— —, ошибки наблюдений 546, 547
— —, радианты 552—554
— —, распределение зенитных расстояний 594
— —, — направлений 545, 549, 550
— —, — скоростей 545
— —, суточная вариация 551
— —, часовые числа 550, 551
— —, численность 547, 548
— —, яркость 547
Температура адиабатическая 401
— воздушной подушки 406
— газокинетическая 317
— Дебая 387
— излучения 317, 319
— метеорных тел 319, 392
— метеоров 316—321, 324, 406, 407
— —, зависимость от скорости 320
— торможения 400, 401
— цветовая 313, 317
— электронная 317
— эффективная 317
Теорема Клейбера 95, 213
Тепловое равновесие 318
Тепловой барьер 384, 392
— поток 403, 414
Термическая ионизация 336
Термические напряжения 403
Термодинамический парадокс 69, 70
Торможение метеоров 245, 364—378, 421, 422, 424
— — абсолютное 366
— — линейное 366—368, 404
— — относительное 366—368
— — угловое 122, 123, 366—368
Точка задержки 376, 377
— исчезновения 197
— появления 197
— фиксации 80, 83
Траектории болидов 478, 479
— метеоров 219, 259—261
Траектории метеоров, искривление 343, 346, 559
Траектория атмосферная 259, 497—499

Траектория видимая 219, 259
— гелиоцентрическая 259
— геоцентрическая 259—261
— истинная 259
— незамкнутая 260, 261
— топоцентрическая 259
Тропопауза 74
Тропосфера 74—76
Трубка Траубриджа 339, 446, 447
Трубки кругового обзора 155, 156
Турбуленция 169, 392, 393, 395, 446, 571

Угловая длина метеоров 99, 105, 212, 213, 557, 558
— — — критическая 121, 122
— скорость метеоров 119—123, 246—249, 557
— — —, стандарты 121
Угловое торможение метеоров 122, 123, 366—368
Ударные волны 380, 383, 384, 389, 390, 400, 411 510
Ультразвуки 518
Ультрателеметеоры 26, 280
Уравнение Бернулли 395
— Кеплера 262
— Лапласа 409
— потери массы 412, 419
— светимости 412
— скорости 409
— торможения 365, 366, 412, 418
— Уиппла 410
— Фишера 412, 419
— Хоппе 411
— Эйнштейна 449
— Яккиа 419
Ураниловое стекло 109
Уранолит 26
Ускорение 245

Фактор Клейбера 95
Федниги метеорные 113, 428, 432—434
Физическая теория метеоров 55, 76, 404—416
Физическое сгущение 176
Фиктивные радианты 190, 199, 204, 205
Фиолетовый ореол 101, 332, 441, 446
Фон 465, 519, 520
Форма лунки (воронки) 508, 509
— метеоров 327—332
Формула Гершеля — Ньютона 250
— Гюгонио 406
— Скиапарелли 251
— Стокса 395
Фот 274
Фотографирование метеоров 243, 244
Фотографическая вуаль 147
— широта 147
Фотографическое рассеяние 147, 148
Фотоионизация 449
Фотоматериалы 146—151
Фотометр метеорный 109
— радиоактивный 109
Фотометрия абсолютная 289
— фотографическая 286—289
Фотометрическая ошибка поля 139
Фотометрические шкалы 274
Фотоумножители 295, 296
Фотоэлектрические наблюдения метеоров 295
Функция яркости 177, 183, 184

Хазма 30, 474
Хвост болида 16
Хроматическая разница 78
Хронаксия 86
Хронограф 115

Цвет метеоров 313—317, 320—224
— —, азимутальная вариация 322, 323
— —, годичная вариация 323, 324
— —, изменения 321, 322
— —, суточная вариация 323
— следов 455
— телеметеоров 558
Центробежная сила 386
Цепные падения 503, 504

Часовые числа метеоров 92, 171, 173—180, 182, 251, 550, 551
Численность телеметеоров 547, 548
Число Маха 381—384, 387—390
— Рейнольдса 382—384, 400
— Прандтля 384
Чистота цвета 313, 314

Шарики метеорные — см. Метеорные шарики
Широкоугольность объектива 139
Широтная вариация 174, 175, 177
Шкала высот 233, 419
— громкости 519, 520
— интенсивности землетрясений 536
— Остгофа 314
— Росси — Канкани — Фореля 536
Шумовая температура 165
Шумовой фактор 165

Экзосфера 70
Эклиптикальные метеорные потоки 268, 269
Эксцентриситет 261, 264
Электромагнитные явления 457—472, 480
Электронная концентрация 169, 170, 425
Электроны 434, 435
Электрофонные болиды 468, 470
— явления 104, 467—470
Элементы орбиты 261—264
— траектории 259
Эллипс рассеяния 350, 501
Элонгация от апекса видимая 194, 266
— — — истинная 194, 263, 266
— — радианта 94
Энергия излучения 331
— испарения 422
— кратерообразования 516, 517
— метеоров, общая 425, 426
Эффект Гершеля 149
— фазы 327, 332
— Черенкова 523
Эффективность камеры 139

Явление Галисо 89
— Костинского 149
— Магнуса 342, 343
— Пуркинье 89, 318
— Росса 149
Ядро метеора 337
Яркость абсолютная 231, 276—278, 288
— болометрическая 294
— видимая 26, 123, 124, 127, 274, 277—279, 286, 332, 547
— мгновенная 123
— метеоров 273—296
— —, зависимость от угловой скорости 283
— —, изменения 283—286, 288, 334, 341, 345, 439
— —, связь с температурой 293
— поверхностная 78, 84, 85, 126—129, 274, 279
— следов 439, 449—451
— слепящая 86
— электромагнитная 295