

Муртазов А.К.

**Экология
околоземного
космического
пространства**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 502.7
ББК 22.6
М 91



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 04-02-30051д*

Муртазов А. К. **Экология околоземного космического пространства.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 304 с. — ISBN 5-9221-0508-6.

В книге рассмотрены физические основы экологии околоземного космического пространства (ОКП), представлены результаты исследования воздействий техногенных и естественных процессов на состояние ОКП, реакции последнего на них и обратного воздействия на биосферу. Исследованы условия равновесия ОКП как энергетической системы. Представлен анализ современных методов мониторинга состояния ОКП как средства изучения процессов в нём и взаимосвязей их с биосферой. На основе экологических данных проведён анализ современного состояния проблемы охраны и рационального использования ОКП.

Для широкого круга специалистов в области экологии, астрономии, геофизики, биологии и медицины, а также для аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

Научное издание

МУРТАЗОВ Андрей Константинович

ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Редактор *В.Д. Боксер*

Оригинал-макет: *В.В. Худяков*

Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

ЛР № 071930 от 06.07.99. Подписано в печать 16.06.04. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19. Уч.-изд. л. 19.

Тираж 300 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с диапозитивов

в ОАО «Чебоксарская типография № 1»

428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 5-9221-0508-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2004

© А. К. Муртазов, 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Околосземное космическое пространство как глобальная составляющая окружающей среды	8
1.1. Поля и заряженные частицы в околосземном пространстве	9
1.2. Внешняя часть околосземного космического пространства	21
Глава 2. Осколки естественных космических тел и техногенные отходы в околосземном космическом пространстве	29
2.1. Основные источники естественного мусора в околосземном космическом пространстве	29
2.2. Отходы техногенного происхождения в околосземном космическом пространстве	43
Глава 3. Физические основы экологии околосземного космического пространства	53
3.1. Физические процессы в околосземном пространстве и их связь с процессами в биосфере	53
3.2. Естественные тела в околосземном пространстве	82
3.3. Воздействие техногенных отходов на состояние околосземного космического пространства и процессы в земной природе	103
3.4. Околосземное космическое пространство как открытая энергетическая система	120
Глава 4. Мониторинг околосземного космического пространства	132
4.1. Цели и задачи мониторинга околосземного пространства. Анализ современных возможностей мониторинга околосземного космического пространства	132
4.2. Разработка метода физического моделирования оптических характеристик космических объектов как основы для функ-	

ционирования систем оптического мониторинга околоземного космического пространства	152
4.3. Оптические свойства космического мусора в ОКП	158
Глава 5. Охрана и рациональное использование околоземного космического пространства как новой экологической ниши земной цивилизации	194
5.1. Развитие методов и средств охраны и рационального использования околоземного космического пространства в процессе его освоения	194
5.2. Современные методы и средства предотвращения «космической опасности» для человечества	208
Заключение.	217
Приложение А. Опасные пролёты астероидов вблизи Земли	221
Приложение Б. Экология космоса. Тематический словарь	240
Список литературы	282

Введение

В последнее время как результат техногенной деятельности человеческой цивилизации со всей остротой встала проблема глобальной экологии — проблема влияния загрязнения околоземного космического пространства на процессы, происходящие как в земных экосистемах, так и в биосфере в целом.

В связи с этим появилась потребность расширения понятия окружающей среды, которая до сих пор определялась в основном как ближайшая среда обитания и производственной деятельности человека — водный и воздушный бассейны, почва, недра, а также создаваемая самим человеком техногенная среда.

В учении о биосфере по В.И. Вернадскому, являющемся общей мировоззренческой основой всего естествознания XX века, биосферно-космической картиной мира, биосфера Земли рассматривается как единая глобальная экосистема. Естественно, окружающей средой для такой экосистемы является околоземное космическое пространство (ОКП).

Сегодня мы находимся на пороге перехода биосферы в новое состояние — ноосферу, — когда её развитие будет определяться не столько естественными стохастическими процессами, сколько направляющей человеческой деятельностью.

Непосредственно наблюдать результаты такого перехода возможно как раз в окружающей биосферу среде — ОКП, где в последние десятилетия XX века весьма отчётливо проявились последствия антропогенной деятельности. Причём, вне зависимости от конкретных путей развития человечества и его космических исследований расширение масштабов техногенной деятельности в космосе уже требует решения проблем загрязнения околоземного пространства с тем, чтобы комплексно решать вопросы охраны непосредственно природной среды.

В связи с этим проблема изучения процессов естественной и техногенной природы в ОКП, их воздействия на само околоземное пространство и биосферу превратилась сегодня в одну из фундаментальных проблем как для наук, изучающих Вселенную, так и сугубо «земных» наук, объединённых экологией околоземного космического пространства.

В своей деятельности автор исходил из идеи, что экология ОКП как наука имеет своей целью исследование связей околоземного пространства с биосферой (для которой оно является окружающей средой). В связи с этим задачей экологии ОКП является исследование процессов в ОКП, которые происходят под действием как внутренних, так и внешних естественных и антропогенных воздействий и всего комплекса вытекающих отсюда взаимодействий, воздействий процессов в ОКП на процессы в биосфере (и наоборот) и, вследствие этого, прогноз состояния ОКП и параметров биосферы, зависящих от этого состояния.

Таким образом, предметом экологии ОКП являются его физическое состояние и процессы, происходящие в нём под действием различных, обуславливающих это состояние, факторов:

1. Физическое состояние ОКП весьма тесно связано с воздействиями на него Солнца.
2. Немаловажную роль на процессы в ОКП и биосфере играют космические лучи высоких энергий, приходящие из галактической среды.
3. Взаимодействие ОКП с межпланетной пылью, веществом комет, метеорами, мини-кометами и т. д. оказывает как прямое, так и опосредованное влияние на состояние ОКП и биосферы. Кардинальным образом изменить состояние ОКП и биосферы может взаимодействие их с космическими телами достаточно крупных размеров.
4. Процессы, возникающие в ОКП в результате техногенных воздействий различных видов, нарушающих его равновесие. К ним можно отнести различные виды техногенных излучений, искусственные космические объекты и техногенный мусор, остатки ракетного топлива и т. д.

Весьма актуальным является вопрос об устойчивости ОКП под влиянием естественных и техногенных воздействий, тесно связанный с наличием в ОКП обратных связей, способных компенсировать эти воздействия и вернуть его в состояние динамического равновесия. Биосфера имеет информационную ёмкость, на двадцать порядков превосходящую информационную ёмкость окружающей среды, и примерно на такую же величину большее количество обратных связей, обусловленных наличием биоты. Следовательно, для необратимого выхода ОКП из состояния равновесия требуется значительно меньшая энергия воздействия на него.

Отсюда следует необходимость определения и дальнейшего контроля уровней воздействия на ОКП, превышение которых

может необратимо вывести его из состояния динамического равновесия и изменить ход процессов в биосфере.

Данный подход определил в итоге структуру настоящей книги.

1. Физические основы экологии ОКП: анализ физических процессов в ОКП, обусловленных различными факторами естественного и техногенного происхождения; исследования воздействий техногенных и естественных процессов на состояние ОКП, реакцию последнего на них и, далее, обратного воздействия на биосферу. Это касается как физики процессов различных взаимодействий в ОКП, так и процессов, вызванных попаданием в ОКП тел естественного («космическая опасность») и техногенного происхождения. Исследование условий равновесия ОКП как энергетической системы, что наиболее важно для определения критических параметров его состояния.

2. Анализ современных методов мониторинга состояния ОКП как средства изучения процессов в нём и взаимосвязей их с биосферой. Здесь автор наибольшее внимание уделяет оптическим методам мониторинга естественного и, главным образом, техногенного мусора в ОКП. Контроль техногенного состояния ОКП — весьма актуальная современная проблема.

3. Анализ современного состояния проблемы охраны и рационального использования ОКП в свете вопросов его экологии. Автор включил сюда достаточно специфический вопрос о расширении экологической ниши человеческой цивилизации, во многом, по его мнению, связанный именно с экологией ОКП.

Все исследования, проведённые здесь, были выполнены с целью показать возможности объединения большого числа областей знания, изучающих состояние системы «ОКП–биосфера», в единую фундаментальную науку — экологию околоземного космического пространства.

Автор глубоко признателен члену-корреспонденту Российской академии образования профессору А. П. Лиферову, благодаря инициативе и поддержке которого были начаты и выполнены настоящие исследования.

Глава 1

ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО КАК ГЛОБАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Околоземное космическое пространство (ОКП) представляет собой глобальную окружающую биосферу нашей планеты. Зону его действия современные авторы определяют по-разному, в зависимости от решаемых ими задач. Многие исследователи считают, что ОКП можно продлить до границы сферы действия Земли (930 тыс. км) или даже до орбит ближайших планет: Венеры и Марса. Чаще всего — это область от слоёв нейтральной земной атмосферы (точнее, нижних орбит зоны пилотируемой космонавтики $\approx 160\text{--}200$ км — *Левантовский*, 1974) вплоть до лунной орбиты.

Автор при обсуждении вопросов экологии ОКП в этой книге ограничивает область пространства, занимаемую ОКП, озоновым слоем снизу (≈ 25 км) и орбитой Луны ($\approx 4 \cdot 10^5$ км) сверху общим объёмом до 10^{18} км³, поскольку процессы именно здесь оказывают определяющее влияние на живые организмы Земли, биосферу в целом.

В состав околоземного космического пространства входят верхние слои атмосферы, ионосфера, магнитосфера с радиационными поясами, зоны нахождения отходов естественного и техногенного происхождения. Его пронизывают гравитационные, геомагнитное, геоэлектрическое и межпланетные магнитные поля, солнечный ветер, потоки заряженных частиц солнечного и галактического происхождения. В ОКП попадают кометы, миникометы, астероиды и их осколки, метеорные потоки, межпланетная космическая пыль и т. д. Взаимодействие компонентов ОКП между собой вызывает сложные обменные процессы, оказывающие как непосредственное, так и опосредованное влияние на биосферу Земли, воздействуя в той или иной степени на ход физических, биологических, эволюционных процессов в живой и неживой природе.

Несомненно, главным поставщиком энергии в ОКП является Солнце, под воздействием которого происходит подавляющее число процессов в системе Земля–ОКП.

Мощность солнечного излучения, падающего на границу ОКП и межпланетной среды, составляет $\pi R_3^2 I = 1,7 \cdot 10^{17}$ Вт;

$$I = (1367 \pm 3) \text{ Вт/м}^2, \quad (1.1)$$

где I — солнечная постоянная, естественные изменения которой не превосходят 0,1%; R_3 — радиус Земли.

Средний, поглощённый поверхностью и атмосферой, поток солнечного излучения у поверхности Земли на единицу её площади составляет $\varepsilon = 240 \text{ Вт/м}^2$.

Этот поток согласно закону Стефана-Больцмана и определяет эффективную температуру на поверхности Земли

$$\varepsilon = \sigma T_{\text{ef}}^4. \quad (1.2)$$

В отсутствие атмосферы она составляла бы 255 К или -18 °С. Однако, реальная средняя температура Земли составляет 288 К (15 °С) и обусловлена парниковым эффектом, доля которого составляет соответственно 150–160 Вт/м² (Будыко, 1978).

Принято считать, что существующее среднее распределение падающей на Землю солнечной энергии по различным генерируемым им макроскопическим процессам в ОКП и на планете совместно с заданием видов и частоты всех встречающихся флуктуаций определяют как состояние ОКП, так и климат Земли в целом (Горшков, 1995). Причём, это относится к широкому диапазону излучения Солнца — от рентгеновского излучения до радиоволн (рис. 1.1).

1.1. Поля и заряженные частицы в околоземном пространстве

а) Геомагнитное поле. Геомагнитное поле в первом приближении эквивалентно полю диполя с магнитным моментом $M_3 = 8,8 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ в центре Земли (центральный диполь). Этот эквивалентный диполь представляет поле более точно, если ось диполя смещена на 540 км (2000 г.) от центра Земли в сторону Тихого океана (эксцентричный диполь). Ось земного диполя наклонена к оси вращения Земли и пересекает земную поверхность в точке с координатами 79° 18' с.ш. и 71° 30' з.д. (модель IGRF-95 на середину 1996 г.) в Гренландии (южный геомагнит-

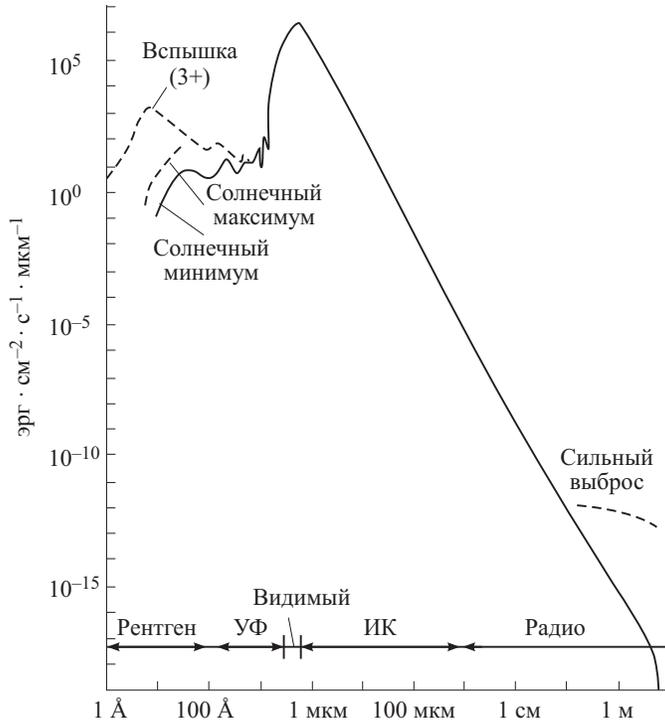


Рис. 1.1. Внеатмосферный спектр Солнца при различных его состояниях

ный полюс) и в точке $79^{\circ} 18'$ ю.ш. и $108^{\circ} 30'$ в.д. в Антарктике (северный геомагнитный полюс).

Полный вектор напряжённости H_T и составляющие геомагнитного поля определяются как

$$H_T = \frac{M_3}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi}, \quad (1.3)$$

$$Z = \frac{M_3 \sin \varphi}{2\pi r^3}, \quad H = \frac{M_3 \cos \varphi}{4\pi r^3}, \quad \operatorname{tg} D = \frac{Y}{X}, \quad \operatorname{tg} I = \frac{Z}{H}, \quad (1.4)$$

где H , X , Y , Z — горизонтальная, северная, восточная и южная составляющие, D и I — соответственно магнитные склонение и наклонение.

Значения составляющих геомагнитного поля: горизонтальная составляющая на экваторе $H = 0,31$ Гс, вертикальная на северном геомагнитном полюсе $Z = 0,58$ Гс, вертикальная на южном геомагнитном полюсе — $Z = 0,68$ Гс, за среднее принято значение $\approx 0,4$ Гс (Аллен, 1977).

Магнитный момент диполя изменяется со временем и в течение последнего столетия систематически уменьшается, составляя приблизительно

$$M_3 = (8,27 - 0,003\,951 \cdot t) \cdot 10^{15} \text{ Тл} \cdot \text{м}^3, \quad (1.5)$$

где t — время в годах с 1900,0.

Если бы закон изменения магнитного момента сохранялся, то к 3991 г. M_3 стал бы равным нулю (Акасофу, Чепмен, 1975). Однако, в последнюю четверть XX века коэффициент перед t вырос до 0,006, что сокращает время обнуления M_3 на 700–800 лет (Дьяченко, 2003).

Однако, археомагнитные и палеомагнитные исследования показали, что с течением времени величина поля магнитного диполя изменяется около некоторого среднего значения, близкого к современному. Восстановлен один такой период, составляющий величину около 8000 лет (Акасофу, Чепмен, 1975; Жарков, 1983).

В разные геологические эпохи геомагнитное поле имело разную полярность: переполусовка его происходила с периодом от сотен тысяч до десятков миллионов лет.

Причём, в настоящее время южный (то есть находящийся в северном полушарии) геомагнитный полюс движется со скоростью 15 км в год по направлению к Восточно-Сибирской магнитной аномалии, что и является прямым признаком переполусовки общепланетарного поля (Дмитриев А.Н., 1995).

Так, в новейшее геологическое время продолжительности эпох одной полярности составляли в среднем $\approx 2 \cdot 10^5$ лет. В более древние геологические времена эти периоды достигали 10^6 – 10^7 лет, что дало возможность составить геомагнитную хронологическую шкалу на последние 160 млн лет (Жарков, 1983). Её расширение представляет собой как одну из фундаментальных проблем геофизики, так и весьма важную проблему экологии ОКП.

Основное геомагнитное поле на высотах до трёх радиусов Земли сохраняет дипольный характер (несколько искажаясь под влиянием магнитных аномалий). Оно испытывает лишь вековые вариации и уменьшается медленнее, чем r^{-3} . Затем его структура усложняется. При достижении магнитопаузы на расстоянии около 10 земных радиусов напряжённость геомагнитного поля резко падает до $\approx 0,004$ А/м (Мишон, 1996)

Переменная составляющая геомагнитного поля ($\approx 1\%$), порождаемая токами в магнитосфере и ионосфере, более неустой-

чива. Здесь наблюдаются периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации.

Прогноз состояния геомагнитного поля весьма важен с точки зрения экологии ОКП, поскольку оно определяет параметры взаимодействия ОКП с межпланетным полем, солнечным ветром и т. д. В конечном итоге состояние геомагнитного поля определяет степень воздействия ОКП на земную биосферу.

Электрическое поле Земли ввиду несферичности планеты проникает и в ОКП. Оно имеет изменяющиеся со временем составляющие. Изменения вызваны, в основном, приливными воздействиями Луны и Солнца, то есть имеют суточные вариации. Его роль в процессах, протекающих в ОКП, изучена пока ещё не столь подробно, как роль геомагнитного поля.

б) Верхняя атмосфера и ионосфера. Классификация различных зон атмосферы проводится на основании распределения с высотой температуры, поскольку оно отражает баланс основных энергетических процессов. Нижняя граница околоземного пространства попадает в район термосферы, где температура ещё продолжает быстро повышаться вследствие, главным образом, поглощения солнечного коротковолнового излучения. Выше 300 км в термопаузе поглощение солнечного излучения столь незначительно, что интенсивность его излучения практически не изменяется с высотой. В термопаузе разогрев верхней атмосферы наблюдается, главным образом, во время полярных сияний и магнитных бурь (до 2000–3000 К). Нейтральные атомы и молекулы выше 120 км распределяются независимо в соответствии с барометрической формулой

$$n = n_0 e^{-h/H}, \quad (1.6)$$

где n — число частиц в единице объёма на высоте h , H — высота однородной атмосферы.

В результате концентрация тяжёлых атомов убывает быстрее, чем лёгких, и верхняя атмосфера сначала становится преимущественно атомарно кислородной, а затем выше 1000–2000 км — водородной. Протяжённая водородная экзосфера Земли, распространяющаяся до высот порядка 10^5 км, образует геокорону. Взаимные соударения частиц здесь редки, и они движутся преимущественно под действием силы земного тяготения.

Обнаружено изменение плотности верхних слоёв атмосферы и колебания их температуры в зависимости от солнечной активности и времени года (летом в дневные часы плотность на высоте 200 км — нижней границе ОКП — в 20 раз больше, чем зимой

ночью), а также широты (плотность в полярных районах в 5 раз больше, чем вблизи экватора на той же высоте).

Слои атмосферы, в которых происходит ионизация газов под действием коротковолнового солнечного излучения, образуют ионосферу. Систематическое зондирование показывает зависимость здесь электронной концентрации от солнечной активности. В течение светового дня она изменяется пропорционально косинусу зенитного расстояния Солнца ($\cos Z$) для наблюдения на земной поверхности.

Область D ионосферы ($h \approx 60\text{--}90$ км) обладает слабой ионизацией и малой концентрацией заряженных частиц. Здесь ионизация в основном происходит за счёт рентгеновского излучения Солнца, а также слабых дополнительных источников: космических лучей, метеоров, заряженных частиц магнитосферного происхождения. Ночью ионизация в этом слое резко уменьшается.

Область E ($h \approx 90\text{--}120$ км) характеризуется ростом концентрации электронов с высотой в дневное время, связанным с действием коротковолнового солнечного излучения. Доминирующую роль здесь играет ионизация молекул кислорода O_2 . Ионизация в этом слое обусловлена излучением парой линий из области дальнего ультрафиолета (97,7 и 102,6 нм). Максимум дневной ионизации на высоте порядка 110 км оказывает значительное влияние на распространение средних и коротких радиоволн, отражающихся от этого слоя. Здесь ночью ионизация также снижается, но число электронов остаётся не меньше $n_e \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$. Это связано с тем, что процессы рекомбинации не успевают охватить все долгоживущие ионы, а какое-то количество ионов поступает из слоя F . Определённую роль в ночной ионизации слоя E играет поглощение рассеянного геокороной излучения Солнца в линии L_α , метеорная ионизация, космические лучи. Максимум ионообразования под действием солнечного излучения располагается на высотах 150–200 км.

Область F начинается несколько ниже, примерно от 140 км. Максимальное количество ионов и электронов располагается, вследствие диффузии, выше или ниже зоны ионообразования, то есть в области F этот максимум приходится на высоты 250–400 км. В дневное время вследствие воздействия солнечного излучения на высотах 150–200 км образуется дополнительный максимум количества заряженных частиц — область F_1 . Вышележащая область F_2 характеризуется образованием более лёгких ионов: O^+ на высотах 400–1000 км, а выше — ионов водорода и гелия. Вообще, космические исследования показали, что в ионосфере не существует отдельных слоёв, а электронная

концентрация более менее плавно изменяется между основными максимумами, Поэтому точнее говорить не об отдельных слоях, а областях ионосферы (Иванов-Холодный, 2000).

Давно было известно, что на процессы ионизации ионосферы влияет солнечная активность. После создания современной аэрономической теории удаётся объяснить многие аспекты поведения ионизации ионосферы на разных высотах. При этом важно учитывать две причины (Иванов-Холодный, 2000). Первая из них связана с изменением поглотительной способности верхней атмосферы для УФ-излучения разных частей спектра. В результате этого ионизация в слоях F_1 , F_2 обусловлена менее проникающей их частью. В нижней ионосфере, в слое E , ионизацию вызывает более короткое и жёсткое УФ-излучение, которое в течение солнечного цикла изменяется меньше. Другая причина связана с тем, что с высотой величина геофизического эффекта вариаций плотности и молекулярного состава атмосферы изменяется с изменением солнечной активности. Благодаря этому при переходе от максимума к минимуму солнечного цикла эффект ионизации, характеризуемый квадратом электронной концентрации, в областях E и F_1 изменяется в соответствии с изменением потока, создающего эти слои. В то же время в области F_2 с усилением солнечной активности возрастание электронной концентрации вызвано не только увеличением потока излучения, но и изменением плотности и состава атмосферы. Теория образования области F_2 должна принципиально отличаться от областей E и F_1 . Это различие вызывается наложением геофизического эффекта на процесс ионизации в слое F_2 . Значительный рост ионизации в этом слое обусловлен тем, что с увеличением уровня солнечной активности на высоте около 300 км заметно возрастают плотность и температура атмосферы. Это приводит к увеличению высоты слоя и вызывает дополнительное увеличение электронной концентрации, которая оценивается критической частотой радиозондирования, при которой прекращается отражение радиоволн от ионосферы.

В последнее время стали выделять ещё слой G на высотах свыше 500 км (Кононович, Мороз, 2001).

в) Магнитосфера. Несомненно, одной из важнейших структур ОКП является магнитосфера.

Строгой границы между магнитосферой и ионосферой не существует. На высоте 1–2 тыс. км обнаруживается ряд явлений, относящихся более к ионосферным, но испытывающим заметное влияние магнитосферы. Внешний слой магнитосферы в подсол-

ночной точке определяется балансом динамического давления солнечного ветра и давления магнитного поля Земли:

$$2nm_p v^2 = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{2M_3}{D^3} \right)^2 \quad (1.7)$$

где M_3 — дипольный магнитный момент Земли, n , m_p и v — концентрация и масса протонов и скорость солнечного ветра в окрестностях Земли.

Его расстояние от центра Земли (так называемый радиус Чепмена–Ферраро D) составляет 9–11 радиусов Земли. Перед магнитосферой на расстоянии 13–17 радиусов Земли образуется бесстолкновительная ударная волна, отклоняющая поток солнечной плазмы, обтекающий затем магнитосферу.

С дневной стороны поток солнечного ветра сжимает магнитосферу, на ночной стороне силовые линии магнитного поля вытягиваются в хвост диаметром 30–40 радиусов Земли и длиной по некоторым данным до 10^3 земных радиусов. Внутренняя часть магнитосферы до расстояний $\approx 3-5R_3$ — плазмосфера, расположена в пределах диполеподобного геомагнитного поля. Частицы «холодной» плазмы (концентрация $\approx 10^4 \text{ см}^{-3}$) плазмосферы участвуют в суточном вращении Земли.

Во внешней части магнитосферы концентрация частиц ниже плазмосферной на 3–4 порядка. Движение частиц плазмы определяется электрическими полями, возбуждаемыми солнечным ветром, и сильно зависит от величины и направления магнитного поля в межпланетной среде.

Движение отдельных частиц в ловушке с магнитными зеркалами, которой является геомагнитное поле, складывается из вращения их вокруг силовых линий магнитного поля под действием силы Лоренца и движения вдоль силовых линий со скоростью v_{\parallel} . Сохранение первого адиабатического инварианта — магнитного момента частицы

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}, \quad (1.8)$$

где v_{\perp} и m — перпендикулярная магнитному полю составляющая скорости частицы и её масса, обеспечивает удержание большинства частиц в поле, ввиду их отражения от магнитных зеркал — областей усиленного геомагнитного поля вблизи полюсов.

Под действием электрического поля частицы медленно движутся к Земле в магнитном поле. Здесь происходит также со-

хранение и второго адиабатического инварианта

$$I_2 = \frac{m\bar{v}_{\parallel}l}{\pi}, \quad (1.9)$$

где \bar{v}_{\parallel} — средняя скорость частицы вдоль магнитной силовой линии, l — длина силовых линий между точками отражения.

Это определяет нахождение заряженной частицы на одной определённой силовой линии магнитного поля, что формирует оболочку радиационного пояса.

Третий адиабатический инвариант — сохранение потока: магнитный поток через поверхность оболочки, образованный вращением силовой линии диполя вокруг оси, сохраняется, если временными и пространственными вариациями за время дрейфа частицы вокруг Земли можно пренебречь.

В плазмосфере магнитное поле удерживает как в ловушке потоки быстрых частиц с энергиями до сотен МэВ. Это протоны, электроны, альфа-частицы и ядра более тяжёлых химических элементов. Они образуют так называемые радиационные пояса Земли (рис. 1.2). Во внутреннем радиационном (расстояние, выраженное в земных диаметрах, соответствует магнитному параметру $L = r/R_3$) поясе наблюдается наличие протонов высоких энергий до 800 МэВ и электронов с энергиями до 1 МэВ. С наружной стороны этот пояс ограничен магнитной оболочкой с $L = 2-3$, пересекающейся с земной поверхностью на геомагнитных широтах $\approx 45^\circ$. На нижней границе внутреннего пояса ($L = 1$) на высотах порядка 100–200 км заряженные частицы в результате частых соударений с атомами и молекулами атмосферы теряют свою энергию и рассеиваются в атмосфере (Гальпер, 1999; Сюняев, 1986).

Внешний радиационный пояс располагается между магнитными оболочками с $L = 3,5$ и $L = 7$ с максимальной плотностью потока частиц на $L \approx 4-4,5$. Здесь располагаются электроны с энергиями до 100 кэВ. Зоны обоих радиационных поясов перекрыты поясом протонов малых энергий (до 10 МэВ) с магнитными оболочками $L = 1,5 \div 8$.

В начале 80-х гг. XX в. был открыт ещё ряд радиационных поясов. Это, во-первых, стационарный пояс электронов высокой энергии (до 200 МэВ), располагающийся в зоне с $L = 1,2-1,5$. Кроме него, был открыт стационарный пояс ядер кислорода, азота и неона ($L \approx 2$), являющихся аномальной компонентой космических лучей.

Кроме этих стационарных поясов в магнитосфере Земли время от времени возникают квазистационарные пояса, происхож-

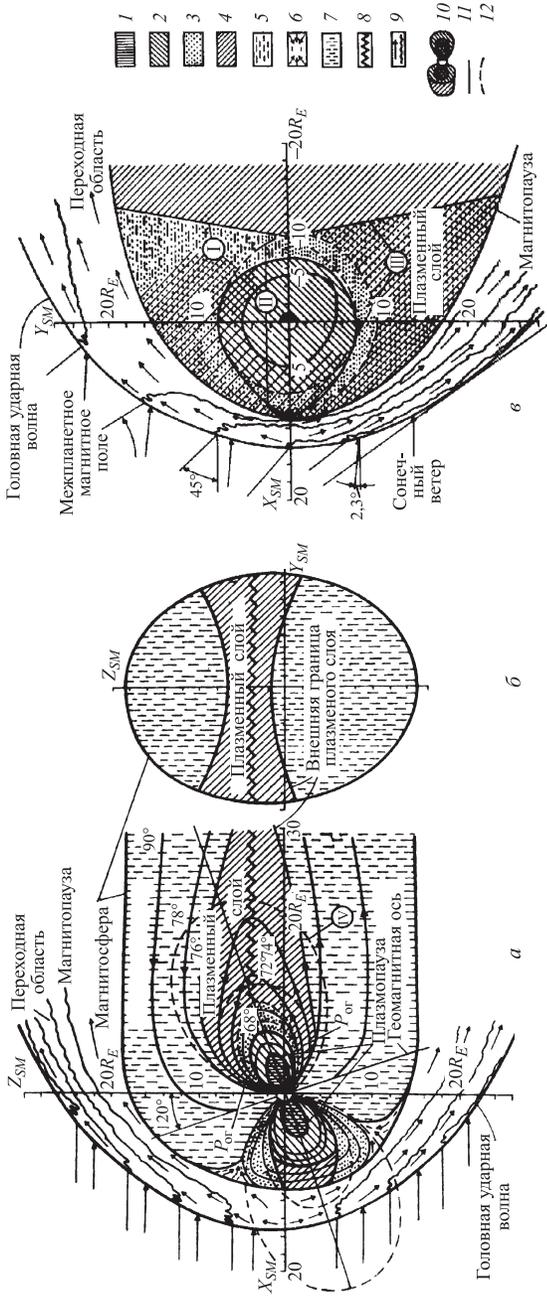


Рис. 1.2. Картина, возникающая в солнечно-магнитосферной системе координат $X_{SM}Y_{SM}Z_{SM}$ при сверхмагнитозвуковом взаимодействии межпланетной среды с магнитным полем Земли для меридионального (а), поперечного (на $X_{SM} = 15 \div 25R_E$) (б) и экваториального (в) сечений головной ударной волны, переходной области и геомагнитосферы. I, II — границы неустойчивого захвата для частиц, отражающихся на высоте 1000 км и в экваториальной области соответственно; III — область устойчивого захвата; IV — магнитные силовые линии диполя. 1 — магнитосфера (ионосферная область); 2 — радиационные пояса (область захваченной радиации); авроральная область; 3 — область неустойчивого захвата; 4 — область малоэнергичных (0,1–40 кэВ) электронов; 5 — данные о малоэнергичных электронах отсутствуют; 6 — область нейтральных точек; 7 — высокоширотный геомагнитосферный хвост (область полярной шапки); 8 — магнитонейтральный слой; 9 — переходная область; 10 — область устойчиво захваченной радиации; 11 — граница устойчивого захвата; 12 — внутренняя граница плазменного слоя (Ковалевский, 1976)

дение которых обусловлено различными причинами. Это могут быть вспышки на Солнце. Так, в 1991 г. после солнечной вспышки возник квазистационарный пояс из электронов и протонов с $L = 2,6$, просуществовавший два года (Гальпер, 1999).

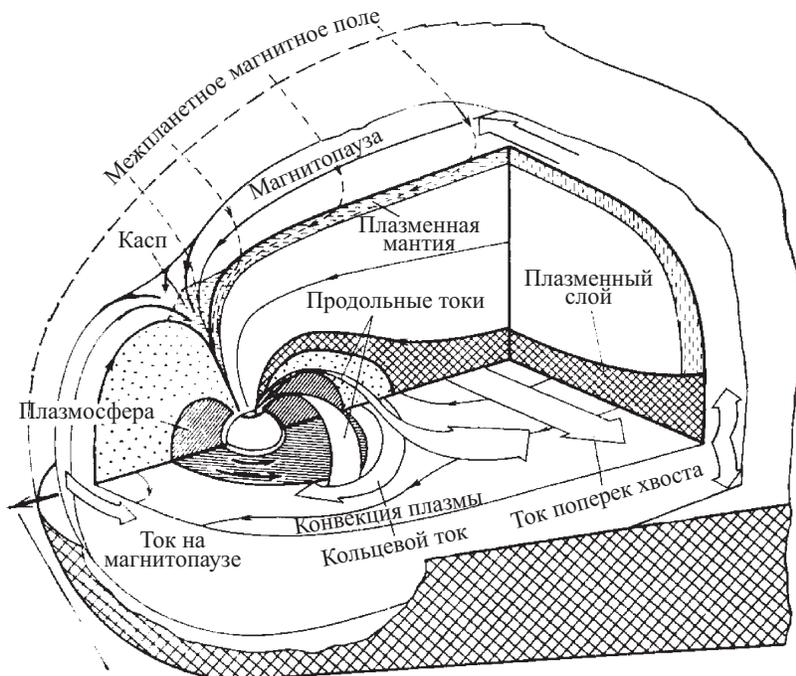
В 60-е гг. XX в. в результате взрывов ядерных устройств в космосе возник квазистационарный пояс из электронов малых энергий, просуществовавший более 10 лет.

Зона квазизахвата или авроральной радиации расположена за внешним поясом и имеет сложную структуру, обусловленную деформацией магнитосферы под воздействием солнечного ветра. Внешний пояс и пояс протонов малых энергий до высот 200–300 км подходят к земной поверхности на широтах около 60° . На широты выше 60° проецируется зона квазизахвата, совпадающая с областью максимальной частоты полярных сияний. Происхождение захваченных частиц с энергией, значительно превышающей энергию теплового движения атомов и молекул атмосферы, связано с действием нескольких механизмов: распадом нейтронов, созданных космическими лучами в атмосфере; инъекцией заряженных частиц благодаря быстрой конвекции во время магнитных суббурь; ускорением и медленным переносом частиц солнечного происхождения из внешних во внутренние области магнитосферы (через дневные полярные каспы, а также через нейтральный слой в хвосте магнитосферы с её ночной стороны); частично также за счёт захвата протонов и электронов солнечных космических лучей (Прохоров, 1983; Сяняев, 1986).

Процесс ускорения частиц идёт с сохранением первого и второго адиабатического инвариантов, поэтому диффузия частиц из хвоста магнитосферы к Земле под действием стохастических возмущений электрического поля сопровождается набором энергии. При этом возникают области втекания и вытекания токов в атмосфере и ионосфере, образуются зоны продольных и поперечных токов, соответствующих зонам полярных сияний (рис. 1.3).

Наиболее существенным механизмом генерации частиц радиационных поясов является распад альбедных нейтронов, которые образуются при взаимодействии космических лучей с атмосферой. Эти нейтроны, двигаясь от Земли, распадаются на протоны с энергиями до 10^3 МэВ, электроны с энергиями до нескольких МэВ и электронное антинейтрино.

При осуществлении механизма радиальной диффузии плазма солнечного ветра попадает в магнитосферу со стороны хвоста, захватывается геомагнитным полем и совершает в нём колебательное движение между магнитными зеркалами на линии L , соответствующей её энергии. При резком изменении давления



Направление на Солнце

Рис. 1.3. Основные поверхности, слои и токи в земной магнитосфере

солнечного ветра магнитное поле сильно изменяется в короткий промежуток времени. Тогда нарушается условие адиабатичности (1.8), (1.9) и частица переходит на оболочку с меньшим L . При этом происходит увеличение энергии за счёт изменения магнитного поля. Этот механизм обеспечивает магнитосферу протонами и электронами с энергиями до ≈ 30 МэВ и формирует основную часть внешнего пояса.

Кроме них существуют ещё несколько механизмов накачки радиационных поясов высокоэнергичными частицами.

Следует отметить, что взаимодействие магнитосферы с солнечным ветром происходит, главным образом, в результате диссипативных процессов. То есть в их отсутствие плазма и магнитное поле внутри магнитосферы находятся в (хотя и в достаточно неустойчивом) динамическом равновесии. Флуктуации (например, магнитогидродинамические волны) соответствующего периода могут нарушать три адиабатических инварианта и таким образом удалять частицы из области захвата.

г) **Сравнительные характеристики магнитосфер планет Солнечной системы.** Магнитосферы планет Солнечной системы можно описывать теми же параметрами, что и земную. Принимая во внимание, что плотность солнечного ветра обратно пропорциональна расстоянию от Солнца, отношение радиусов Чепмена–Ферраро планеты и Земли можно записать как

$$\frac{D}{D_3} = \left(\frac{aM}{M_3} \right)^{0,5}, \quad (1.10)$$

где a — большая полуось орбиты планеты в а. е.

Основные параметры известных магнитосфер планет представлены в табл. 1.1 по данным (Кононович, 2001; Сюняев, 1983).

Таблица 1.1. Магнитные поля и магнитосферы планет Солнечной системы

	Меркурий	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
Расстояние от Солнца, а.е.	0,39	1	1,53	5,05	9,63
Радиус, км · 10 ³	2,43	6,38	3,4	71,6	60,0
Напряжённость магнитного поля на (поверхности), Э	2 · 10 ⁻³	0,5	—	10	0,5
Дипольный магнитный момент, Гс · см ³	5 · 10 ²²	8 · 10 ²⁵	2,5 · 10 ²²	1,6 · 10 ³⁰	4,4 · 10 ²⁸
Радиус Чепмена–Ферраро, в радиусах планеты	1,6	10	1,4	100	20
Перепад электростатического потенциала поперёк магнитосферы, кВ	—	100	—	1000	200
Мощность диссипации энергии, Вт	—	3 · 10 ¹¹	—	2,5 · 10 ¹³	10 ¹²

На процессы взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля планеты оказывают влияние как размеры планеты, так и структура её магнитного поля. Так, для планет, лишённых магнитного поля и атмосферы (ионосферы), всё взаимодействие сводится к обтеканию солнечном ветром их поверхности с образованием с ночной стороны плазменной тени. Пример — Луна. В случае Венеры, имеющей ионосферу без магнитного поля, взаимодействие солнечного ветра с ионосферой образует ионопазу. Магнитные поля Меркурия и Марса ввиду малых размеров планет останавливают частицы солнечного ветра весьма близко от поверхности, хотя магнитосферы у этих планет и образуются.

Наиболее изучена магнитосфера Юпитера, размеры которой в сотни раз превосходят размеры самой планеты. Отличием магнитосферы Юпитера является её совместное вращение с системой долгот II для средних широт и Красного Пятна. Радиационные пояса Юпитера были обнаружены, задолго до полётов КА, по их радиоизлучению, являющемуся синхротронным излучением релятивистских электронов на длинах волн 3–70 см. Интерференционная картина Юпитера в этом диапазоне имеет весьма характерную для радиационных поясов форму «бублика».

Кроме того, взаимодействие магнитосферной плазмы с продуктами вулканической деятельности Ио приводит к выбросу в магнитосферу составляющих атмосферу Ио серу и кислород. Это вещество, ионизируясь и распределяясь вдоль орбиты Ио, образует плазменный тор. Совместное вращение тора и замороженных в магнитосферную плазму силовых линий магнитного поля создаёт перпендикулярный ему ток, замыкающийся на ионосферу. Часть энергии этого тока расходуется на возбуждение свечения тора в УФ-диапазоне, часть диссипирует в атмосфере и порождает полярные сияния и километровое радиоизлучение. Кроме того, при генерации альвеновских волн, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера и многократно отражающихся от его ионосферы, возникает ещё одна зона мощных полярных сияний, а также сильное радиоизлучение в декаметровом диапазоне. Это излучение является одним из самых сильных в Солнечной системе.

1.2. Внешняя часть околоземного космического пространства

Вне магнитосферы на расстояниях более ≈ 20 земных радиусов в солнечном направлении состояние ОКП определяется параметрами межпланетной среды, основными компонентами которой являются: солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, космические лучи высоких энергий, межпланетные пыль и газ.

Солнечный ветер образуется при газодинамическом расширении солнечной короны в межпланетное пространство. Скорость расширения очень мала во внутренней короне, но быстро возрастает с высотой. На некотором расстоянии (критический радиус) тепловая энергия становится сравнимой с кинетической энергией расширяющейся плазмы. Здесь скорость расширения близка к скорости звука в плазме. Далее, на больших расстояниях, солнечный ветер становится сверхзвуковым.

В табл. 1.2 (Бруцек, Дюран, 1980) приведены параметры солнечного ветра, каким он является на границе ОКП. Средняя плотность числа частиц в солнечном ветре $n = 10 \text{ см}^{-3}$. Состав солнечного ветра определяется, в основном, протонами и электронами. Однако, кроме них, здесь присутствуют ядра He^3 , He^4 , O, Ne, Si, Ar, Fe.

Таблица 1.2. Параметры солнечного ветра в окрестностях Земли

Параметр	Значения		
	миним.	среднее	максим.
Поток (10^8 ион/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$)	1,0	3,0	100
Скорость (км/с)	200	400	900
Плотность (ион/см)	4,0	6,5	100
Электронная температура (1000 К)	5	200	1000
Протонная температура (1000 К)	3	50	1000
Напряжённость магнитного поля (гамм)	2,0	6,0	80
Альвеновская скорость (км/с)	30	60	150
Относительное содержание гелия	0,0	0,05	0,25

В первом приближении солнечный ветер, наблюдаемый вблизи орбиты Земли, состоит из трёх независимых компонент (Курт, 1999; Пудовкин, 2000):

— спокойный солнечный ветер — постоянно существующий поток солнечной плазмы, заполняющий всю Солнечную систему и далее вплоть до границы гелиосферы около 50–200 а. е.;

— квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, ответственные за рекуррентные геомагнитные возмущения;

— спорадические высокоскоростные потоки — кратковременные, неоднородные, сложные по структуре потоки плазмы, ответственные за спорадические магнитосферные возмущения.

Развитие конвективной турбулентности в верхних слоях Солнца сопровождается генерацией интенсивных магнитозвуковых волн. Распространяясь в атмосфере Солнца, где плотность плазмы быстро уменьшается с высотой, звуковые волны трансформируются в ударные. Они эффективно поглощаются веществом, в результате чего температура последнего увеличивается до $(1-3) \cdot 10^6$ в солнечной короне. При этом значительная часть протонов в короне не может удерживаться гравитационным по-

лем Солнца. Это приводит к непрерывному расширению короны в окружающее пространство, то есть к генерации солнечного ветра. Уравнение, связывающее изменение скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца, полученное Паркером из уравнений движения, газового состояния, Бернулли, имеет вид

$$0,5v^2 - \frac{GM_{\text{Солнца}}}{r} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \frac{v_0 A_0}{vA} = 0,5v_0^2 - \frac{GM_{\text{Солнца}}}{r_0} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{p_0}{\rho_0}, \tag{1.11}$$

где v — скорость солнечного ветра, p и ρ — его давление и плотность, α — показатель политропы, отличный от показателя адиабаты (5/3), A — площадь поперечного сечения трубки потока, индексом 0 отмечены значения переменных на некотором исходном состоянии r_0 от центра Солнца (Пудовкин, 2000).

Выбор между решениями в модели Паркера определяется условиями на бесконечности при $r/r_0 \gg 1$. Оптимальное решение соответствует переходу скорости расширения через значение скорости звука v_c на некотором критическом расстоянии r_c и последующему расширению со сверхзвуковой скоростью. Такое течение и является солнечным ветром (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Потоки и плотности энергии в спокойном солнечном ветре в ОКП

Плотность потока кинетической энергии	0,22 эрг/см ² ·с
Плотность потока тепла, переносимого электронами	≈ 0,01 эрг/см ² ·с
Плотность потока тепла, проводимого протонами	≈ 10 ⁻⁵ эрг/см ² ·с
Плотность кинетической энергии	7 · 10 ⁻⁹ эрг/см ³
Плотность тепловой энергии протонов	6 · 10 ⁻¹¹ эрг/см ³
Плотность тепловой энергии электронов	1,5 · 10 ⁻¹⁰ эрг/см ³
Плотность энергии магнитного поля	10 ⁻¹⁰ эрг/см ³

Для поддержания достаточно высокой температуры солнечного ветра в его теорию вводятся нетепловые источники энергии, прежде всего альвеновские волны, которые в ходе четырёхволнового взаимодействия трансформируются в магнитозвуковые волны. Последние диссипируют в результате резонансного взаимодействия с протонами, которые при этом заметно нагреваются.

Вообще в солнечном ветре наблюдаются различные виды волн: ленгмюровские, вистлеры, ионнозвуковые и др. Часть альвеновских волн возбуждается в межпланетной среде. Генерация волн сглаживает отклонения функции распределения от максвелловского и приводит к тому, что солнечный ветер ведёт себя как сплошная среда. В нём наблюдаются контактные и вращательные разрывы, характерные для замагниченной плазмы.

Современные модели солнечного ветра учитывают вариации корональной температуры с расстоянием, двухжидкостной характер среды (электронный и протонный газы), теплопроводность, вязкость, несферический характер расширения (Сюняев, 1983).

Высокоскоростной солнечный ветер имеет повышенную скорость (около 700 км/с), повышенную ионную температуру и пониженную плотность плазмы ($\approx 4 \text{ см}^{-3}$).

Рекуррентные потоки высокоскоростного солнечного ветра появляются в ОКП с периодом, равным периоду осевого вращения Солнца (27 суток). Эти потоки зарождаются на Солнце в области корональных дыр — обширных областях пониженной интенсивности излучения с температурой около $8 \cdot 10^5 \text{ К}$ и плотностью 0,25 плотности спокойной короны.

Спорадические высокоскоростные потоки — кратковременные весьма интенсивные потоки, имеющие скорость до 1200 км/с и весьма большую долготную протяжённость, обусловлены так называемыми корональными выбросами. При своём движении такой поток захватывает плазму спокойного солнечного потока, в результате чего перед его фронтом образуется движущаяся вместе с ним отошедшая ударная волна. Пространство между фронтом потока и фронтом отошедшей ударной волны заполнено относительно плотной и горячей плазмой.

Солнечный ветер обеспечивает основной отток тепловой энергии короны Солнца, так как теплопередача в хромосферу, электромагнитное излучение сильно ионизированного вещества короны и электронная теплопроводность солнечного ветра недостаточны для установления термического баланса короны.

Солнечный ветер не играет сколько-нибудь заметной роли в энергетике Солнца, так как поток энергии, уносимой им, составляет $\approx 10^{-8}$ светимости Солнца.

Солнечный ветер простирается до расстояний порядка 100 астрономических единиц, где давление межзвёздной среды уравновешивает его динамическое давление. В результате образуется своеобразная полость, называемая гелиосферой. Солнечный ветер вместе с вмороженным в него магнитным полем препятствует проникновению в Солнечную систему галактических космических лучей малых энергий и приводит к вариациям космических лучей высоких энергий.

Межпланетное магнитное поле является унесённым солнечным ветром магнитным полем Солнца. На расстоянии около 20 радиусов Солнца от него расширение короны становится почти идеальным, но вращение Солнца закручивает силовые линии

межпланетного магнитного поля в спирали Архимеда, располагающиеся на конусах, описываемых концом радиуса-вектора. На малых гелиографических широтах вектор магнитного поля практически параллелен плоскости солнечного экватора. Поле состоит из чётного количества (обычно четырёх) секторов или областей, в которых поле направлено преимущественно к Солнцу или от Солнца вдоль архимедовой спирали. Секторная граница, разделяющая поля противоположной полярности, обычно очень тонка. Она является следствием существования токового слоя, вращающегося вместе с Солнцем. Токовый слой создаёт скачок магнитного поля: выше него радиальный компонент магнитного поля имеет один знак, ниже — другой. Земля, находящаяся в плоскости эклиптики, оказывается то выше, то ниже токового слоя, попадая в секторы с противоположным направлением радиальной компоненты межпланетного магнитного поля.

Вдали от плоскости солнечного экватора секторная структура пропадает, и направление вектора межпланетного магнитного поля определяется полярностью магнитного поля на высоких гелиографических широтах в фотосфере Солнца.

Вблизи границ секторов образуется ударная волна, движущаяся к Солнцу. Увлечённая плазмой солнечного ветра, она также начинает двигаться в направлении от Солнца. Эти две волны, а также ударная волна от вспышек на Солнце и околопланетная ударная волна ускоряют заряженные частицы в ОКП (*Курт, 1999; Сюняев, 1983*).

Присутствие Луны в ОКП не искажает силовых линий межпланетного магнитного поля, только в пределах структуры, развивающейся в потоке на обратной стороне Луны. Межпланетные силовые линии пронизывают Луну, а электроны солнечного ветра поглощаются ею на подсолнечной стороне. В результате позади Луны образуется электронная тень, которой бы не было, если бы она обладала высокой проводимостью (*Акасофу, Чепмен, 1975*).

Космические лучи в межпланетном пространстве по происхождению делятся на галактические, метagalacticкие и солнечные космические лучи, рекуррентные потоки, заряженные частицы, ускоренные магнитосферами планет, аномальный компонент космических лучей представляют собой ядра различных элементов. Наиболее многочисленны ядра атомов водорода ($\approx 85\%$) и гелия ($\approx 10\%$). Доля ядер всех остальных элементов не превышает $\approx 5\%$. Небольшую часть составляют электроны и позитроны (менее 1%). Плотность энергии космических лучей в Галактике составляет $\approx 0,5$ эВ/см³, что сравнимо с плотностями энергий межзвёздного газа и галактического магнитно-

го поля. Время жизни космических лучей равно $\approx 3 \cdot 10^8$ лет и определяется либо их выходом из Галактики и гало, либо поглощением за счёт неупругих взаимодействий с веществом межзвёздной среды (Стойков, 2001).

Распределение интенсивности космических лучей в ОКП выражается несколькими различными способами, поскольку они состоят из ядер с различными энергиями. Часто используется функция дифференциальной интенсивности $J(\varepsilon)$ ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \times \text{стер}^{-1}$) или функция интегральной интенсивности $J(> \varepsilon) = \int_{\varepsilon}^{\infty} J(\varepsilon) d\varepsilon$. Здесь $J(\varepsilon)$ — поток частиц космических лучей с энергиями между ε и $d\varepsilon$. Приняты выражения (Акасофу, Чепмен, 1975)

$$J(\varepsilon) = (\gamma - 1)C\varepsilon^{-\gamma}, \quad (1.12)$$

$$J(> \varepsilon) = C\varepsilon^{-(\gamma-1)}. \quad (1.13)$$

Для протонов космических лучей $\gamma \approx 2,5$ и $C \approx 0,5$ ($4 < \varepsilon < 16$ ГэВ) и для α -частиц $\gamma \approx 2,5$ и $C \approx 3 \cdot 10^{-2}$ ($2 < \varepsilon < 10$ ГэВ).

Основным источником космических лучей внутри Галактики являются взрывы сверхновых звёзд. Космические лучи ускоряются на ударных волнах, образующихся при этих взрывах, и приобретают энергию до 10^{16} эВ. Космические лучи ещё больших энергий (до 10^{21} эВ) образуются в Метагалактике. Ещё одним источником космических лучей сверхвысоких энергий могут быть ядра активных галактик.

В состав **галактических космических лучей** входят протоны, электроны, ядра лёгких элементов с максимальными энергиями до $\approx 10^{16}$ эВ. Основная их часть до орбиты Земли практически не долетает, рассеиваясь на неоднородностях межпланетного магнитного поля. Остаточный поток галактических космических лучей в ОКП составляет $\approx 0,06 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Следует отметить, что поток галактических космических лучей ежегодно уменьшается на 0,01–0,08% в год, что можно интерпретировать взрывом близкой сверхновой звезды несколько десятков тысяч лет назад (Стойков, 2001). Эти предположения имеют подтверждения как в виде наблюдаемого на небесной сфере в радиодиапазоне «галактического шпура» (Сюняев, 1983), так и в повышенном содержании космогенных изотопов углерода, хлора и бериллия в атмосфере и льдах в период, относящийся к 53 тыс. лет назад (Кочаров, 1996; 2000).

За исключением нерегулярных столкновений с неоднородностями межпланетного магнитного поля, частицы космических

лучей движутся по направлению к Солнцу, описывая спирали вокруг силовых линий магнитного поля со структурой спиралью Архимеда, и затем обратно от Солнца после поворота в зеркальной точке. В то же время они принимают участие во вращении архимедовой спирали с Солнцем. Поэтому в любой точке межпланетного пространства, не вращающейся вместе со спиральной структурой, имеется слабый поток космических лучей в направлении вращения. В результате наблюдающиеся на Земле потоки обнаруживают слабую модуляцию, дневные вариации. Направление усиления потока составляет $\approx 90^\circ$ по часовой стрелке с прямой Солнце–Земля.

Солнечные космические лучи возникают во время вспышек на Солнце, когда испускаются протоны с энергией 10–100 МэВ (иногда до 15 ГэВ) и электроны от 40 кэВ (в исключительных случаях регистрируются релятивистские электроны с энергиями до 12 МэВ).

Следует отметить, что магнитосферы планет ускоряют заряженные частицы и наполняют ими межпланетное пространство. Здесь наиболее мощным источником заряженных частиц является магнитосфера Юпитера, поставляющая электроны с энергиями до 30 МэВ на расстояния в 10 а. е.

Аномальный компонент космических лучей представляет собой частично ионизированные атомы гелия, кислорода, азота и неона с удельной энергией до 100 МэВ/нуклон. Плотность их потоков растёт с удалением как от Солнца, так и от плоскости солнечного экватора. Образуются они на периферии гелиосферы.

Космические лучи с энергиями $< 10^{12}$ эВ, испытывают воздействие межпланетных магнитных и электрических полей, и их движение в Солнечной системе достаточно хаотично. Поскольку плотность магнитных неоднородностей сильно зависит от солнечной активности, интенсивность космических лучей внутри гелиосферы, соответственно, и в ОКП, определяется её уровнем. Понижение уровня галактических метagalactic космических лучей (эффект Форбуша) наблюдается именно в периоды повышенной солнечной активности.

Основными источниками **космической пыли** в Солнечной системе являются кометы. Общая масса пыли оценивается здесь в $\approx 10^{17}$ кг. Основная часть пыли ($\approx 2/3$) сосредоточена в частицах массой 10^{-3} – 10^{-5} г и сильно концентрируется в плоскости эклиптики на расстояниях до ≈ 3 а. е. (Божокин, 2002). На больших расстояниях по данным КА «Galileo» существует поток пылинок массой порядка 10^{-13} г плотностью $\approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$

(*Astronet.ru*, 2000). В последнее время открыты периодические потоки пыли в виде частиц диаметрами 5–10 нм, исходящие из системы Юпитера, а также поток межзвёздных пылинок, пересекающий Солнечную систему со скоростью, большей 3-й космической, и идущий с того же направления, что и поток межзвёздного газа. В ОКП космическая пыль сосредоточена в зонах, занимаемых противостоянием, зодиакальным светом, F -компонентом солнечной короны, в точках либрации системы Земля-Луна, выпадает в виде метеоров в атмосферу и на поверхность Земли.

В процессе движения межпланетная пыль испытывает ряд воздействий со стороны электромагнитного и корпускулярного солнечного излучения, межпланетного магнитного поля, космических лучей и т. д. В результате частички пыли могут приобретать электрический заряд, собственное осевое вращение. Равновесный электрический потенциал межпланетной пыли определяется балансом между процессами выбивания фотоэлектронов солнечными фотонами и захвата частицами электронов солнечного ветра. В районе земной орбиты он составляет около +11,5 В (*Акасофу, Чепмен, 1975*).

Можно добавить, что солнечный ветер в значительной степени определяет концентрацию частиц межпланетной пыли в ОКП, действуя как своеобразный чистильщик ближнего космоса (*Касименко, Рыхлова, 1995*).

Нейтральный газ в Солнечной системе образован атомами водорода и гелия, проникающими из межзвёздного пространства. Это поток межзвёздного ветра — горячего ($T \approx 10^4$ К, $n \approx 0,1$ см⁻³) газа, движущегося со скоростью порядка 20 км/с из области созвездий Скорпиона-Центавра (*Баранов, 2000*). Размер зоны горячего атомарного водорода составляет 5 а. е. в указанном направлении движения Солнца, 10 а. е. в поперечном и 25 а. е. — в противоположном. Для атомарного нейтрального гелия размеры такой зоны меньше: радиус сферической каверны для него составляет 0,3 а. е. В районе орбиты Земли сильная неоднородность распределения газа обусловлена суммарным влиянием притяжения Солнца, его УФ-излучения, солнечного ветра.

Наконец, важными компонентами внешней части ОКП в связи с развитием технических возможностей цивилизации стали потоки от различных видов передатчиков энергии, отходы космической деятельности.

Глава 2

ОСКОЛКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ И ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Изучение загрязнения околоземного пространства как естественными (астероиды, кометы, метеоры, космическая пыль), так и искусственными (обломки космических аппаратов, образующие так называемый космический мусор) объектами имеет в настоящее время важнейшее значение как для астрономии и исследований космического пространства, так и для экологии Земли как планеты и безопасности жизни на ней. Здесь можно говорить не только об ущербе от падения тел естественного и искусственного происхождения, но даже и о возможности заражения земной природы радиоактивными и биологическими материалами.

Отношение потока искусственных объектов к потоку естественных объектов зависит от размеров объектов. Равенство потоков приходится на размеры объектов, близкие к 1 мм. Для меньших размеров преобладает поток естественных, для больших — искусственных объектов, причём для размера 1 см это отношение составляет величину ≈ 40 , для размера 10 см — $\approx 10^5$ (Назаренко, Чернявский, 1995).

Таким образом, общее число (в основном техногенных объектов) диаметром более 1 см оценивается в 30–70 тыс. единиц. Количество объектов микронного размера, газовой и пылевой фракций оценивается в 10^{13-14} .

2.1. Основные источники естественного мусора в околоземном космическом пространстве

а) Астероиды. Среди естественного космического мусора, попадающего в ОКП, можно выделить астероиды, метеорное и кометное вещество.

Между орбитами Марса и Юпитера, на расстояниях от 2,2 до 4,5 астрономических единиц от Солнца, располагается главный пояс астероидов. В нём к настоящему времени определены

орбиты около трёх десятков тысяч малых планет размерами от нескольких сотен метров до сотен километров, а открыты к июню 2001 г. 123 284 астероида. Кроме того, несколько сотен астероидов, имея сильно вытянутые орбиты, заходят в перигелии внутрь земной орбиты, имея вероятность столкнуться с Землёй (так называемая «астероидная опасность»).

По своим физическим характеристикам астероиды разделяют на несколько групп, внутри которых объекты имеют сходные отражательные свойства поверхности (Аллен, 1977; Боярчук, 1999; Adushkin, Nemchinov, 1994). Ниже приведены оптические характеристики 8 основных таких таксонометрических типов. Заметим, что каждому классу астероидов соответствуют метеориты, имеющие сходные оптические свойства. Поэтому каждый таксонометрический тип можно характеризовать по аналогии с минералогическим составом соответствующих метеоритов.

Таблица 2.1. Основные таксонометрические типы астероидов

Тип	Альbedo	Минералогия	Метеоритный аналог
C	низкое	силикаты + + непрозрачный материал (углерод)	углистые хондриты
S	умеренное	силикаты + металл	железо-каменные
M	умеренное	металл с примесями	никеле-железные экстатитовые хондриты
E	высокое	нейтральные силикаты	акстатитовые ахондриты
R + Q	от умеренного до высокого	оливин + пироксен + + металл	обычные хондриты
V	умеренное	пироксен + фелдспар	нет
A	умеренное	оливин + металл	брахиниты

Наиболее распространёнными астероидами являются астероиды типов C, S и M. В главном поясе соотношение астероидов этих типов составляет 7 : 5 : 1, однако, для сближающихся с Землёй астероидов это соотношение совершенно меняется: 3 : 7 : 1. Причём, среди астероидов, сближающихся с Землёй, имеются астероиды типа Q, а в главном поясе эти типы вообще отсутствуют.

В последние годы за орбитой Нептуна был открыт ещё один пояс астероидов — так называемый пояс Койпера. Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и получил обозначение 1992 QB1. К маю 2000 г. было открыто

уже 270 транснептуновых объектов. По параметрам орбит их разделили на несколько классов:

— классические объекты пояса Койпера; их почти круговые орбиты лежат в области 40–50 а.е. от Солнца, а плоскости орбит наклонены к эклиптике менее чем на 40° . Эти объекты не испытывают сильного влияния больших планет; их орбиты остаются практически неизменными;

— резонансные объекты пояса Койпера, или плутино (т.е. «плутончики»). Большие полуоси их орбит близки к 39,5 а.е., а значит их орбитальный период, как и у Плутона (248 лет), соотносится с орбитальным периодом Нептуна как 3 : 2. Возможно, именно эта резонансная связь с планетой-гигантом служит стабилизирующим фактором для движения плутино. Некоторые плутино пересекают орбиту Нептуна, но никогда не сближаются с ним (как и сам Плутон).

— рассеянные (*scattered*) объекты, «бродяги», имеющие весьма вытянутые орбиты ($e = 0,5-0,9$) с большой полуосью 60–100 а.е.; некоторые из них удаляются от Солнца в афелии на 100–200 а.е., а объект 2000 CR105 — даже на 1300 а.е. (объект Quavar);

— объекты пояса Казимирчак-Полонской.

Объекты за Нептуном пока трудно отнести к какому-либо классу малых тел Солнечной системы — к астероидам или ядрам комет. Новооткрытые тела имеют диаметр 100–800 км и очень тёмную красноватую поверхность, что указывает на её древний состав и возможное присутствие органических соединений. Судя по оценкам, в поясе Койпера около 70000 объектов с диаметрами более 100 км. В целом это скопление малых тел в сотни раз массивнее пояса астероидов, расположенного между орбитами Юпитера и Марса, но уступает по массе гигантскому кометному облаку Оорта, простирающемуся на тысячи астрономических единиц от Солнца. Возможно, пояс Койпера представляет остаток протопланетной туманности, из которой сформировалась Солнечная система.

Среди астероидов, сближающихся с Землёй, выделяют четыре группы объектов (Сокольский, 1992).

1. Астероиды типа Амура. К ним относятся астероиды с перигелийными расстояниями 1,33 а.е., но большими, чем афелийное расстояние Земли (1,017 а.е.). Их орбиты подходят к Земле с внешней стороны, никогда её не пересекая. Таким образом, они не представляют опасности столкновения с Землёй в ближайшем будущем.

2. Астероиды типа Аполлона. Объекты с перигелийными расстояниями, меньшими 1,017 а. е. и большими полуосями орбит, превышающими 1 а. е. К этому типу принадлежит около 2/3 всех известных астероидов, сближающихся с Землёй. Их орбиты проникают внутрь орбиты Земли и столкновение их с Землёй возможно.

3. Астероиды типа Атона. Большие полуоси орбит менее 1 а. е., но превышающие перигелийное расстояние Земли (0,983 а. е.). Столкновение с Землёй возможно.

4. Астероиды типа Х. Орбиты находятся полностью внутри орбиты Земли. Первый астероид такого типа открыт только в 1998 г. Вероятность обнаружения этих объектов современными наблюдательными средствами ничтожна. Опасности для Земли в ближайшем будущем не представляют.

5. Астероиды в резонансных точках орбиты Земли.

Таким образом, потенциальную опасность столкновения с Землёй представляют только астероиды типа Аполлона и Атона. Для этого, кроме определённой величины большой полуоси орбиты такого астероида, перигелийного и афелийного расстояний, его орбита должна пересекать плоскость земной орбиты так, чтобы точка пересечения была на расстоянии 0,983–1,017 а. е. от Солнца.

Общее количество астероидов с диаметром, превышающим 1 км, и пересекающих орбиту Земли, оценивается от 1500 единиц (Toon, Zahnle, 1994) до 1000–2000 ([www.rambler-science](http://www.rambler-science.com), 2001). Однако, для астероидов главного пояса, периоды которых соизмеримы с периодом обращения Юпитера (находящиеся в люках Кирквуда), его возмущающее действие резко возрастает. Такие объекты могут быть выброшены из главного пояса и могут попасть в разряд астероидов, сближающихся с Землёй.

Всего же ([rambler-science](http://rambler-science.com), 2001) в течение 2000 г. в рамках программы LINEAR было открыто 125 астероидов, всего на конец 2000 г. получилось 467 единиц, из них 258 — пересекающих орбиту Земли. Однако, уже в первый месяц нового тысячелетия было открыто 5 астероидов, орбиты которых пересекают орбиту нашей планеты, а к маю 2001 г. число астероидов, пересекающих орбиту Земли, перевалило за 300.

Динамика открытия опасных для Земли астероидов приведена в гл. III настоящей работы.

Размеры известных астероидов, пересекающих орбиту Земли, варьируются в пределах 6 м — 40 км. Одно из последних падений XX века — в районе озера Тагиш (Канада). Метеорит, являвшийся по предположениям осколком астероида типа D (немного-

численное семейство красно-чёрных астероидов с весьма низким альбедо), имел диаметр около 6 метров, массу порядка $2 \cdot 10^8$ кг (www.nature.ru, 27.08.01).

В табл. 2.2 представлены прохождения астероидов вблизи Земли в XXI в. по данным (www.harvard.edu; www.science.ru, 2001), где представлена информация о таких прохождениях (на расстояниях менее 0,05 а. е. от Земли) на период 2001–2178 гг. для астероидов, открытых к 2001 г. К марту 2003 г. (Приложение I) количество таких астероидов резко возросло.

В минувшем столетии несколько астероидов прошли совсем близко от Земли, в том числе даже на расстоянии 0,007 а. е., что составляет чуть более 100 тыс. км. Последним астероидом XX столетия, пролетевшим вблизи Земли, был объект 2000YA (прошёл 24.12.2000 г. со скоростью 30 км/с на расстоянии 800 тыс. км от Земли) (www.nature.ru, 24.12.00).

б) Кометы. Кометы являются основными поставщиками пыли в Солнечной системе в районе земной орбиты.

Всего по данным каталога Б. Марсдена в период с 1059 г. до н.э. по 1995 г. зафиксировано появление 2335 комет.

Общее количество комет в Солнечной системе по-разному оценивается разными авторами, и эти оценки дают числа в пределах 10^{12} – 10^{15} (Боярчук, 1999; Герасимов, Мушаилов, 2000; Цицин, 2000; Чурюмов, 2002а,б).

Подавляющее большинство комет состоит из твёрдого ядра, окружённого газо-пылевой оболочкой — комой. С приближением кометы к Солнцу под действием солнечного ветра и светового давления у неё образуется хвост, направленный, чаще всего, в сторону, противоположную Солнцу. Длина хвостов в среднем составляет до 10 млн км, в особых случаях — до 150 млн км. Ядро по современным представлениям состоит из смеси водяного льда с замороженными в него легколетучими веществами и, возможно, крупными камнями. Размер ядер короткопериодических комет составляет 0,6–12,5 км, долгопериодических — от 1 до 33 км. Высказывается, однако, мнение что диаметр ядра кометы Хейла-Боппа 1995–96 гг. составлял ≈ 100 км (Сазонов, 2000а). Сюда же можно, видимо, отнести Хирон.

По параметрам орбит кометы разделяются на три группы.

1. Короткопериодические кометы.

Периоды обращения вокруг Солнца < 20 лет, средний — 8,3 г., среднее значение большой полуоси орбиты 3,4 а. е., перигелийного расстояния — 1,6 а. е.

2. Среднепериодические кометы.

Таблица 2.2. Прохождения известных астероидов вблизи Земли в XXI в.

Номер астероида	Имя астероида	Дата пролёта	Расстояние, тыс. км	Диаметр объекта, км
	2001 BE 10	12.01.2001	$k \cdot 1000$	—
	2001 BF 10	28.01.2001	4000	—
	2000 PH5	25.06.2001	1840	—
	1998 WT24	16.12.2001	1900	—
	2001 AD2	23.12.2001	3500	—
	2001 BF10	27.04.2003	140÷2300	—
	1994 PM	16.08.2003	3740	1,4
4179	Тоутатис	29.09.2004	1556	4,0
	2001 AD2	05.04.2006	1000	—
	1994 CC	10.06.2009	2528	1,0
4660	Нерей	11.12.2021	3934	0,9
7482	1994 PC1	19.01.2022	1975	1,7
	1997NC1	27.06.2026	2558	0,8
	1997XF11	26.10.2028	957	1,5
	1994WR12	26.11.2030	2693	0,16
6037	1988EG	28.02.2041	3650	0,7
	1994CN2	06.08.2042	3351	1,7
3362	Хуфу	22.08.2045	3172	0,9
2340	Хатор	21.10.2045	3620	0,35
4769	Касталия	27.08.2046	3755	1,7
4581	Асклепий	24.03.2051	1825	0,3
	1998TA	01.10.2053	1316	0,27
	1998DV9	04.02.2058	2319	1,0
4953	1990MU	05.06.2058	3426	6,0
4660	Нерей	14.02.2060	1197	0,9
7822	1991CS	31.08.2065	3740	1,4
2340	Хатор	21.10.2069	987	0,35
4179	Тоутатис	06.11.2069	2977	4,0
8566	1996EN	08.09.2070	3755	1,7
4660	Нерей	05.02.2071	2229	0,9
	1994CC	13.06.2074	2992	1,0
	1989UQ	02.12.2087	3590	0,6
	1997NC1	26.06.2088	3665	0,8
3361	Орфей	19.04.2091	3157	0,6
3200	Фазтон	14.12.2093	2902	4,5
	1997XF11	27.10.2095	2887	1,5
	1996RG3	28.02.2096	3426	0,8

Периоды от 20 до 200 лет при среднем — 81 год. Среднее значение большой полуоси орбиты 38 а.е., среднее значение перигелийного расстояния 0,9 а.е.

3. Долгопериодические кометы.

Периоды обращения вокруг Солнца больше 200 лет. Среднее значение перигелийного расстояния 1,1 а.е.

Долгопериодические кометы являются, в основном, выходцами из внешнего сферического пояса Оорта (20 тыс. а.е. ÷ 100 тыс. а.е.), образовавшегося из планетезималей, выброшенных из области планет-гигантов в период образования Солнечной системы. Отток комет из него компенсируется их приходом из более плотного внутреннего сферического облака Хиллса с большими полуосями орбит 1 тыс. а.е. ÷ 20 тыс. а.е. Масса облака Хиллса на два порядка может превышать суммарную массу тел облака Оорта (ожидаемое число кометных ядер в облаке Хиллса $\approx 10^{13}-10^{14}$) (Герасимов, Мушаилов, 2000). Наряду с этими резервуаром кометных тел могут считаться пояса Казимирчак-Полонской между орбитами планет-гигантов (между Ураном и Нептуном, к примеру, сохранилось до 0,5 % пленетезималей) (Цицин, 2000).

В настоящее время поток комет из облака Оорта в окрестности Солнца составляет около 5 комет в год.

Долгопериодические кометы от значения меры их орбитальной энергии подразделяются на классы, из которых можно выделить семейство комет Крейца (более 300 комет), имеющих исключительно малые перигелийные расстояния — эти участки их орбит «царапают» Солнце, то есть проходят частично во внешней солнечной атмосфере — короне.

Подавляющее большинство комет обращается вокруг Солнца по вытянутым эллиптическим орбитам. Сейчас известно около 700 долгопериодических комет с периодами обращения более 200 лет. Известно также около 30 комет, весьма близко приближающихся к Солнцу в перигелии. Примерно 15 % всех известных комет приходят из периферических районов Солнечной системы и имеют орбиты, близкие к параболическим. Наклоны орбит долгопериодических комет к плоскости эклиптики распределены хаотически.

Наклоны орбит коротко- и среднепериодических комет (периоды менее 200 лет) к плоскости эклиптики малы. Таких комет известно свыше 200. Предполагается, что короткопериодические кометы произошли из долгопериодических в результате эволюции орбит последних под возмущающим действием больших планет, главным образом, Юпитера. Соответственно, группа ко-

мет семейства Юпитера намного более многочисленна, нежели других больших планет, так как гравитационные возмущения от него в 10 раз больше, чем от Сатурна и в 100 раз больше возмущений от всех остальных планет. Есть предположение (обоснованное ещё Всехсвятским), что некоторые короткопериодические кометы являются продуктами вулканической деятельности Ио и Тритона.

На рис. 2.1 показано распределение известных комет по величине их афелийного расстояния в сравнении с расстояниями больших планет (Боярчук, 1999; Ипатов, 2000).

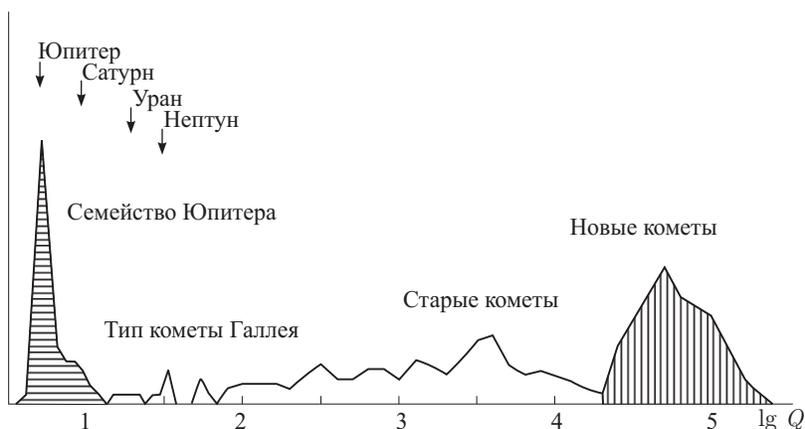


Рис. 2.1. Распределение орбит известных комет по афелиям

Особую область занимают «новые» кометы с почти параболическими орбитами. Небольшое их количество, возможно, приходит из межзвёздной среды, и эти кометы не являются членами Солнечной системы. Вообще, проблема захвата Солнечной системой межзвёздных комет чрезвычайно актуальна и активно рассматривается многими исследователями (Томанов и др., 1994; Bagrov, Perov, 2001).

Оценка количества комет, сближающихся с Землёй, более трудна, чем астероидов. Орбиты комет, как правило, очень неустойчивы и быстро изменяются. Причина этого в возмущениях со стороны планет и быстрая потеря кометами своей массы. К тому же, до сих пор неизвестен механизм происхождения комет. От того, как произошли (или в настоящее время происходят) кометы, зависит мера обусловленной ими доли астероидно-кометной опасности. Вместе с тем известно, что долгопериодические околопараболические кометы обладают в районе земной

орбиты большими скоростями, чем короткопериодические кометы и астероиды. Орбиты долгопериодических комет ориентированы случайным образом по отношению к плоскости эклиптики. В связи с этим возможны их лобовые соударения с Землёй с относительными скоростями до 72 км/с. Это может составить энергию порядка 10^5 Мт тротилового эквивалента.

Кометы, принадлежащие разным группам, представляют разную опасность с точки зрения столкновения с Землёй. Для того, чтобы столкновение с Землёй было возможно, комета должна иметь перигелийное расстояние, меньшее 1 а. е. Анализ показывает, что этим как раз и отличаются долгопериодические кометы.

Сейчас известно 13 комет и 15 остатков комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями, меньшими 1 а. е. По некоторым оценкам, общее их количество с размерами головы более 1 км может составлять около 800.

Характерное время до соударения с Землёй потенциально опасной кометы семейства Юпитера (активной или угасшей) составляет 770 млн лет, скорость соударения — около 23 км/с.

Это же время для кометы типа Галлея составляет около 6 млрд лет, скорость соударения — 45 км/с.

Количество долгопериодических и «новых» комет в Солнечной системе может достигать нескольких миллионов. В среднем ежегодно появляется одна такая комета с диаметром ядра свыше 15 км. Характерная скорость соударения с Землёй для этих комет составляет 53 км/с.

Следует отметить, что вопрос о наличии вблизи Земли мини-комет, широко обсуждавшийся на рубеже 90-х гг. (Yeates, 1989), видимо, получил своё решение (Боярчук, 1999). Мини-кометы — это рыхлые ледяные тела, покрытые слоем пыли, размерами порядка 10 м, массой около 100 т. При попадании в атмосферу Земли с частотой около 10 в год (хотя есть и другое мнение — Сазонов, 2000а) взрываются. Энергия взрыва оценивается от нескольких до сотен килотонн.

в) Метеорное вещество. Наконец, орбиту Земли ежегодно пересекают несколько десятков метеорных потоков, состоящих из тел малого размера: менее 0,1 см — пылевой составляющей и от 0,1 см до 100 м — метеороидов. В настоящее время известно около 20 главных метеорных потоков с часовыми числами 20–140 метеоров в час. Кроме них выделяют до 6000 малых метеорных потоков или ассоциаций (Обрубов, 2000).

Достаточно полные данные о метеороидах самых мелких размеров позволяют выделить среди них 5 популяций (Боярчук, 1999):

- 1) внутренние;
- 2) астероидные;
- 3) гало-метеороиды;
- 4) метеороиды с большим наклоном орбиты (*i*-метеороиды);
- 5) эксцентриситетные или *e*-метеороиды.

Связь метеорных потоков с кометами, остатками которых они являются, очевидна. Спокойный распад комет на большой дуге орбиты в окрестностях перигелия при сублимации замёрзших газов — наиболее вероятный путь образования метеороидного роя. Хотя не исключается возможность образования роя при катастрофических процессах разрушения ядра кометы под действием приливных, центробежных или иных сил и при возможных столкновениях его с астероидами или крупными метеороидами (Обрубов, 2000).

В 1908 г. произошло столкновение с Тунгусским телом, которое, как предполагают некоторые авторы, являлось фрагментом ядра кометы Энке, но принадлежало уже метеорному потоку β -Тауриды, прародительницей которого и являлась комета (Бронштен, 2000).

В своём большинстве массы метеороидов заключаются в пределах $10^{-7} \pm 10^7$ г. Однако, такой метеороид, как Тунгусское тело ($\approx 10^{12}$ г), а также осколки кометы Шумейкеров-Леви 9, влетевшие в атмосферу Юпитера в июле 1994 г., увеличивают этот диапазон до $10^{16} - 10^{17}$ г. Кроме того, микронная фракция естественного мусора и частицы, появляющиеся в результате термоэрозии болидных хвостов, быстро тормозящиеся в верхних слоях атмосферы и затем медленно (до двух лет) оседающие в атмосфере, расширяют диапазон масс пылевых частиц в ОКП до $10^{-6} - 10^{-7}$ г (Тирский, 2000). Более мелкие частицы тормозятся в атмосфере раньше, чем нагреваются до температуры испарения и начинают светиться.

Плотность железных метеоритов $\approx 7,6$ г/см³, каменных $\approx 3,5$ г/см³, рыхлых каменных $\approx 2,2$ г/см³.

Хотя метеороидные частицы близки по химическому составу к каменным и железным метеоритам, они тормозятся в атмосфере так, будто плотность их весьма мала: среднее значение плотности метеороидов в метеорных потоках составляет 0,28 г/см³, что свидетельствует в пользу их кометного происхождения. Та-

ким образом размеры метеороидов варьируются в пределах от 10^{-5} см до ≈ 10 км.

Здесь следует отметить, что, в отличие от космической пыли, ядра комет имеют рыхлую структуру и с потерей летучего компонента разваливаются на многочисленные осколки.

Метеоры, болиды и астероиды располагаются в Солнечной системе примерно в одной и той же области. Это означает, что метеорные потоки связаны не только с кометами, но и с астероидами. Примером может служить Хирон — первый открытый объект (1977 г.) пояса Койпера. Его первоначально считали астероидом, однако через 10 лет после открытия он резко начал увеличивать свой блеск, то есть повёл себя как комета. К настоящему времени накоплено достаточно фактов, свидетельствующих о том, что Хирон является гигантской кометой с диаметром ядра до 200 км.

Значительная часть метеороидов сосредоточена в метеорных потоках. Но метеорные потоки имеют достаточно ограниченный срок существования. Так как метеорные частицы распределены по всей длине орбиты потока, то гравитационное воздействие больших планет оказывается для каждой частицы различным. Этот эффект приводит к достаточно быстрому размыванию потока (несколько десятков тысяч лет).

Единого мнения об образовании метеорных потоков не существует. Однако общепризнанны следующие механизмы их образования (Боярчук, 1999):

- 1) выброс вещества при дезинтеграции кометных ядер (сублимация, взрывные процессы, полное разрушение ядер);
- 2) одновременное образование комет и метеорных потоков при дезинтеграции более крупных тел;
- 3) дробление астероидов при столкновениях.

Так, метеорный комплекс Таурид, образовавшийся, как считалось, при разрушении ядра кометы Энке, включает в себя также несколько астероидов группы Аполлона (*Worlds in interaction*, 1996). Сейчас в этом комплексе найдены 14 астероидов и крупный метеороид, разделённые на две группы, образовавшиеся около 20 тыс. лет назад. Размеры макротел комплекса таурид составляют 0,5–2,0 км. Объекты комплекса Таурид могут сталкиваться с Землёй.

В табл. 2.3 приведены данные о связи астероидов с метеорными потоками (Волощук, 1995).

Неисследованным является до сих пор вопрос о существовании и наблюдениях метеоров галактического происхождения.

Таблица 2.3. Связь астероидов с метеорными потоками

Астероид	Метеорный поток	Астероид	Метеорный поток
1566 Icarus	Arietids, Taurids-Perseids	2201 Oljato	Canids, χ -Orionids
1620 Geographos	March Virginids, Φ -Bootids	3200 Phaethon	Geminids, Day Sextantids, Canis Minorids, δ -Leonids
1862 Apollo	η -Librids, χ -Scorpiids	4015 Wilson-Harrington	δ -Cygids
2062 Aten	ω -Draconids, Φ -Bootids	1937 UB (Hermes)	χ -Piscids, ε -Arietids, δ -Arietids, δ -Piscids
2101 Adonis	Capricornids-Sagittarids, χ -Sagittarids, χ -Capricornids, Scorpiids-Sagittarids, δ -Capricornids, α -Capricornids	4179 Toutatis	κ -Aquarids

Каким образом распределены частицы естественного происхождения в околоземном пространстве?

Раданты метеорных потоков имеют неравномерное распределение на небесной сфере. Различаются шесть основных областей направлений потоков метеорных тел на Землю (рис. 2.2). Это области, близкие к направлению на Солнце и противоположному ему. Наиболее мощный поток метеорных тел на Землю идёт со стороны антисолнечной точки на небесной сфере. Ещё два направления близки к полюсам эклиптики (так называемая тороидальная составляющая). Характерная относительная скорость метеоров этих направлений составляет около 70 км/с. Ещё два направления расположены симметрично по отношению к плоскости эклиптики на эклиптических широтах порядка $\pm 15^\circ$ в направлении, перпендикулярном направлению на Солнце. Отсюда поток метеоров идёт навстречу орбитальному движению Земли со скоростью соударений около 60 км/с.

В последнее время предпринимаются попытки выделения радиантов межзвёздных метеорных потоков, располагающихся в районах апекса и антиапекса Солнца (*Bagrov, Perov, 2001*).

Основными используемыми моделями распределения метеороидных потоков в ОКП являются модели, описанные в (*Grun etc., 1985; Jenniskens, 1995; McBride, 1997*).

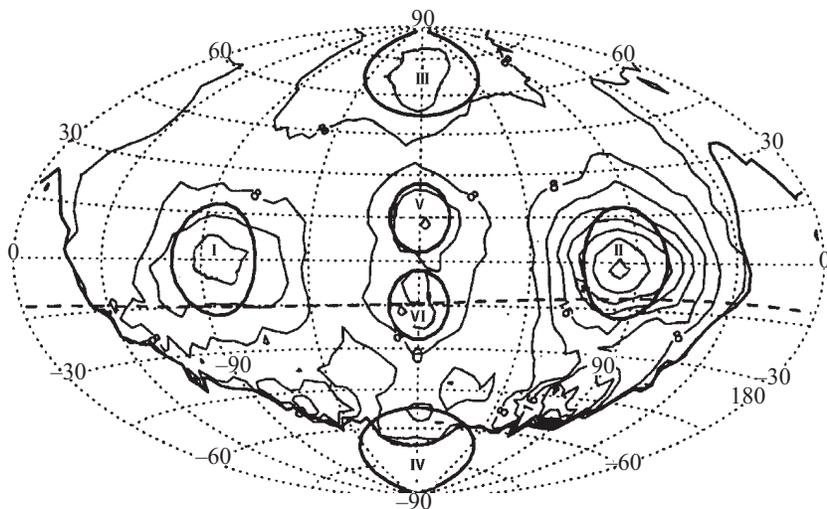


Рис. 2.2. Области расположения основных радиантов метеорных потоков на небесной сфере. I — направление на Солнце; II — противосолнечное направление; III — Северная тороидальная составляющая; IV — Южная тороидальная составляющая; V — северная составляющая апекса орбитального движения Земли; VI — южная составляющая апекса орбитального движения Земли

г) Распределение в околоземном пространстве и оптические свойства естественного космического мусора. Нижними поясами естественного мусора в ОКП можно считать два пояса пылинок метеорного и вулканического происхождения, служащих центрами концентрации водяного пара (Куликовский, 2002). Один из них находится на высоте около 80 км, где отмечен минимум температуры (≈ 133 К) и образуются серебристые облака. Второй — выше 115 км, в области, в которой начинают светиться метеорные тела.

Существует целый ряд поясов естественного мусора и на более высоких орбитах. В работе (Гулак, 1983) рассмотрены результаты регистрации фрагментов космической пыли в околоземном пространстве на искусственных спутниках Земли. На рис. 2.3 представлены результаты регистрации метеорных частиц в окрестностях Земли, показывающие их достаточно неравномерное распределение в пространстве. Обращает на себя внимание весьма большая концентрация метеорной пыли в районе геостационарных орбит, а также провалы (по аналогии с распределением орбит астероидов главного пояса — люки), в которых такие частицы отсутствуют.

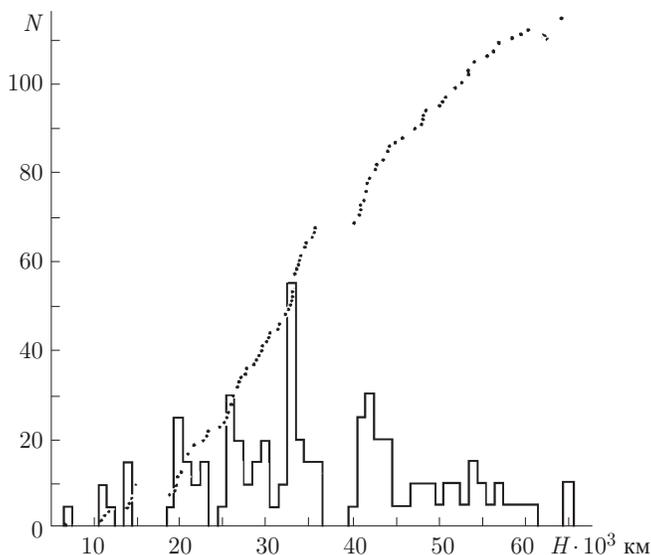


Рис. 2.3. Распределение метеорных частиц в околоземном пространстве в функции высоты над поверхностью Земли

Таким образом, экспериментально обнаружены стабильные дискретные пылевые кольцевые образования (пояса) в околоземном пространстве, формирующиеся в гравитационном поле Земли из метеорного вещества.

Здесь же следует отметить наличие пылевых облаков естественного мусора, расположенных в точках либрации L_4 и L_5 системы Земля-Луна на расстоянии лунной орбиты — так называемые «облака Кордылевского» (Левантовский, 1974; Freitas, Valdes, 1983), имеющие размеры порядка земного шара, но весьма низкую плотность — около $2 \cdot 10^{-5}$ г на 1 км^3 . Общая масса этих облаков пыли оценивается в 10^4 тонн. Образование и плотность облаков Кордылевского весьма заметно зависят от солнечной активности и связанной с ней интенсивностью солнечного ветра.

К естественной составляющей ОКП можно отнести также натриевый хвост Луны, сведения о котором весьма скудны.

В общем, после целой серии подобных экспериментов выявлено, что космическая пыль распределена в ОКП достаточно неравномерно (Смирнов, Семёнов, Ребриков, 2001).

Естественная составляющая космического мусора, как было показано выше, фактически представляет собой смесь частиц метеорного, кометного и астероидного происхождения. По оп-

тическим свойствам она близка к астероидам классов С ($a_v = 0,02 \div 0,09$), S ($a_v = 0,10 \div 0,22$), М ($a_v = 0,12 \div 0,13$). Показатели цвета астероидов: (U-B) = $0,2^m \div 0,6^m$, (B-V) — более $0,8^m$. Сюда можно добавить лунную поверхность с альбедо $a = 0,03 \div 0,10$ и медианным показателем цвета (B-V) = $1,2^m$ (Мороз, 1994; Шарпан, 1979). Здесь V — видимый блеск объекта в визуальной ($\lambda_{\max} = 550$ нм), B — в синей ($\lambda_{\max} = 440$ нм). R — в красной ($\lambda_{\max} = 700$ нм) областях спектра.

2.2. Отходы техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве

Наиболее близкой и значительно более актуальной для экологии такой динамической системы, как система «Земля–ОКП», является проблема искусственного (техногенного) космического мусора.

В первые годы освоения космического пространства вопрос о его загрязнении и влиянии этого загрязнения на земную природу вообще не ставился. Околоземная область функционирования искусственных космических объектов достаточно обширна: её объём составляет величину порядка $10^{14} - 10^{15}$ км³. Но всё же активная антропогенная деятельность в последние годы стала весьма ощутимо сказываться и здесь.

С 1957 г. на различные околоземные орбиты и в далёкий космос запущено около 22 000 искусственных космических объектов. Более половины из них снизились и сгорели в атмосфере. Около 7 000 остаётся на орбитах.

В результате взрывов и разрушений верхних ступеней ракет, самих спутников на околоземных орбитах общее число объектов диаметром более 1 см (то есть начиная с доступных наблюдений на низких орбитах радиолокационными средствами) оценивается в 30–70 тыс. единиц общей массой свыше 3 тыс. тонн.

Среди отслеживаемых службами контроля космического пространства функционирующие искусственные космические объекты составляют около 6%, окончившие активную работу — 21%, тела ракет — 16%, мусор от запусков — 12%, осколки — 45%. Количество неотслеживаемых объектов с поперечниками от 1 мм до 1 см оценивается в $3,5 \cdot 10^6$. Таким образом, наибольшее количество объектов, находящихся на орбитах, это как раз и есть космический мусор. Образуется он, главным образом, в результате разрушений искусственных космических объектов, более 20 лет находящихся на орбите: каждый разрушившийся объект

даёт в среднем от 6 до 50 осколков, хотя бывают и значительные отклонения в сторону увеличения числа осколков (до более чем 300 обломков от одного объекта — *Orbital Debris*, 1995; *Orb. Debr. Q.N.*, 2000).

Говоря о распределении искусственного космического мусора в околоземном пространстве, можно отметить его нахождение в зоне наиболее заселённых орбит. Таких наиболее заселённых зон две: геостационарные орбиты на высотах около 40 тыс. км от Земли и орбиты на высотах 800–1000 км. Можно ещё отметить зону пилотируемых полётов на высотах около 300 км и солнечно-синхронные орбиты. Геостационарная орбита наиболее плотно заселена объектами в количестве около 600 (из них более 100 — российские), рис. 2.4.

Ежегодно к ним прибавляется около 20–30 новых плюс значительное количество обломков как от вспомогательного оборудования, так и старых разрушившихся спутников. К ним по засорённости примыкают солнечно-синхронные орбиты. На высотах 800–1000 км долгое время располагалась основная масса спутников с ядерными энергетическими устройствами на борту, поскольку здесь они могут существовать сотни лет до полного исчезновения продуктов ядерного распада.

В структуру техногенного космического мусора входят также продукты экспериментов в космосе, попадающие после разрушения объектов на орбиты и падающие на Землю: продукты распада вещества космических ядерных реакторов, продукты технологических и биологических экспериментов, большое число частиц окиси алюминия, попадающих в космос и верхнюю атмосферу в результате работы реактивных двигателей, остатки ракетного топлива, окислителя и т. д. (*Jackson, Bernhard*, 1997).

Каждая из фракций антропогенного загрязнения распространяется в ОКП под действием различных процессов.

Крупные фрагменты и осколки космического мусора разлетаются в ОКП по различным орбитам, создавая вокруг Земли искусственный пояс, который может существовать длительное время, испытывая вековые возмущения вследствие аэродинамического сопротивления разреженной атмосферы, плазмы магнитосферы и солнечного ветра. Одним из существенных факторов эволюции этого пояса являются взрывы пассивных или действующих ИСЗ и их столкновения с другими ИСЗ или космическим мусором. Динамика их движения описывается кеплеровскими уравнениями движения с учётом сопротивления среды и взаимных столкновений. Постепенно часть осколков, находящихся на

низких орбитах, теряет высоту и сгорает в атмосфере. Наиболее крупные фрагменты могут выпасть на поверхность Земли.

Микрочастицы, образуемые в ОКП в результате взрывов, выбросов двигателей ракет-носителей, распространяются в виде некоторого рассеивающего облака. На высотах 200–500 км облака таких частиц с размерами от долей микрона до сотен микрон находятся на орбите от нескольких часов до нескольких суток. Эволюция микрочастиц во многом носит статистический характер, учитывая их более высокую числовую плотность и, соответственно, более высокие вероятности взаимных столкновений. Уход их с орбиты и рассеяние в пространстве вызывается значительным атмосферным торможением. В конечном итоге микрочастицы также попадают в плотные слои атмосферы и тормозятся. Часть из них пополняет пылевую фракцию на высотах мезосферы, другие опускаются в более низкие слои.

Распространение газовой фракции в общем случае описывается кинетическими уравнениями больцмановского типа (*Шематович, 1993*). После установления теплового равновесия с окружающей средой происходит перенос и диффузия газового облака под действием атмосферных процессов. При этом, наряду с динамикой, важную роль играют процессы химического взаимодействия между веществом выброса ракет-носителей и составляющими атмосферы.

При оценке степени засорённости ОКП техногенными объектами, расчёте вероятности их взаимных столкновений, анализе экологических последствий загрязнения и связанных с ним процессов возникает потребность построения высотно-широтного распределения объёмной плотности космических объектов (*Назаренко, 1993*) на заданный момент времени $\rho(H, \varphi)$, где H — высота объекта над поверхностью Земли, φ — географическая широта. Для анализа объёмной плотности, учитывая большое число объектов в ОКП, используется статистическая плотность распределения космических объектов по высоте и широте

$$q(H, \varphi) = \frac{\partial^2 N(H, \varphi)}{\partial H \partial \varphi}. \quad (2.1)$$

Здесь $N(H, \varphi)$ — число объектов с текущими значениями высоты $H(t)$ и широты $\varphi(t)$, которое находится в области $H(t) < H$, $\varphi(t) < \varphi$. При естественном предположении, что распределение искусственных космических объектов по долготе является равномерным, знание распределения $q(H, \varphi)$ позволяет легко

определить объёмную плотность числа космических объектов

$$\rho(H, \varphi) = \frac{q(H, \varphi)}{2\pi(H + R_3)^2 \cos \varphi}. \quad (2.2)$$

Функция $q(H, \varphi)$ и общее количество техногенных объектов (N) в исследуемой области пространства связаны соотношением

$$N = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} 2 \int_0^{\pi/2} q(H, \varphi) dH d\varphi. \quad (2.3)$$

Естественной информационной основой построения высотно-широтного распределения техногенных объектов в ОКП является использование достаточно полного каталога орбитальных данных космических объектов. В работах (*Назаренко, 1993; Назаренко, Чернявский, 1995*) представлены полученные на математической модели данные о количестве образовавшихся, сгоревших и оставшихся искусственных объектов на интервале прогноза с 1960 по 2004 год. Ожидаемый объём каталога в 2004 г. для объектов с высотами до 2000 км составляет около 7000. В прогнозируемых данных чётко выражены два максимума плотности объектов на высотах 800–1000 км и 1300–1500 км. Качественно и количественно результаты моделирования хорошо совпадают, а также показывают, что на больших высотах число объектов растёт быстрее, чем на малых. Тенденция к стабилизации числа объектов заметна только на высотах до 600 км.

На рис. 2.5 показано высотное распределение плотности потока таких объектов. Видно, что наибольшая плотность потока наблюдается на низких околоземных орбитах в области высот 800–1000 км. Следующий пик в высотном распределении плотности потока наблюдается в области геостационарной орбиты (высота 36000 км), однако абсолютное значение плотности потока искусственных объектов здесь существенно меньше, чем на низких орбитах (*Физика косм. простр., 1997*).

Можно перечислить основные модели орбитального мусора, используемые различными службами в настоящее время (*Назаренко, 2001*):

— NASA: используя специальные программы для моделирования эволюции мусора от различных источников и проводя непосредственную экспериментальную проверку, построено несколько моделей техногенного мусора в ОКП;

— Росавиакосмос: в качестве стандартной принята модель SDPA. Отличительной характеристикой модели является метод

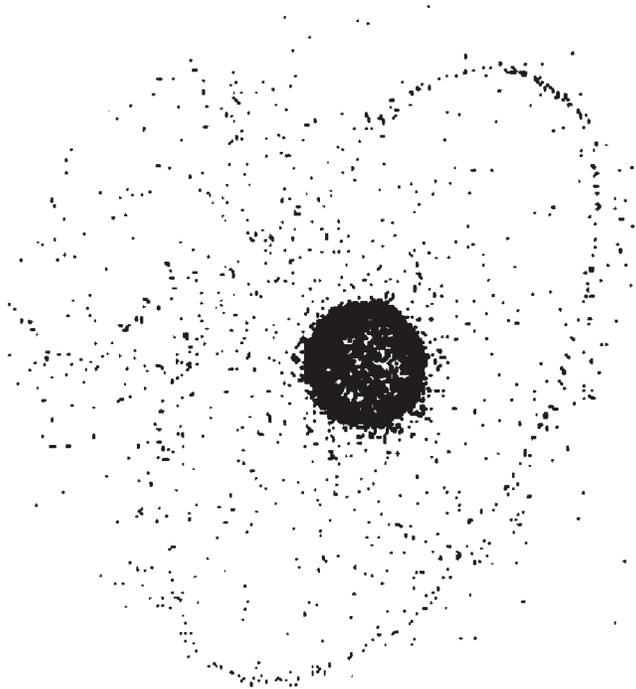


Рис. 2.4. Пространственное распределение искусственного космического мусора в околоземном космическом пространстве

моделирования динамики среды техногенного мусора, позволяющий эффективно отслеживать влияние различных факторов, в частности, активности Солнца;

— BNSA: Учитывается влияние на техногенный мусор атмосферного торможения, гармоник потенциала гравитационного поля Земли, Луны и Солнца, давление солнечного излучения (Мещеряков, 2001).

В работе (Пудовкин О.Л., 2000) введено понятие техногенной космической обстановки, которое представляет целостное, включающее в себя множество техногенных космических тел, образование, состояние которого определяется условиями их нахождения на орбитах и факторами разного рода, а свойства не сводятся к свойствам этих тел в отдельности и не вытекают из данных свойств. Она является открытой системой, погружённой в среду, которая воздействует на неё. Факторы и условия такого воздействия подразделяются на активные (события на орбитах ИСЗ) и пассивные (воздействия физических параметров ОКП).

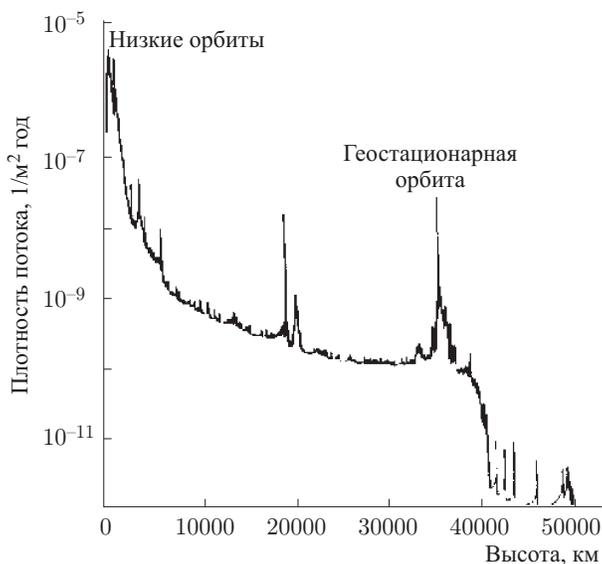


Рис. 2.5. Плотность потока техногенных объектов в ОКП

Техногенные космические тела являются, таким образом, основными объектами техногенной космической обстановки.

Классификация техногенных космических тел по различным их признакам, от типов орбит до свойств саморазрушения представлена на рис. 2.6.

Известно, что конструкция любого ИКО имеет ряд покрытий, основной задачей которых является рассеяние в пространство падающего на объект излучения. Это, большей частью покрытия, образованные различными красками, тканями а также элементами экранно–вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), состоящей из нескольких слоёв металлизированной полимерной плёнки, переложённой стекловатой. Среди материалов покрытий обязательно присутствуют металлы, в основном, алюминий, сталь, титан. К внешним элементам конструкции можно отнести также солнечные батареи космических объектов (табл. 2.4.) (Муртазов, 1994, 1998).

Естественно, эти же покрытия находятся на поверхности фрагментов космического мусора, появляющегося в результате распада по различным причинам ИКО и их ракет–носителей.

По полученным данным можно описать основные оптические свойства изученных поверхностей.

Стеклоткани. Фазовые кривые достаточно сложны. Наблюдается значительный избыток рассеянного излучения, осо-

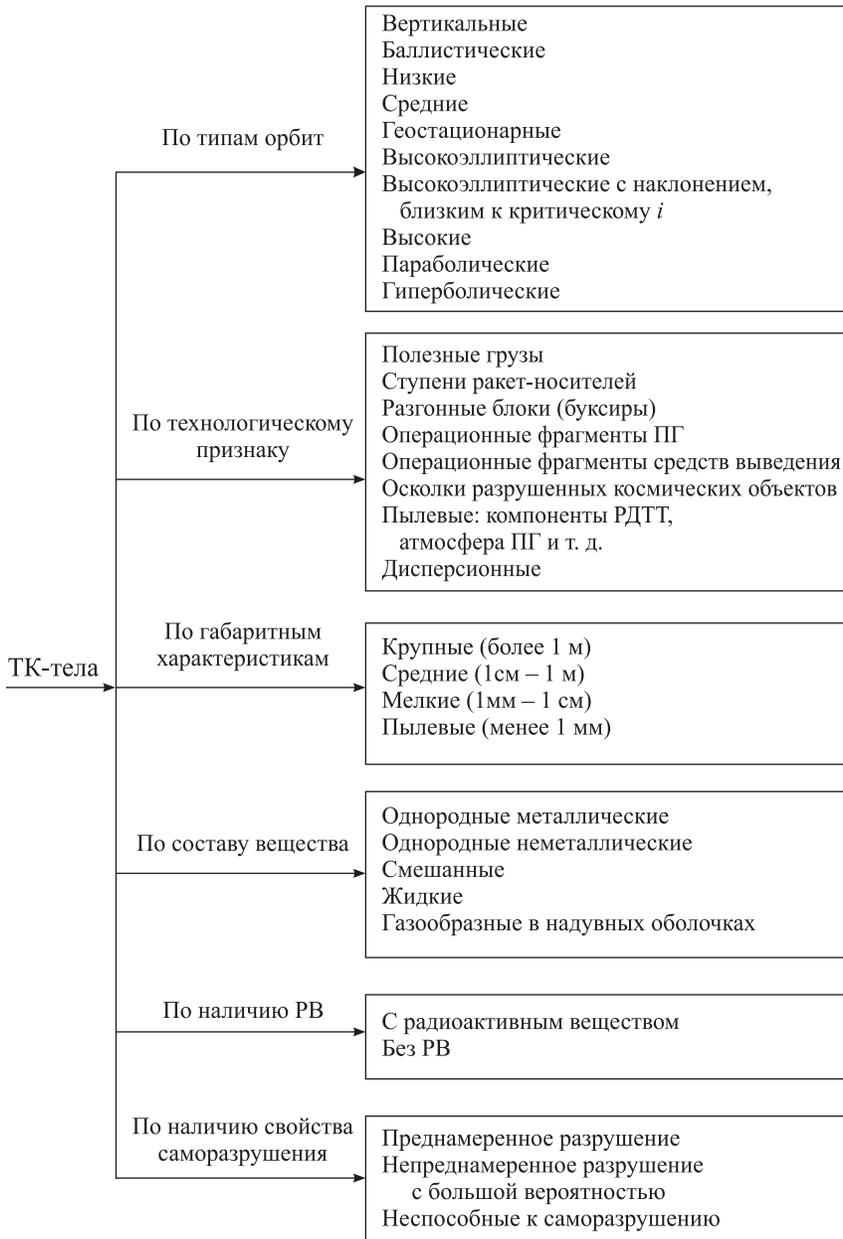


Рис. 2.6. Классификационный граф техногенных космических тел

Таблица 2.4. Материалы конструкций космических объектов, образующие техногенный космический мусор

Конструкция	Материал конструкции или её покрытия
Корпус	Алюминий, алюминий содовый, майлар с подложкой из алюминия, каптоновая плёнка, краска, ЭВТИ, стеклоткань, сверхпрочные сплавы Al, Ti, Be, нержавеющая сталь.
Ракеты и двигатели	Нержавеющая сталь, сверхпрочные титановые сплавы, алюминий.
Солнечные батареи	Кремний, двуокись кремния с подложкой из серебра, арсенид галлия.
Антенны	Алюминий, сплав алюминия со сталью, молибденовая проволока с золотым покрытием, алюминий, покрытый эпоксидной смолой, графито — эпоксидный состав.
Телескопы	Сульфид свинца (инфракрасные телескопы, алюминий (оптические телескопы). Поверхность — ЭВТИ.
Различные виды отражающих покрытий	1) магний, ниобий, кремний, эфир ортотитановой кислоты — для просветляющих покрытий; 2) серебро, никель, алюминий, окись кремния — для отражающих непрозрачных покрытий; хром, титан, золото, цирконий — для непрозрачных зеркал и призм.

бенно в направлении, перпендикулярном направлению падения излучения. Это, по-видимому, связано с перераспределением излучения в нитях стекловолокна. Данный эффект проявляется и на спектральных кривых, чаще всего имеющих вид чередующихся максимумов и минимумов, зависящих от ориентации поверхности.

Краска. Основной краской, применяющейся в покрытиях ИКО и ракет-носителей, является белая эмаль. Рассеяние излучения — смешанное. Диффузная составляющая практически ламбертовская. Амплитуда зеркальных вспышек зависит от качества полива поверхности и достигает 3^m при ширине вспышки до 10° . Спектр достаточно пологий со значительным завалом при длинах волн, короче 400 нм.

Такие особенности дают возможность достаточно просто идентифицировать белые эмали по результатам спектральных или колориметрических наблюдений.

Стеклотекстолит. Весьма похож по фазовым и спектральным характеристикам на стеклоткани, однако, имеет заметную зеркальную составляющую в рассеянии.

Солнечные панели. Соотношение зеркальной и диффузной составляющих близко к такому соотношению для идеальных поверхностей. Альbedo диффузного рассеяния много меньше 10%. В спектре около 400 нм имеется заметный избыток (так называемая «синяя вспышка»), в это время показатель цвета (B-V) становится отрицательным — важный критерий для идентификации солнечных панелей по их фотометрии. Можно отметить, что заметную диффузную компоненту рассеяния имеет обратная сторона панелей (Мурина, Нежданова, 1995), что важно при наблюдениях фрагментов панелей, ставших техногенным мусором.

Металлы. Фазовые характеристики диффузной составляющей полированных металлических поверхностей близки к ламбертовским. Спектральные коэффициенты зеркальной составляющей отражения излучения металлами достаточно высоки: например, около 0,5 для стали, 0,8–0,9 для алюминия и титана вблизи 400 нм и 0,6 (сталь), 0,8–0,9 (алюминий, титан) вблизи 700 нм. Кроме того, их спектральные альbedo довольно мало зависят от длины волны в видимой области спектра. Таким образом, показатели цвета этих материалов безотносительно к спектру источника света близки к нулю и практически равны солнечным при реальных наблюдениях.

Результаты экспериментов по физическому моделированию оптических характеристик поверхностей ИКО позволили рассчитать по ним показатели цвета (B-V), (V-R) поверхностей космического мусора в системе Джонсона и соответствующие им спектральные альbedo в сравнении с оптическими свойствами естественных поверхностей.

Анализ всех полученных данных показывает, что оптические свойства поверхностей космического мусора достаточно разнообразны. Однако, с учётом данных по различным тканям удалось построить общую классификацию материалов покрытий естественного и техногенного мусора в околоземном пространстве по их оптическим свойствам. Здесь выделяются шесть классов покрытий, занимающих определённые зоны на плоскости «показатель цвета (B-V) — альbedo в визуальной области» (Муртазов, 2000) На рис. 2.7 представлены эти классы в сравнении с областью, которую занимают в указанных параметрах поверхности естественных безатмосферных астрономических тел.

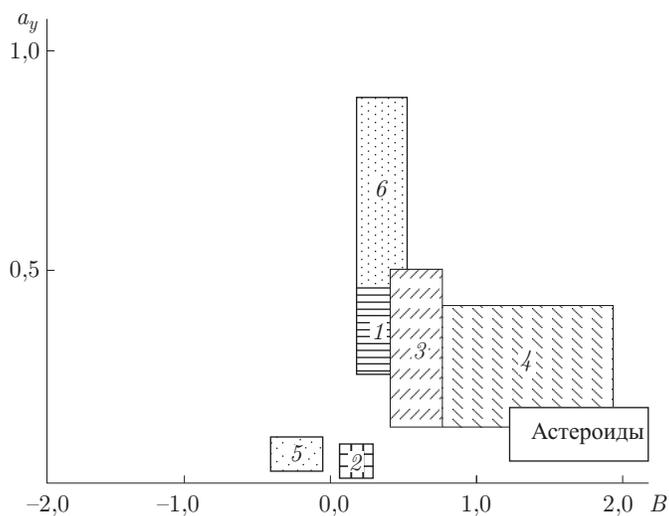


Рис. 2.7. Положение оптических классов материалов поверхностей ИКО и техногенного космического мусора в сравнении с положением естественного космического мусора на диаграмме «альbedo a_v –показатель цвета (B–V)»: 1 – белые краски и стеклоткани; 2 – тёмные ткани и графито-эпоксидные поверхности; 3 – жёлто-зелёные ткани; 4 – коричневые ткани; 5 – осколки солнечных панелей; 6 – металлы (в т. ч. майлар)

Глава 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Поскольку экология является наукой о взаимодействии, автором в настоящей главе подробно рассмотрены и проанализированы процессы взаимодействия между различными компонентами околоземного пространства, космоса и окружающей им биосферы. Сюда входят процессы, обусловленные взаимодействием естественных космических и техногенных излучений с веществом и полями ОКП, процессы, сопровождающие загрязнение ОКП. Все эти процессы выводят ОКП из состояния динамического равновесия. Однако, благодаря наличию достаточно большого количества отрицательных обратных связей ОКП возвращается к состоянию равновесия. Все процессы, протекающие в ОКП, оказывают воздействие на биосферу планеты, с которой у ОКП также существует большое количество как отрицательных, так и положительных (усиливающих воздействие) обратных связей.

Изучение перечисленных процессов и составляет, по мнению автора, физические основы экологии ОКП.

3.1. Физические процессы в околоземном пространстве и их связь с процессами в биосфере

а) Космические источники глобального воздействия на околоземное космическое пространство и биосферу. Основным компонентом ОКП, формирующим магнитосферу, отвечающим за строение радиационных поясов, ионосферы, ход процессов в ближнем космосе является геомагнитное поле.

Напряжённость общего магнитного поля Земли складывается из ряда компонентов (*Акасофу, Чепмен, 1975*):

$$B = M + m + M_D + N + S + L, \quad (3.1)$$

где M — главное поле, создаваемое нашей планетой, m — его вековая вариация, M_D — часть поля возмущений, связанная с внешними источниками, N — нециклическая вариация в спокойные периоды от внешних источников, S — периодическое поле, обусловленное влиянием Солнца, L — периодическое поле, связанное с влиянием Луны.

Здесь видно, что вариации земного магнитного поля обусловлены приливными воздействиями как Солнца, так и, хотя и в значительно меньшей степени, Луны (регулярные плавные вариации в магнитоспокойные дни и вариации неправильного характера в магнитовозмущенные дни).

Отметим в очередной раз, что основным источником глобального воздействия на Землю является Солнце, с которым наша планета имеет прямые или опосредованные связи через околоземное пространство.

Солнечный поток, величина которого определяет солнечную активность, состоит из нескольких компонент (*Застенкер, Зелёный, 2003*):

— электромагнитного излучения (главным образом, видимого света с небольшой добавкой инфракрасного и радиоизлучения), несущего основную часть энергии и мало изменяющегося во времени;

— спорадического ультрафиолетового и рентгеновского излучений, а также энергичной части солнечного радиоизлучения, изменяющихся в широком диапазоне — в сотни и тысячи раз и появляющихся только на короткое время при возмущениях (например, в солнечных вспышках);

— потока заряженных частиц с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ (солнечные космические лучи), также возникающего только эпизодически во время очень сильных солнечных вспышек;

— солнечного ветра — сильно изменяющегося (в десятки раз) потока плазмы, состоящего из ионов и электронов в равной концентрации.

В табл. 3.1 (*Владимирский, Кисловский, 1982*) перечислены показатели внешней среды, изменяющиеся при вариациях солнечной активности (без учёта влияния последней на погоду и тропосферную циркуляцию).

Авторы отмечают, что ряд показателей здесь могут не являться экологически значимыми. Это: а) вариации интенсивности солнечного излучения в радиочастотном «окне прозрачности» (всплески радиоизлучения от больших вспышек, шумовые бури) ввиду того, что уровень фона искусственного происхождения

Таблица 3.1. Физические факторы, зависящие от солнечной активности

Процесс	Максимальное изменение в цикле солнечной активности	Продолжительность (в скобках — частота следования)
Излучение Солнца в оптическом диапазоне	Не изменяется	
Излучение Солнца в радиоволновом диапазоне	До 10^{-17} Вт · м ² для мощной вспышки	Часы или сутки для меньшей интенсивности (раз в 1 месяц)
Солнечные космические лучи	До сотен процентов (при мощной вспышке)	Около 1 часа (раз в 2–5 лет)
Геомагнитная активность	До 10^{-3} Гс (главная фаза большой бури)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Электромагнитное поле — низкие частоты — сверхнизкие частоты	До сотен микровольт на метр До десятков вольт на метр	Десятки часов (постоянно) Часы (постоянно)
Изменения электростатического поля Земли	10–30 %	11-летний цикл?
Вариации галактических космических лучей — при Форбуш-эффекте — за 11-летний цикл	5 % До 20 %	Сутки (раз в 1 месяц) Сутки (раз в 1 месяц)
Колебания концентрации радона в приземной атмосфере	В 5 раз (при больших бурях)	Сутки (раз в 1 месяц)
Инфразвуковые колебания (около 0,03 Гц)	До 10 дн · см ⁻² (при больших бурях на средних широтах)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Вариации УФ-излучения вблизи 290 нм	До 10 %	11-летний цикл

в этом диапазоне примерно на три порядка выше факторов естественного происхождения; б) медленные изменения напряжённости магнитного поля Земли; в) вариации космических лучей ввиду их редкости и малости по сравнению с радиоактивностью земной природы.

Здесь можно привести пример торможения искусственных космических объектов и космической пыли верхней атмосферой и ионосферой. Их орбиты испытывают сложный комплекс

вариаций, связанных, главным образом, с солнечной и геомагнитной активностью. Важнейшими из них являются вариации, обусловленные 11- и 22-летним циклом солнечной активности. Плотность плазмы и нейтрального газа на высоте нескольких сотен километров в периоды максимума солнечной активности увеличивается в десятки раз по сравнению с минимумом: в 1958 г. плотность атмосферы на высоте 500 км была в 50 раз выше, чем в эпоху минимума 1964–65 гг. (Касименко, Рыхлова, 1995). Кроме того, заметными вариациями являются полугодовая (минимум в январе, максимум в июле), суточная, геомагнитная (связанная с геомагнитными бурями). Среднее значение изменений плотности нижней атмосферы в этих вариациях приведено в табл. 3.2 (Касименко, Шематович, 1990).

Таблица 3.2

Тип изменений	11-летний цикл	Полугодовая вариация	Суточная вариация	Геомагнитная вариация
Диапазон изменений	20	3	6	8

Следует отметить, что для высоких орбит, где влияние атмосферы уже не существенно, солнечный ветер способствует переходу космических объектов и фрагментов космического мусора на более высокие орбиты.

Однако, имеется ряд других факторов взаимодействия компонентов солнечной активности с околоземным пространством и через него с земной природой, экологическая значимость которых весьма высока.

Из них наиболее заметными являются солнечные вспышки, сопровождающиеся испусканием большого количества заряженных частиц. Самые энергичные из солнечных космических лучей достигают околоземного пространства через ≈ 10 мин. после максимума вспышки.

Результатом сильных и средних по интенсивности солнечных хромосферных вспышек являются следующие явления:

- дополнительная ионизация ионосферы, увеличение плотности и температуры нейтрального газа и плазмы;
- внезапное прекращение радиосвязи на частотах 5–20 МГц (15–60 м) через дневную половину земного шара (эффект Мегеля-Деллинджера);
- полное прекращение отражений от ионосферных слоёв и усиление поглощения радиоизлучения космических источников на волнах 10–15 м;

- внезапное усиление атмосферных помех или сигналов от очень удалённых станций на очень длинных волнах (>10 км);
- понижение высоты ионосферного слоя D ;
- магнитные бури, наступающие обычно не позднее двух суток после хромосферной вспышки, но чаще всего через 17–21 час;
- усиление потока мягкой составляющей космических лучей на поверхности Земли с небольшим запозданием против начала вспышки;
- эффект Форбуша — значительное ослабление на 5–10 суток интенсивности космических лучей после начала магнитной бури;
- полярные сияния, обычно совпадающие по времени с магнитными бурями, и другие ионосферные возмущения;
- нарушения озонового слоя.

Протоны и α -частицы, ускоренные до десятков и сотен МэВ, заполняют Солнечную систему только на короткое время после солнечной вспышки, но интенсивность частиц делает их главным источником радиационной опасности во внешней магнитосфере, где геомагнитное поле ещё слишком слабо, чтобы защитить ИСЗ. Они на фоне других, более стабильных источников радиации «отвечают» и за кратковременные ухудшения радиационной обстановки во внутренней магнитосфере, в том числе и на высотах, используемых для пилотируемых полётов. Наиболее глубоко в магнитосферу энергичные частицы проникают в приполярных районах, так как частицы здесь могут большую часть пути свободно двигаться вдоль *силовых линий*, почти перпендикулярных к поверхности Земли. Приэкваториальные районы более защищены: там геомагнитное поле, почти параллельное земной поверхности, изменяет траекторию движения частиц на спиральную и уводит их в сторону. Поэтому трассы полётов, проходящие в высоких широтах, значительно более опасны с точки зрения радиационного поражения, чем низкоширотные. Эта угроза относится не только к космическим аппаратам, но и к авиации. На высотах 9–11 километров, где проходит большинство авиационных маршрутов, общий фон космической радиации уже настолько велик, что годовая доза, получаемая экипажами, оборудованием и часто летающими пассажирами, должна контролироваться по правилам, установленным для радиационно опасных видов деятельности. Сверхзвуковые пассажирские самолёты «Конкорд», поднимавшиеся на ещё большие высоты, имели на борту счётчики радиации и обязаны были лететь, отклоняясь

к югу от кратчайшей северной трассы перелёта между Европой и Америкой, если текущий уровень радиации превышал безопасную величину. Однако после наиболее мощных солнечных вспышек доза, полученная даже в течение одного полёта на обычном самолёте может быть больше, чем доза ста флюорографических обследований, что заставляет всерьёз рассматривать вопрос о полном прекращении полётов в такое время (*Петрукович, Зелёный, 2001а*). Однако, всплески солнечной активности подобного уровня регистрируются реже, чем один раз за солнечный цикл — 11 лет.

Космические лучи, как выяснилось в последние годы, оказывают значительное влияние на процессы ионизации составляющих ионосферы и атмосферы. Учёт этого влияния весьма важен при проведении расчётов климатических моделей Земли (*Кочаров, 1996*). Кроме того, космические лучи любого происхождения являются составной частью процесса образования грозового электричества и разрядов молний. Имеются данные о том, что в период Форбуш-эффекта, когда уровень галактических космических лучей понижается, уменьшается количество осадков и площадь облаков над планетой. Таким образом, вековое уменьшение потока космических лучей (связанное, как указывалось выше, с взрывом близкой сверхновой), может быть одним из механизмов, вызывающих глобальное потепление на Земле (*Кочаров, 1996, 2001*).

Кроме того, в последнее время популярным стало обсуждение глобального воздействия на биосферу в различные геологические периоды потока космических лучей больших энергий и гамма-излучения, образованного при взрывах близких сверхновых звёзд (*Benitez et al., 2002*). Этот вопрос поднимался ещё И.С. Шкловским (*Шкловский, 1976*).

Во время геомагнитной бури внезапно изменению подвергается вертикальная составляющая геомагнитного поля. Такое внезапное начало бури означает приход ударной волны из межпланетного пространства к Земле. Далее планета погружается в плазму и магнитное поле за фронтом ударной волны (начальная фаза). Она продолжается от 30 минут до нескольких часов. В этой фазе напряжённость геомагнитного поля на низких широтах больше, чем перед внезапным началом бури, а в полярных областях наблюдаются увеличенные и весьма иррегулярные флуктуации. Магнитосфера подвергается воздействию больших флуктуаций плазмы и поля солнечного ветра с характерным временем от нескольких секунд до нескольких часов.

Ударная волна также вымывает мелкие фракции космического мусора естественного и техногенного происхождения из областей ОКП, где они скапливаются, то есть является своеобразным чистильщиком (Касименко, Рыхлова, 1995).

Через 2–4 суток после магнитной бури происходит перестройка барического поля тропосферы, что приводит к её нестабильности, нарушениям циркуляции атмосферы, развитию аномальных явлений в нижней атмосфере планеты.

Во время магнитных бурь возникают акустические колебания. Интенсивность этого низкочастотного излучения возрастает в десятки и сотни раз. Обычно через 4–6 часов после начала бури амплитуда инфразвуковых колебаний на средних широтах начинает плавно возрастать, достигает максимального значения, спустя несколько часов уменьшается. Генерируются эти инфразвуковые волны как при развитии полярных сияний, так и при развитии процессов в экосистемах (создающих постоянный акустический шум). Однако и они в некоторых полосах частот коррелируют с индексами солнечной активности.

В конце XX века появилось мнение, что, кроме солнечных вспышек, основным источником геоэффективных возмущений солнечного ветра, дающих заметное воздействие на земные процессы — магнитные бури, нарушения радиосвязи, интенсивные полярные сияния, являются корональные выбросы. Это, в какой-то степени, возврат к модели Чепмена — выбросу сгустков плазмы при возмущениях на Солнце — но уже на фоне постоянно присутствующего солнечного ветра (Застенкер, Зелёный, 2003).

При своём движении от Солнца корональные выбросы часто принимают форму замкнутых образований со своеобразным поведением плазмы и магнитного поля — магнитных облаков, приводящих к сильным (иногда экстремальным) возмущениям на Земле. Таким образом, выстраивается причинно-следственная цепочка — корональные выбросы массы образуют магнитные облака, которые приводят к возмущениям магнитосферы Земли (рис. 3.1).

Энергичные электроны вблизи ударной волны, движущейся перед корональным выбросом, возбуждают электрические ленгмюровские колебания межпланетной плазмы на её собственной частоте, пропорциональной корню из плотности частиц плазмы.

За счёт нелинейного взаимодействия плазменные колебания, в свою очередь, генерируют электромагнитные волны на плазменной частоте или на её второй гармонике. Данные волны свободно распространяются во все стороны и улавливаются широкополосным приёмником, установленным на борту космиче-

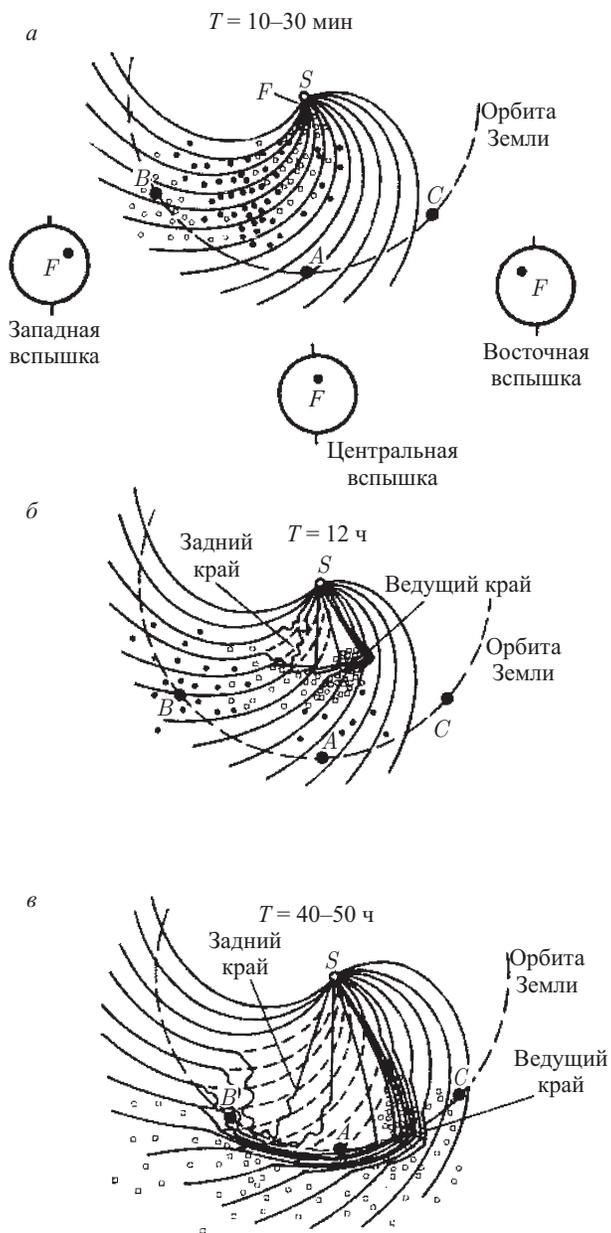


Рис. 3.1. Стадии возмущения межпланетной среды при солнечной буре: а) 10–30 мин.; б) 12 час.; в) 50 час. после начала вспышки. Локализация вспышки на диске Солнца показана буквой F. Обозначены: — — протоны с энергией ≤ 15 МэВ; • — протоны с энергией ≥ 40 МэВ; ○ протоны с энергией > 1 ГэВ. (Акасофу, Чепмен, 1975)

ского аппарата, на частоте, определяемой плотностью частиц плазмы в том месте, где они возникли. Когда фронт коронального выброса находится не очень далеко от Солнца, где плотность порядка 10^4 см^{-3} , регистрируется излучение на частоте около 1 МГц, когда фронт пройдёт примерно половину пути от Солнца к Земле — на частоте около 100 кГц. При приближении фронта коронального выброса к Земле, где плотность межпланетной плазмы около 10 см^{-3} , фиксируется радиоизлучение на частоте около 40 кГц.

После солнечных вспышек ионосфера, поглощая солнечное рентгеновское излучение, нагревается и раздувается, создавая значительное дополнительное аэродинамическое сопротивление движению спутников и пилотируемых кораблей. Падение американской станции «Скайлэб», к примеру, явилось следствием крупнейшей солнечной вспышки, произошедшей в 1972 году. К счастью, во время спуска с орбиты станции «Мир» Солнце было спокойным, что облегчило работу российским баллистикам (Петрукович, Зелёный, 2001а).

14.07.2000 г. на Солнце произошёл сильнейший корональный выброс. Достигнув Земли, он существенно разогрел верхнюю атмосферу, в результате чего увеличились объём и плотность последней. Японская рентгеновская обсерватория ASCA (перигей на высоте 440 км) войдя 15.07.2000 в эти слои потеряла ориентацию и перешла в «спящий» режим, из которого её вывести не удалось (Звездочёт, 2000, № 3).

Плазма наиболее эффективно поглощает радиоволны только вблизи своей резонансной частоты, зависящей от плотности заряженных частиц и равной для ионосферы примерно 5–10 МГц (эффект Мегеля–Деллинджера). Радиоволны более низкой частоты отражаются от границ ионосферы, а волны более высокой — проходят сквозь неё, причём степень искажения радиосигнала зависит от близости частоты волны к резонансной. Спокойная ионосфера имеет стабильную слоистую структуру, позволяя за счёт многократных отражений принимать радиосигнал диапазона коротких волн (с частотой ниже резонансной) по всему земному шару. Радиоволны с частотами выше 10 мегагерц свободно уходят через ионосферу в открытый космос. Поэтому радиостанции УКВ- и FM-диапазонов можно слышать только в окрестностях передатчика, а на частотах в сотни и тысячи мегагерц связываются с космическими аппаратами. Во время солнечных вспышек и магнитных бурь количество заряженных частиц в ионосфере увеличивается, причём так неравномерно, что создаются плазменные сгустки и «лишние» слои. Это при-

водит к непредсказуемому отражению, поглощению, искажению и преломлению радиоволн. Кроме того, нестабильные магнитосфера и ионосфера и сами генерируют радиоволны, заполняя шумом широкий диапазон частот. Практически величина естественного радиофона становится сравнимой с уровнем искусственного сигнала, создавая значительные затруднения в работе систем наземной и космической связи и навигации. Радиосвязь даже между соседними пунктами может стать невозможной, но взамен можно случайно услышать какую-нибудь африканскую радиостанцию, а на экране локатора увидеть ложные цели (которые нередко принимают за «летающие тарелки»). В приполярных районах и зонах аврорального овала ионосфера связана с наиболее динамичными областями магнитосферы и поэтому наиболее чувствительна к приходящим от Солнца возмущениям. Магнитные бури в высоких широтах могут практически полностью блокировать радиоэфир на несколько суток. При этом, естественно, замирают и многие другие сферы деятельности, например, авиасообщение. Именно поэтому все службы, активно использующие радиосвязь, ещё в середине XX века стали одними из первых реальных потребителей информации о космической погоде (Петрукович, Зелёный, 2001б).

Во внешнем радиационном поясе наиболее эффективно удерживаются энергичные электроны. «Население» этого пояса очень нестабильно и многократно возрастает во время магнитных бурь за счёт вброса плазмы из внешней магнитосферы. Именно по внешней периферии этого пояса проходит геостационарная орбита, незаменимая для размещения спутников связи. Поскольку радиационная доза, создаваемая электронами, не столь велика, то на первый план выходит проблема электризации спутников. Любой объект, погружённый в плазму, должен находиться с ней в электрическом равновесии. Поэтому он поглощает некоторое количество электронов, приобретая отрицательный заряд и соответствующий потенциал, примерно равный температуре электронов в эВ. Появляющиеся во время магнитных бурь облака горячих (до сотен кэВ) электронов придают спутникам дополнительный и неравномерно распределённый, из-за различия электрических характеристик элементов поверхности, отрицательный заряд. Разности потенциалов между соседними деталями спутников могут достигать десятков киловольт, провоцируя спонтанные электрические разряды, выводящие из строя электрооборудование. Наиболее известным следствием такого явления стала поломка во время одной из магнитных бурь 1997 года американского ИСЗ TELSTAR, оставившая значительную часть

территории США без пейджерной связи (Петрукович, Зелёный, 2001б). Целой серией нарушений в работе бортовых систем (в частности, на научном спутнике Polar) или даже выходов из строя (научный спутник Equator-S и коммуникационный спутник Galaxya 4) «ознаменовался» приход к Земле магнитного облака 1–4 мая 1998 г. (Застенкер, Зелёный, 2003).

Ионизированные слои F_1 и F_2 ионосферы между 200 и 400 км состоят в основном из равного количества ионов O^+ и электронов. Они погружены в нейтральный газ из O_2 , O , N_2 и He с концентрацией около 10^8 см^{-3} . В многокомпонентной плазме из электронов, ионов и нейтральных молекул, пронизанной геомагнитным полем, возникают различного рода колебания с различными частотами (Прохоров, 1983).

Плазменные (ленгмюровские) частоты электронов

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{4\pi N e^2}}{m_e} \quad (3.2)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m_i}}. \quad (3.3)$$

Гиромагнитные частоты электронов

$$\omega_H = \frac{e H_m}{m_e c} \quad (3.4)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \frac{e H_m}{m_i c}, \quad (3.5)$$

где m_e , m_i — массы электрона и иона, e — заряд электрона, N — концентрация частиц, H_m — напряжённость геомагнитного поля.

Так как $m_i \gg m_e$, то $\omega_0 \gg \Omega_0$, $\omega_H \gg \Omega_H$. Например, для электронов $\omega_P/(2\pi) = 1,4 \text{ МГц}$, а для ионов атомарного кислорода $\Omega_H/(2\pi) = 54 \text{ Гц}$.

Поглощение излучения в ионосфере пропорционально частоте соударений частиц, так как чем больше число столкновений, тем большая часть энергии, получаемой частицей из волны, переходит в тепло. Поэтому с уменьшением высоты поглощение возрастает. С увеличением же частоты волны поглощение уменьшается.

На распределение концентраций электронов и ионов и их температуру оказывают заметное влияние изменения интенсивности солнечного коротковолнового излучения в течение солнечного цикла. С этим связаны изменения температуры и распределение нейтральных компонентов верхней атмосферы и ионосферы.

Движения масс воздуха в верхней атмосфере (крупномасштабная циркуляция, крупномасштабные волновые движения, турбулентные процессы перемешивания нейтральных молекул и атомов, ветры, приливные движения) также оказывают влияние на перенос заряженного компонента верхней атмосферы. С динамическими процессами связаны характерные вариации электронной плотности в ионосфере, которые увеличиваются в периоды магнитных бурь. В результате на низких и средних широтах концентрация ионов в максимуме области F изменяется в пределах $3 \cdot 10^5 \pm 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ в зависимости от различных геофизических условий (широты, местного времени, солнечной и магнитной активности и др.).

На высоких широтах картина может быть совершенно иной. Во время полярных сияний интенсивные потоки электронов и ионов с энергиями порядка нескольких кэВ, вторгающихся в полярную ионосферу из плазменного слоя магнитосферы, вызывают значительную и неравномерную ионизацию полярной верхней атмосферы.

Другим важным фактором, определяющим неустойчивость полярной ионосферы, является перенос ионов на большие расстояния поперёк геомагнитного поля, происходящий вследствие дрейфа плазмы в крупномасштабном электрическом поле магнитосферного происхождения.

При взаимодействии магнитосферы с солнечным ветром, ввиду наличия флуктуаций в последнем, в магнитосфере генерируется широкий спектр электромагнитных волн с низкими и супернизкими частотами 10^{-3} – 10 Гц, которые свободно доходят до поверхности Земли.

Достаточно большую роль в геомагнитных возмущениях играет межпланетное магнитное поле, главным образом, его южный компонент, перпендикулярный плоскости эклиптики. А со сменой знака радиального компонента межпланетного магнитного поля связана асимметрия потоков солнечных космических лучей, вторгающихся в полярные области, изменения направления конвекции магнитосферной плазмы и другие явления.

Далее, при изменении направления межпланетного поля из северного полушария в южное увеличение темпа пересоединения его силовых линий и силовых линий земного магнитного поля на дневной магнитопаузе приводит к быстрому накоплению энергии в магнитосфере. В результате увеличивается хвост магнитосферы. Дальнейшее увеличение энергии магнитосферы приводит к развитию магнитосферной суббури, которая приводит к перестройке конфигурации магнитосферы и диссипации накопленной

энергии. В фазе развития суббури в момент взрывного пере-соединения линий межпланетного и земного магнитного полей происходит резкая интенсификация полярных сияний и электроджетов в ионосфере. При этом сначала дуги полярных сияний возникают в районе местной полуночи, а затем быстро распространяются к западу и в сторону экватора. Продолжительность полярных сияний практически близка к продолжительности суббури и может составлять время от десятков минут до 2 часов. Они происходят на геомагнитных широтах 67° – 70° — в так называемых зонах полярных сияний, а также распространяются в направлении запад-восток на расстояние до 5 тыс. км в виде дуг. Ширина зон полярных сияний составляет около 6° . Максимум появления полярных сияний, соответствующий данному моменту геомагнитного местного времени, происходит в овалах полярных сияний, располагающихся асимметрично вокруг северного и южного магнитных полюсов: $\approx 23^{\circ}$ от геомагнитного полюса в ночном секторе и 15° в дневном секторе. Визуальное полярное сияние содержит зелёную ($\lambda = 557,7$ нм) и красную ($\lambda = 630,0/636,4$ нм) эмиссионные линии атомарного кислорода и молекулярные полосы N_2 , возбуждаемые частицами солнечного и магнитосферного происхождения. Эти эмиссии высвечиваются на высотах от 100 км и более. Однако, энергия излучения в инфракрасной и УФ-области спектра превосходит энергию оптического излучения.

Частота появления полярных сияний коррелирует с солнечным циклом, 27-дневным циклом, временем года и магнитной активностью.

На высотах порядка 1–3 радиусов Земли сложные плазменные процессы вызывают ускорение частиц плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля до энергий 1–10 кэВ. Источником энергии для таких процессов являются области с быстрыми движениями и турбулентностью магнитосферной плазмы, генерирующие продольный электрический ток, замыкающийся через проводящую ионосферу в овале полярных сияний. Когда продольный ток становится слишком сильным, в плазме возникают процессы ускорения заряженных частиц вдоль магнитных силовых линий. Ионы из ионосферы при этом ускоряются вверх. Ускорение происходит под действием электрического поля, направленного вдоль магнитного, таким образом, что плазменный слой на высотах в несколько радиусов Земли находится под отрицательным потенциалом относительно ионосферы как в Северном, так и в Южном полушарии (дуги полярных сияний почти симметричны на обоих концах магнитной силовой линии). Пучки заря-

женных частиц, выбрасываемых с этих высот в магнитосферу, образованы протонами и ионами верхней атмосферы O^+ и He^+ . Часть этих ионов захватывается в пояс кольцевого тока и в итоге может попасть в радиационные пояса, откуда могут в итоге через хвост магнитосферы выбрасываться в межпланетное пространство. Ускоренные к Земле электроны переносят из магнитосферы в ионосферу отрицательный заряд, что соответствует продольному току, направленному вверх, с плотностью в несколько $мкА/м^2$. Учтя ширину и длину дуги полярного сияния, можно получить общий ток полярной зоны в несколько $кА$. Рядом с дугой течёт примерно такой же продольный ток, но направленный вниз, что соответствует оттоку тепловых ионосферных электронов вверх, в плазменный слой магнитосферы. Из-за мощной ионизации верхней атмосферы пучком электронов в дуге полярного сияния её проводимость резко возрастает. Плазма в этих слоях ионосферы излучает ввиду этого волны как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне. От возникающих здесь цугов сжатий и разрежений в концентрации электронов ионосферной плазмы на высотах 90–120 км способны отражаться радиоволны метрового диапазона.

Эти процессы развития суббури приводят к генерации километрового радиоизлучения в ОКП общей мощностью до $\approx 10^9$ Вт, что составляет до 1% мощности диссипации энергии при суббуре.

Авроральную активность сопровождает большое число явлений, таких, как авроральные рентгеновские лучи, поглощение космического излучения, мерцания радиозвезд, спорадический слой E , геомагнитные микропульсации и т. д.

Можно сказать, что полярные сияния являются сигналом воздействия космоса через околоземное пространство на биосферу (Александров, 2001). С появлением в ОКП заряженных частиц солнечного и галактического происхождения изменяется содержание и электрический потенциал атмосферы, нагрев ионосферной плазмы возбуждает волны в атмосфере. Из-за дополнительной ионизации в ионосфере появляются значительные электрические токи, магнитные поля которых искажают геомагнитное поле. Эти процессы прямо влияют на погоду и здоровье людей. Через полярные сияния и связанные с ними процессы в ОКП космос воздействует на биосферу Земли.

Кроме того, магнитные вариации генерируют вторичные электрические токи в проводящих слоях литосферы Земли, в солёной воде и в оказавшихся поблизости искусственных проводниках. Наводимая разность потенциалов невелика и составляет пример-

но несколько вольт на километр (максимальное значение было зарегистрировано в 1940 году в Норвегии и составило около 50 В/км), но в протяжённых проводниках с низким сопротивлением — линиях связи и электропередач, трубопроводах, рельсах железных дорог — полная сила индуцированных токов может достигать десятков и сотен ампер. Наименее защищены от подобного влияния воздушные низковольтные линии связи. Значительные помехи, возникавшие во время магнитных бурь, были отмечены уже на самых первых телеграфных линиях, построенных в Европе в первой половине XIX века. Получившие распространение в настоящее время волоконно-оптические линии связи к такому влиянию нечувствительны. Заметное воздействие геомагнитная активность доставляет железнодорожной автоматике, особенно в приполярных районах. В трубах нефтепроводов, тянущихся на многие тысячи километров, индуцированные токи могут значительно ускорять процесс коррозии металла. В линиях электропередач, работающих на переменном токе частотой 50–60 Гц, индуцированные токи, изменяющиеся с частотой менее 1 Гц, практически вносят только небольшую постоянную добавку к основному сигналу и должны были бы слабо влиять на суммарную мощность. Однако после аварии, произошедшей во время сильнейшей магнитной бури 1989 года в канадской энергетической сети и оставившей на несколько часов половину Канады без электричества, такую точку зрения пришлось пересмотреть. Причиной аварии оказались трансформаторы. Тщательные исследования показали, что даже небольшая добавка постоянного тока может вывести из строя трансформатор, предназначенный для преобразования переменного тока, в котором постоянная составляющая тока вводит его в неоптимальный режим работы с избыточным магнитным насыщением сердечника. Это приводит к избыточному поглощению энергии, перегреву обмоток и в конце концов к аварии всей системы. Последовавший анализ работоспособности всех энергетических установок Северной Америки выявил и статистическую зависимость между количеством сбоев в зонах повышенного риска и уровнем геомагнитной активности (рис. 3.2 — *Петрукович, Зелёный, 2001б*).

В общем, взаимодействие экосистем с ОКП в настоящее время надёжно установлено. Здесь и связь между величинами и ходом солнечной и геомагнитной возмущённости, ходом целого ряда процессов в атмосфере, океанах, литосфере. Это носит периодический характер, связанный, главным образом с различными периодами солнечной активности, основным 22-летним (включающим два 11-летних цикла), 27-дневным и т. д. Скач-

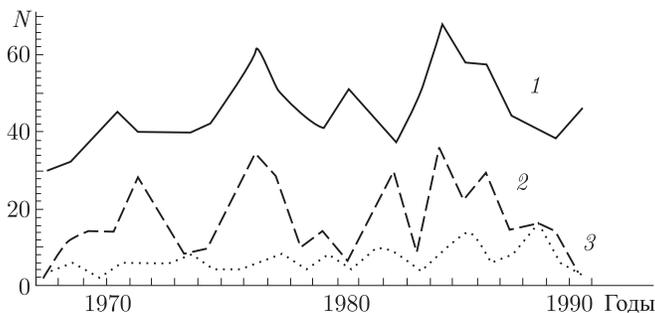


Рис. 3.2. Число аварий в энергосетях США в районах повышенного риска (близких к авроральной зоне) возрастает вслед за уровнем геомагнитной активности. В годы минимума активности вероятности аварий в опасных и безопасных районах практически уравниваются. 1 — уровень геомагнитной активности; 2 — число аварий в геомагнитно-опасных районах; 3 — число аварий в безопасных районах

кообразные изменения в природной среде связаны с триггерным механизмом взаимодействия (Серафимов, 1991; Сюняев, 1986), применимым к системам, находящимся в состоянии неустойчивости, близкому к критическому (например, магнитосфера). Здесь небольшое изменение критического параметра приводит к изменению энергетического состояния всей системы, что ведёт к возникновению новых явлений. Например, явление образования внетропических циклонов при геомагнитных возмущениях. В этом случае энергия геомагнитного возмущения, полученная из ОКП, преобразуется в тепловую, которая разогревает тропосферу. В результате в последней развивается вертикальная неустойчивость с энергией, более высокой, чем энергия первоначального возмущения, приводящая к развитию атмосферных неустойчивостей.

Следует отметить, что идея о влиянии солнечной активности на состояние погоды многими геофизиками отвергается. В данном случае мощность атмосферных процессов на несколько порядков превышает поток энергии, попадающий в ОКП с солнечным ветром. В связи с этим представляется крайне маловероятным, чтобы солнечная активность могла существенно влиять на состояние нижней атмосферы (Пудовкин, 1996). Здесь, видимо, можно говорить о вторичных механизмах такого влияния.

Во-первых, в ОКП и далее в атмосферу попадают наиболее энергичные протоны, генерируемые во время солнечных вспышек. В то же время связанные со вспышками магнитные поля экранируют ОКП от галактических космических лучей (Форбуш-

эффект). Наложение этих процессов создаёт сложную и неоднозначную вариацию интенсивности потоков частиц, попадающих в атмосферу Земли.

Далее, усиление или ослабление потока вторгающихся в атмосферу частиц в результате ещё не до конца выясненных физико-химических процессов вызывает уменьшение (увеличение) прозрачности атмосферы и тем самым модулирует поступление солнечной энергии в нижнюю атмосферу.

Изменение потока поступающей солнечной энергии вызывает изменение температуры воздуха и высот изобарических поверхностей в атмосфере, обуславливая тем самым заметные изменения крупномасштабной циркуляции последней.

Таким образом, оказывается, что энергия, необходимая для создания атмосферного оптического экрана, на несколько порядков меньше амплитуды вызываемых этим экраном вариаций потока солнечной энергии, поступающей из ОКП в нижнюю атмосферу (Пудовкин, 1996; Hauglustaine, 1990).

Поскольку гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространённых физико-химических процессов (в частности, протекающих в водных растворах), они должны воздействовать на многие стороны биологических явлений, что находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов (Горшков, 1995).

Для спорадических возмущений солнечного происхождения (вспышек, внезапных магнитных бурь и т. д.) дело обстоит так, как будто в среде обитания появляется какой-то сигнал, на который реагирует организм. Свойства этого сигнала таковы, что он сопутствует и вспышкам, и магнитным бурям, возрастает с возрастанием географической широты, имеет сезонную зависимость (Владимирский, Кисловский, 1982).

Вместе с тем, природа физического механизма воздействия солнечной активности на биосферу до сих пор не раскрыта. Используя опыт космических исследований, можно совершить прорыв в понимании физического механизма воздействия солнечной активности (трансформированной в ОКП) на земные явления и процессы (Иванов-Холодный, 2000).

В биосфере Земли последствия взаимодействия связаны с динамикой популяций животных, эпидемий, эпизоотий, количеством сердечно-сосудистых заболеваний.

Наиболее вероятной причиной такой связи являются, как полагают, низкочастотные колебания электромагнитного поля Земли, перепады напряжённости которого от спокойного к воз-

мущённому весьма велики. К тому же, в этой области частот находится и «окно прозрачности» ионосферы. В этом диапазоне регистрируются короткопериодические колебания магнитного поля Земли — микропульсации. Они подразделяются на два класса: почти синусоидальные P_c и широкополосные P_i . Их важным свойством является зависимость амплитуды от широты: с увеличением широты и приближением к зоне максимальной повторяемости полярных сияний амплитуда колебаний растёт (причём, обратно пропорционально частоте колебаний). Кроме того, макропульсации обладают высокой проникающей способностью, а микропульсации P_i возникают не только во время магнитных бурь, но и в период развития солнечных вспышек одновременно с внезапным атмосферным возмущением.

Со стороны более высоких, чем частоты микропульсаций частот, ионосфера непрозрачна. Уровень напряжённости геомагнитного поля здесь определяется на средних широтах атмосфериками, на высоких — УНЧ-излучением магнитосферы, которое частично приходит из ионосферы. Существование постоянного фона атмосфериков связано с распространяющимся на большие расстояния излучением разрядов молний (максимум частот около 10 кГц). Эффекты сверхдальнего распространения радиоволн на этих частотах обусловлены наличием своеобразного волновода, образованного двумя проводящими поверхностями — ионосферой и поверхностью Земли. Благодаря ему же излучение электрических разрядов от центров грозовой активности в экваториальной зоне может фиксироваться в любой точке земной поверхности на средних широтах.

Со стороны более низких частот к полосе микропульсаций примыкают области периодических и циклических вариаций геомагнитного поля, связанные частично с собственными колебаниями Земли, а также частично с собственными колебаниями Солнца с периодом 2 часа 40 мин.

Таким образом, можно представить несколько схем воздействия солнечной активности на биосферу через компоненты околоземного пространства (*Владимирский, Кисловский, 1982*) (рис. 3.3–3.6).

Здесь видно, что солнечная активность может оказывать влияние на биосферу не только через возмущения природного геомагнитного поля, но и посредством других физических агентов. Несомненно, определённое значение имеют вариации приземного ультрафиолетового излучения около 290 нм, происходящие вследствие динамических изменений в озоновом слое. Имеются основания предполагать, что солнечная активность оказывает

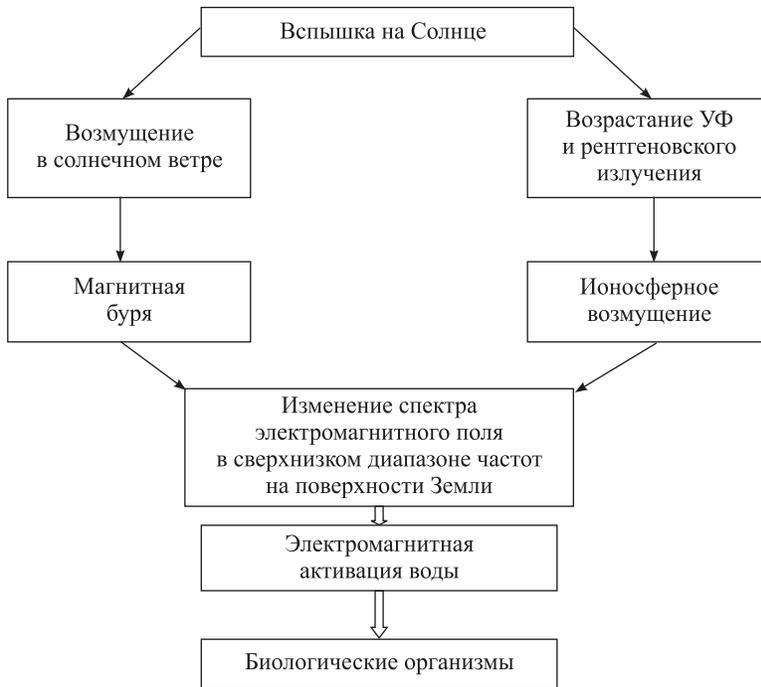


Рис. 3.3. Воздействие солнечной активности на биосферу через сверхнизкочастотные колебания электромагнитного поля

достаточно сильное влияние на биологические организмы и через воздействие на изменения фона инфразвуковых акустических шумов, а также низкочастотных колебаний электрического поля Земли.

Вместе с тем, взаимодействие околоземной среды с солнечным излучением различных видов, другими факторами естественного происхождения происходит в течение всей эволюции Земли. Геофизика не имеет данных о том, что когда-либо ОКП под действием естественных причин полностью изменяло свои свойства и переходило в состояние с совершенно новыми параметрами, резко изменяя своё воздействие на биосферу.

Таким образом, основными причинами, которые могут необратимо вывести ОКП из состояния динамического равновесия, могут стать техногенные воздействия. При этом следует иметь в виду, что их уровень постоянно нарастает и прямо зависит от экспоненциального роста потребления энергии человечеством.



Рис. 3.4. Воздействие солнечной активности на биосферу при деградации озонового слоя и увеличении интенсивности ультрафиолетовой радиации

б) Техногенное воздействие на околоземное космическое пространство. Весьма серьёзным фактором заражения ОКП являлись не так давно испытания ядерного оружия. С 1945 по 1961 гг. в атмосфере взорвано более 400 ядерных зарядов общей мощностью до 550 Мт. Этим самым в атмосферу поднято 12 т радиоактивных продуктов, что вызвало сильнейшие геомагнитные возмущения и привело к почти необратимым изменениям в ионосфере, резко повысило её радиоактивность (Дмитриев, 1995). Реальность воздействия таких испытаний на состояние озонового слоя была подтверждена наблюдениями содержания озона в начале 60-х гг. XX в., когда ядерные взрывы проводились регулярно.

В то время в результате взрывов ядерных устройств в космосе возник квазистационарный пояс из электронов малых энергий, просуществовавший более 10 лет. Эффекты уменьшения содер-

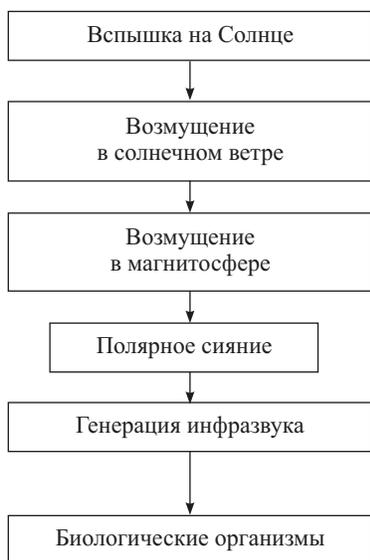


Рис. 3.5. Воздействие солнечной активности на биосферу при генерации инфразвука в полярных сияниях

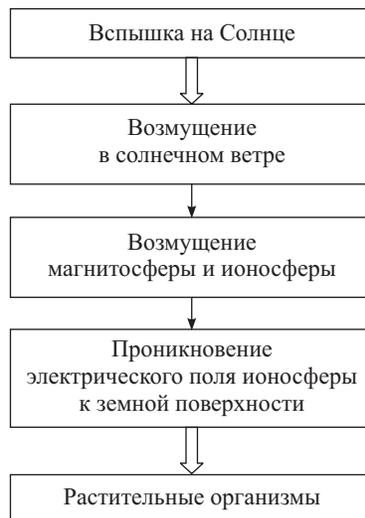


Рис. 3.6. Влияние солнечной активности на растительные организмы при проникновении к поверхности электрического поля

жания озона в верхней атмосфере после взрывов отмечались в течение нескольких лет.

Техногенное электромагнитное излучение является одним из видов глобального воздействия на ОКП, загрязняющим атмосферу и определяющим «космическую погоду» (Климов и др., 2000; Дмитриев, 1995). Основное воздействие на ОКП связано с потреблением человечеством электроэнергии: работой ЛЭП, крупных предприятий с большим энергопотреблением, радио- и телесвязи. Например, гармонические волны от ЛЭП могут создавать на определённых силовых линиях магнитного поля Земли «сток» низкоэнергетичных частиц. Он образует заметную асимметрию в распределении электронов с энергией 2,5 кэВ в интервале долгот 50–110° з.д. над крупными промышленными объектами с развитыми энергетическими сетями (Климов и др., 2000). Электромагнитное излучение проводов ЛЭП, генерируемое стекающими частицами, варьируется в зависимости от дней недели и времени суток. Так называемый эффект уикенда (более равномерное распределение токов на Земле в конце недели и резкое возрастание их в понедельник в районах ЛЭП и крупных промышленных центров) наблюдается в виде вариаций техно-

генного электромагнитного поля даже в районе геостационарной орбиты. Излучение высоковольтных ЛЭП приводит к изменениям в ионосфере: в атмосферу проникают энергичные электроны из радиационных поясов, создавая новые зоны ионизации.

Естественное излучение в окрестностях Земли складывается из ряда компонентов: радиоизлучения атмосферных электрических помех, теплового радиоизлучения Земли, космического радиоизлучения, радиоизлучения Солнца и планет. В XX в. мощность техногенного радиоизлучения Земли значительно превзошла её естественное радиоизлучение и стало самым заметным в Солнечной системе в полосе частот, больших 30 МГц (излучения на более низких частотах эффективно экранируются ионосферой). Только в США работают более 20 млн передатчиков (Дмитриев, 1995). Нагрев ионосферы в поле мощной волны в коротковолновом диапазоне вызывает тепловую параметрическую неустойчивость, что приводит к аномально большому поглощению радиоизлучения и расслоению ионосферной плазмы. В области резонанса частот радиоволн и гиромангнитных частот электронов плазмы образуются вытянутые вдоль геомагнитных силовых линий неоднородности ионосферы с характерными размерами порядка $1 \times 0,5 \div 0,1$ км (Прохоров, 1983). В частности, в последнее время выявлена взаимосвязь появления сполохов полярных сияний с моментами включений мощного коротковолнового радиопередатчика (*www.phys.web.ru*, 18.01.2002). В поле очень мощных радиоволн разогрев настолько велик, что происходит электрический пробой газа. Наиболее распространённые передатчики в диапазоне частот 4 кГц \div 2 МГц значительно нагревают ионосферу и изменяют параметры плазмы. Миллисекундные импульсы передатчика мощностью 2 МВт возбуждают плазменные волны, стимулируют эмиссии частиц и вызывают электромагнитные волны низкой частоты (Климов и др., 2000), способные отрицательно воздействовать на живые организмы. Таким образом осуществляется обратная связь между антропогенным воздействием на ОКП и его воздействием на биосферу.

Перераспределение энергии, поступающей в ОКП в результате техногенных воздействий, осуществляется, как и при естественных, либо плавно, с постепенным изменением параметров физических процессов, либо — чаще всего — скачкообразно с использованием триггерного механизма.

в) Проблема техногенного воздействия на озоновый слой.

Состояние атмосферного озонового слоя, как оказалось, также в достаточной степени зависит от процессов, протекающих

в околосреднем пространстве и техногенного воздействия на них. Проблема его нарушения явилась одной из первых проблем, связанных с техногенным загрязнением ОКП.

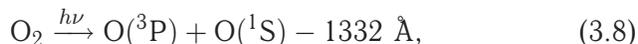
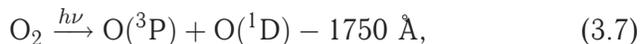
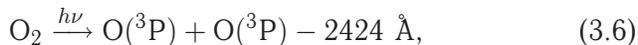
Это имеет особую важность ввиду того, что процессы в озоновом слое, оказывающие сильнейшее воздействие на биосферу, происходят на границе ОКП и зоны биологической среды.

Уменьшение толщи озона на 1% приводит к повышению интенсивности УФ-излучения у поверхности Земли в средних широтах в среднем на 2%. Полное же изменение толщи озона за 11-летний солнечный цикл составляет 8%. Проблема стратосферного озона состоит из ряда взаимосвязанных проблем: 1) глобальной убыли озона — с конца 60-х гг. Земля потеряла от 3–4% до 12–14% озона — и процесс этот нарастает; 2) образования озоновых дыр (в 2000 г. озоновая дыра над Антарктидой достигла рекордных размеров в $28,3 \cdot 10^6$ км² — *Rambler-Science*, 2001), 3) кратковременных снижений на десятки процентов общего содержания озона. Наиболее часто снижение концентрации озона отмечалось над Исландией, Гавайскими островами и Красным морем, где наблюдается современный вулканизм и выделяются большие объёмы восстановленных газов.

Пример распределения озона над земной поверхностью показан на рис. 3.7.

Процесс формирования озонового слоя (его максимальная концентрация приходится на высоты 25–30 км) происходит при совокупном воздействии солнечного излучения, динамических и химических процессов в атмосфере. Образование самого озона идёт при фотолизе кислорода ультрафиолетом.

Фотохимическая реакция, приводящая к образованию озона, состоит из серии событий, начиная от поглощения света молекулой кислорода и кончая образованием стабильных молекул. Энергия связи молекулы кислорода составляет 5,115 эВ. При поглощении такого кванта молекула кислорода диссоциирует на два нормальных атома. При большей энергии кванта продуктами распада будут возбуждённые атомы кислорода. Пороговые длины волн поглощаемого излучения, при которых происходит фотодиссоциация молекулярного кислорода, следующие:



Здесь состояние $O(^3P)$ является нормальным, а состояния $O(^1D)$ и $O(^1S)$ — возбуждёнными. Таким образом, помимо атомов кислорода при его облучении возникают его возбуждённые молекулы. Все эти активные частицы вступают во вторичные реакции с образованием конечного продукта — озона.

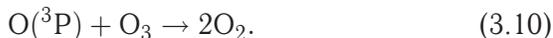
Последующее разложение озона образует полосы поглощения излучения в различных диапазонах спектра. Наиболее важные (полосы Хартли) лежат в области 200–300 нм. Здесь коэффициент поглощения озоном солнечного излучения составляет в максимуме $k = 135 \text{ см}^{-1}$, что даёт величину общего поглощения 10^{40} . К полосам Хартли примыкают полосы Хаггинса (320 нм) и Шалона-Лефевра (340 нм) с коэффициентами поглощения на несколько порядков меньше. В видимом участке спектра расположена широкая полоса Шаппюи (500–700 нм), с которой связана синяя окраска озона. Очень сильное поглощение озона наблюдается в области вакуумного ультрафиолета (100–200 нм), что вместе с полосами Хартли приводит к обрыву солнечного спектра у поверхности Земли при длинах волн, меньших 290 нм, что и является защитой органического вещества от жёсткого излучения.

Полосы, соответствующие колебательно-вращательным переходам в молекуле озона, расположены в инфракрасной области спектра (3–15 мкм). Чисто вращательные спектры озона наблюдаются в микроволновой области спектра (1–10 см).

Поскольку озон образуется при воздействии на него электромагнитного излучения, диссоциация его также является продуктом воздействия излучения. Например, первичный процесс фотодиссоциации молекулы озона в полосе Шаппюи происходит как

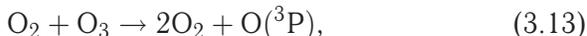
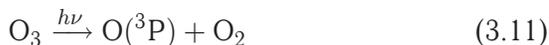


За ним следует вторичный процесс взаимодействия атомарного кислорода с другой молекулой озона



То есть в данном случае в результате поглощения одного кванта света разрушаются две молекулы озона: квантовый выход реакции разложения в полосах Шаппюи равен 2.

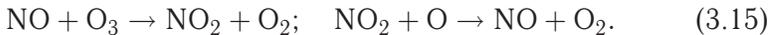
В полосах Хиггинса он равен 4:





Квантовый выход фотодиссоциации озона при возбуждении в полосах Хартли может быть равен шести.

При усилении солнечной активности происходит увеличение концентрации озона в стратосфере. Было показано (*Ортенберг, Трифонов, 1990*), что наиболее эффективным веществом, являющимся катализатором реакций типа (2.9)–(2.14) является оксид азота



В природе основным источником оксида азота NO является оксид диазота N₂O, образующийся в бактериальных процессах на земной поверхности и проникающий в стратосферу.

Реакции, подобные (3.15), можно записать для хлора, фтора и некоторых других веществ. Однако, по сравнению с потоком фторхлорметанов все остальные техногенные источники дают относительно малый вклад. Именно хлорфторметаны — фреоны, имеющие химические формулы типа CFCl₃, CHFCl₂, C₃H₂F₄Cl₂ и др., являются, как считает наибольшее число исследователей, наиболее ощутимыми катализаторами реакций разрушения озонового слоя Земли.

Некоторые авторы считают, что увеличение потока солнечных космических лучей приводит к образованию окиси азота, которая, взаимодействуя с озоном, резко снижает его концентрацию.

К образованию большого количества оксида диазота может привести резкое увеличение потока космических лучей больших энергий в ОКП как вследствие солнечной вспышки, так и вспышки близкой сверхновой звезды.

Изучение влияния солнечных протонов на состояние озонового слоя, проводившееся НАСА в июле 2000 г., показало, что протоны расщепляют молекулы азота, превращая их в оксид. Последнее может разрушить до 9% озонового слоя. Кроме того, протоны расщепляют ещё молекулы водяного пара, а появившийся гидроксил уничтожает до 70% озона в мезосфере на высотах 50–90 км (*www.nature.ru, 2003*).

С другой стороны, попадание космических тел естественной или техногенной природы из ОКП в стратосферу способствует резкому повышению образования оксида азота. Так, при падении Тунгусского метеорита в 1908 г. на высотах 30–100 км образовалось около 30 · 10⁹ кг оксида азота, что резко уменьшило прозрачность атмосферы в УФ-области спектра в последующие

3 года (Ортенберг, Трифонов, 1990). С другой стороны, такое количество оксида азота — отличного удобрения, — стимулировало рост леса в районе падения Тунгусского тела (Боярчук, 1999).

Мощнейшим катализатором диссоциации озона являются высотные ядерные взрывы, воздействие ионизации и загрязнения верхней атмосферы при запусках искусственных космических объектов.

На уменьшение общего содержания озона влияют атмосферные динамические процессы, тесно связанные с процессами в ОКП и с солнечной активностью.

Таким образом, процессы в околоземном пространстве приводят непосредственно и к образованию, и к разрушению озонового слоя.

В связи с общепринятым мнением о воздействии фторхлоруглеродов на озоновый слой в 1985 г. была принята Венская конвенция по защите озонового слоя, а 1.01.1989 г. был составлен Международный (Монреальский) протокол о запрещении производства фреонов. В России последнее постановление Правительства № 1368 о ввозе и вывозе из страны озonoобразующих веществ подписано 10.12.1999 г.

Однако, в последнее время появился ряд достаточно серьёзных возражений общепринятому мнению, обосновывающих модели естественного разрушения озонового слоя.

Рядом авторов (Перов С.П., 2001) были рассмотрены некоторые важные вопросы, относящиеся к глобальной проблеме эволюции озонового слоя, подчёркнуто отсутствие системного подхода к этой проблеме и представлены результаты, позволяющие по новому рассмотреть причины изменчивости концентрации озона и последствий этой изменчивости для биосферы и человека.

Систематизация данных по потокам природных газов, корреляция положения центров дегазации Земли с наиболее устойчивыми озоновыми аномалиями позволил сделать ряд выводов (Веймарн и др., 1998; Сывороткин, 1998).

1. Озоновый слой подвержен разрушению флюидными потоками, восходящими из расплавленного земного ядра (рис. 3.8);

2. Распределение локальных минимумов озонового слоя контролируется мировой рифтовой системой, дегазационная активность которой возрастает в южном направлении, достигая максимума над Антарктидой. Центры озоновых аномалий совпадают также с поясами развития кимберлитового алмазоносного магнетизма;

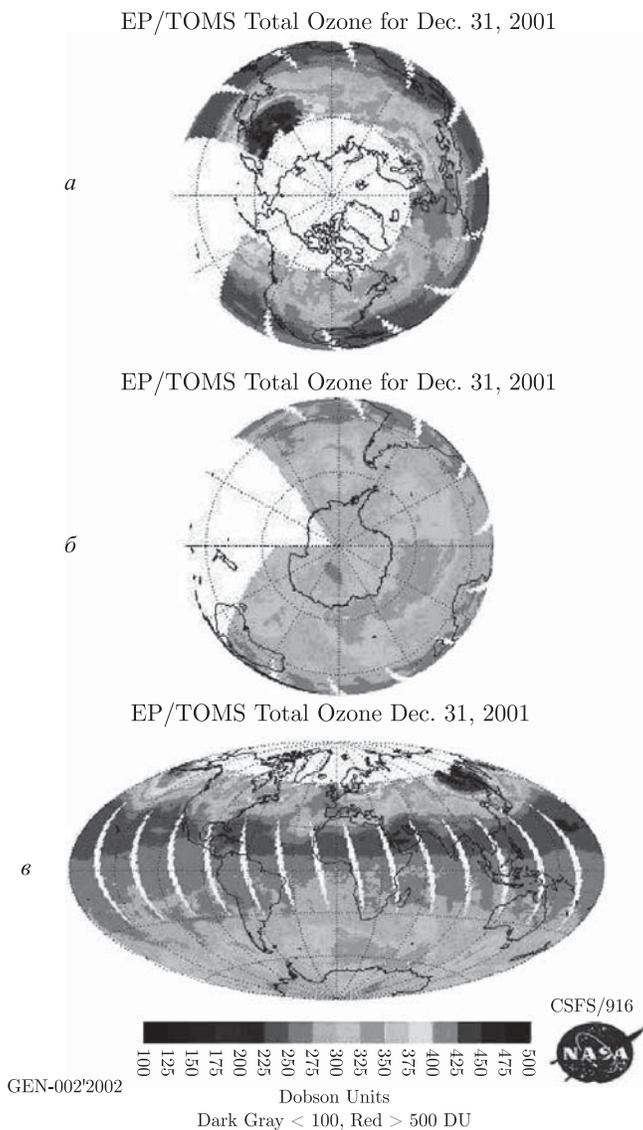


Рис. 3.7. Картина распределения озона над земной поверхностью по данным службы «Earth Probe TOMS». *a*) вид с Северного полюса; *б*) вид с Южного полюса; *в*) общий вид

3. Изучение осадочной оболочки Земли приводит к выводу о периодичности разрушения озонового слоя в прошлом в связи с импульсами усиления водородной дегазации ядра планеты.

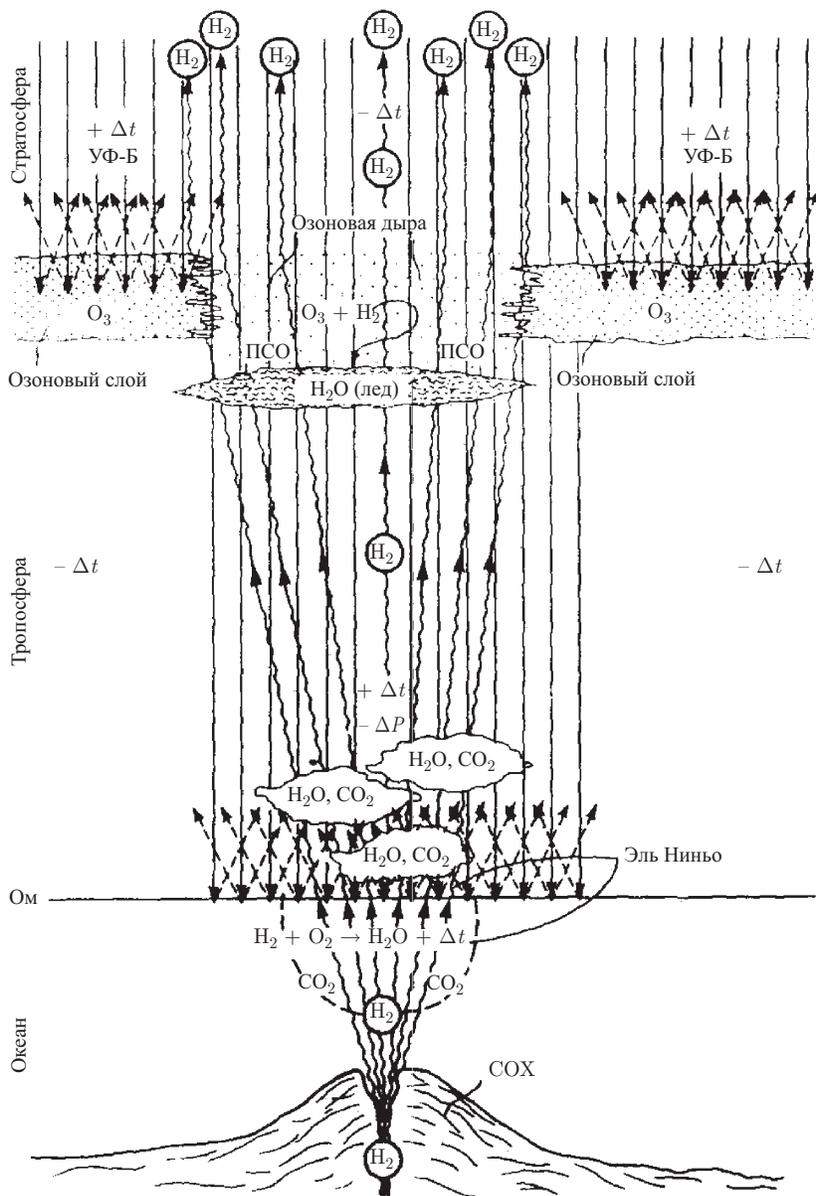


Рис. 3.8. Модель воздействия глубинных потоков водорода на океан и атмосферу: потоки водорода вырываются из рифта на своде срединно-океанского хребта, окисляются на поверхности и нагревают воду. В стратосфере водород взаимодействует с озоном — образуется озоновая дыра. Тропосфера разогревается, вследствие этого над зонами дегазации образуются циклоны. Стратосфера над озоновой дырой охлаждается

В последнее время высказывается мнение, что от жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца земную биосферу защищает кислород атмосферы, а озон является всего лишь побочным продуктом процесса ионизации кислорода УФ-излучением (Чугунов, 2000). С этих позиций вполне уверенно объясняется появление озоновых дыр над Антарктидой и Арктикой, где отсутствуют промышленное производство (и, соответственно, нет фреонов). Сезонность появления озоновых дыр в этих широтах не соответствует положению Земли на орбите относительно Солнца, то есть они образуются именно в те периоды (летом и осенью над Антарктидой, зимой и весной над Арктикой), когда сюда практически не попадает жёсткое излучение.

Далее, в ряде работ (Онищенко, 2001; Lu, Sanche, 2001) было показано, что механизм формирования озоновых дыр связан с воздействием на атмосферные процессы космических лучей.

Интенсивность космических лучей изменяется в зависимости от широты (над полюсами она на несколько десятков процентов больше, чем на экваторе), что связано с влиянием магнитного поля Земли на заряженные частицы. Также известно, что интенсивность космических лучей изменяется в пределах 11-летнего цикла солнечной активности, причём интенсивность космических лучей изменяется в противофазе с солнечной активностью. Анализ данных многолетних измерений интенсивности космических лучей и содержания озона в стратосфере (в зависимости от географической широты, высоты, времени года) показал, что существует явно выраженная корреляция между образованием областей с пониженным содержанием озона и интенсивностью космических лучей. При попадании в атмосферу высокоэнергетичные частицы испытывают столкновения с ядрами атомов азота и кислорода. Одним из результатов многоступенчатых процессов распада образующихся при этих взаимодействиях частиц является появление большого числа низкоэнергетичных электронов. Взаимодействие электронов с фреонами ведёт к диссоциации молекул фреонов, например, по следующей схеме $e^- + \text{CF}_2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl}^- + \text{CF}_2\text{Cl}$, причём, сечение этого процесса на 3–4 порядка больше, чем для фотохимической диссоциации. Показано, что при низких температурах (менее 200 К) такие процессы должны достаточно интенсивно протекать для молекул фреонов, адсорбированных на поверхность частичек льда. Именно такие условия существуют в огромных приполярных массивах стратосферных (существующих на высоте 15–20 км) облаков в зимний период (заметим, что недавно было показано, что увеличение интенсивности космических лучей приводит к увеличению пло-

щади поверхности Земли, закрытой облаками). Предполагаемая последовательность процессов, ведущих к обеднению озонового слоя, изображена на рис. 3.9. Космические лучи создают в частичках льда, содержащихся в плотных приполярных облаках

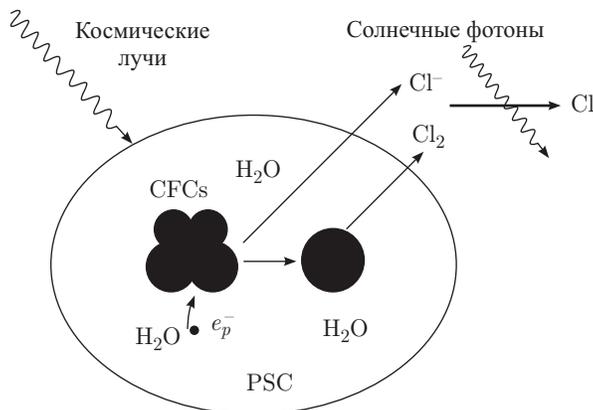


Рис. 3.9. Последовательность процессов, приводящих к образованию озоновой дыры в результате воздействия космических лучей

(PSC), электроны, которые взаимодействуют с молекулами фреонов (CFCs), приводя к их диссоциации. В результате создаётся значительная концентрация ионов (и молекул) хлора. Действие солнечного света приводит к их превращению в атомы хлора, которые взаимодействуют с молекулами озона, разрушая их. Как показывают данные наблюдений, минимальная концентрация озона действительно наблюдается в приполярных областях в начале весны, когда заканчивается полярная ночь (*Lu, Sanche, 2001*).

Таким образом, из всего сказанного можно сделать вывод, что данная проблема оказалась значительно более сложной, чем представлялось в середине 80-х гг. XX столетия, и в начале третьего тысячелетия выглядит достаточно неоднозначной.

3.2. Естественные тела в околоземном пространстве

Одним из компонентов ОКП являются астрономические тела естественного происхождения, образованные при распаде астероидов, метеороидов, комет, а также сами эти объекты.

Отношение потока искусственных объектов к потоку естественных объектов в околоземном пространстве зависит от размеров объектов. Равенство потоков приходится на размеры объ-

ектов, близких к 1 мм. Для меньших размеров преобладает поток естественных, для больших — искусственных объектов, причём для размера 1 см это отношение составляет величину ≈ 40 , для размера 10 см — $\approx 10^5$ (Назаренко, Чернявский, 1995; Рыхлова, 1995).

По имеющимся в литературе данным потоки частиц, представляющих наибольшую опасность для КА ($d = 0,05 \div 2$ см), находятся в диапазоне $10 \div 10^{-7} \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Постоянная составляющая природного космического мусора в ОКП располагается достаточно неравномерно (глава I). Количество такого мусора изменяется с течением времени в результате торможения и выпадения в атмосферу, а также в результате воздействия солнечного ветра, как изменяющего плотность атмосферы, так и прямо вымывающего мелкие частицы.

Попадающие в ОКП астероиды, кометы и, главным образом, метеорные потоки большой интенсивности могут резко изменить как его свойства, так и в значительной степени представить угрозу для самой нашей планеты и её биосферы. Так, при попадании Земли в среднюю часть метеорного потока Леониды, имеющего ширину порядка 90 тыс. км (Барабанов и др., 2001), количество метеорных тел в ОКП резко, хотя и ненадолго, увеличивается. Это значительно повышает риск столкновений метеорных тел с искусственными космическими объектами (что ведёт к их разрушению и образованию техногенного мусора в ОКП), а также увеличивает вероятность их прямого воздействия на Землю.

а) Потоки метеорного вещества в ОКП. Данные о потоке частиц космического мусора в области первого максимума засорённости (на орбитах высотой 400–600 км), полученные (Бургасов, Надирадзе, 2002) по анализу следов их столкновений с панелями СБ, представлены на рис. 3.10. Естественно, здесь присутствует как поток техногенных, так и естественных частиц, и его суммарная величина выше среднего по ОКП в отсутствие метеорных потоков.

Количество и воздействие метеорного потока на ОКП, атмосферу и, в конечном итоге, на Землю определяется его шириной, скоростью метеоров относительно Земли и числом крупных объектов в потоке.

Таблица 3.3 даёт представление о скорости и пространственной плотности частиц в основных метеорных потоках, пересекающих земную орбиту в течение года, а также в спорадических потоках, появление которых непредсказуемо.

Таблица 3.3. Средняя пространственная плотность основных метеорных потоков в районе земной орбиты

Поток	Период активности	Визуальное часовое число в максимуме	Скорость относительно Земли, км/с	Средняя плотность, км ⁻³
Квадрантиды	1–4 января	50	41	$44 \cdot 10^{-9}$
Лириды	19–24 апреля	5	48	$8 \cdot 10^{-9}$
η -Аквариды	1–8 мая	20	66	$7 \cdot 10^{-9}$
Персеиды	15 июля–25 авг.	60	60	$15 \cdot 10^{-9}$
Тауриды	15 сент.–1 дек.	(5)	30	$28 \cdot 10^{-9}$
Дракониды 1933 1946	8–10 октября	$5 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^4$	50	$1,8 \cdot 10^{-4}$ $3,6 \cdot 10^{-4}$
Ориониды	18–26 октября	20	66	$1 \cdot 10^{-9}$
Леониды Леониды, 1866	14–20 ноября	(5)	72	$1 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-7}$
Геминиды	7–15 декабря	(5)	72	$132 \cdot 10^{-9}$
Спорадические потоки			11,2–72	$1,1 \cdot 10^{-6}$ – $1,2 \cdot 10^{-5}$

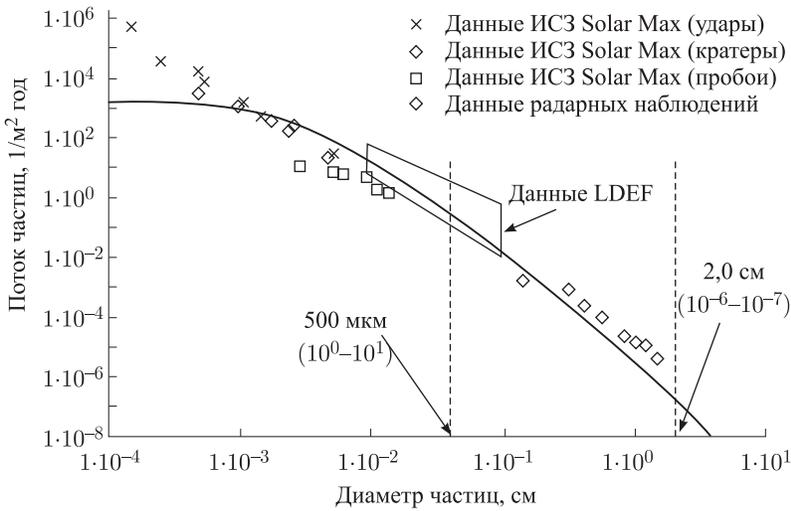


Рис. 3.10. Поток частиц космического мусора в ОКП в функции их размеров

Автором в 2002 г. были проведены наблюдения яркой составляющей Персеид для определения пространственной плотности опасных частиц естественного мусора (Муртазов, 2003)

Как известно, соотношение между массой метеоров определённой яркости и скоростью их встречи с Землёй выражается как (Бабаджанов, 1987)

$$M_0 = 2,5 \cdot 10^5 v^{-4} \quad \text{для } m < 0. \quad (3.16)$$

Здесь M_0 — масса метеорной частицы, порождающей при вертикальном движении со скоростью v метеор нулевой звёздной величины.

Для потока Персеид, имеющего относительно Земли скорость $v = 60$ км/с, масса метеороида, порождающего метеор нулевой звёздной величины, составляет $M_0 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ г (соответственно, радиус около 1 мм). Эти величины по порядку совпадают с данными различных авторов (Бабаджанов, 1987; Барабанов и др., 2001).

Таким образом, метеоры с видимой звёздной величиной, меньшей 0, имеют диаметры от 1 мм и выше, что позволяет причислить их к естественному космическому мусору достаточно заметных размеров, представляющему как реальную опасность для КА, так и имеющему достаточную массу для заметной ионизации верхней атмосферы.

В связи с этим в наблюдениях, проведённых 11/12.08.2002 г. и 12/13.08.2002 г., фиксировались только метеоры ярче нулевой величины. На рис. 3.11 приведены результаты этих наблюдений,

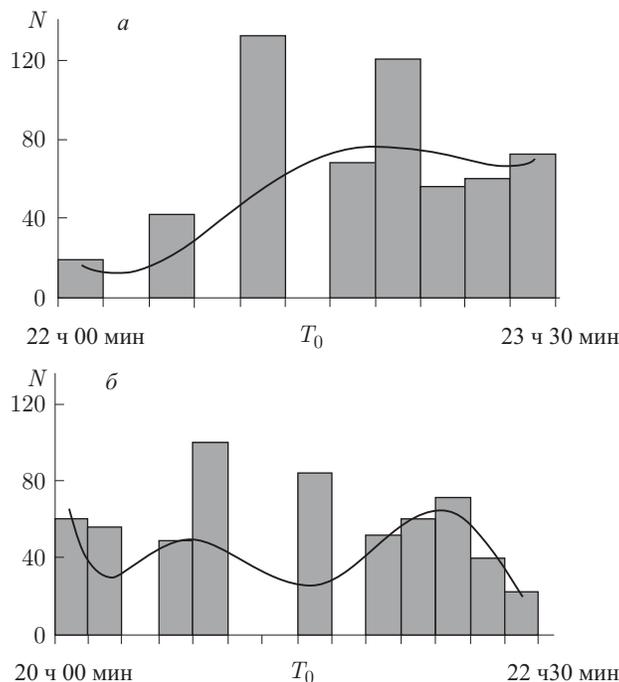


Рис. 3.11. Результаты наблюдений яркой составляющей потока Персеид в 2002 г. (а — 11/12 августа, б — 12/13 августа 2002 г.)

обработанные в соответствии с основными положениями метеорной астрономии (Зоткин, 1981; Бабаджанов, 1987).

Местами часовые числа ярких метеоров в потоке достигали $N = 140$, заметно превышая средние показатели для Персеид. Вместе с тем, повышение активности носило достаточно кратковременный характер (1,5 часа в первую ночь и 2,4 часа во вторую ночь), и средние часовые числа за эти ночи (45 и 46) соответствовали обычной активности Персеид.

Из результатов наблюдений видно также, что частицы в рое распределены неравномерно, то есть рой состоит из большого числа мелких потоков, имеющих разную плотность

Полученные данные позволили определить плотность потока и пространственную плотность яркой составляющей Персеид в период максимума потока.

Учитывая условия проведения наблюдений, результаты расчётов дают: плотность потока $\Phi = 8 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, пространственная плотность $D = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ км}^{-3}$ для $N = 60$ и $\Phi = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $D = 3 \cdot 10^{-8} \text{ км}^{-3}$ для $N = 140$.

Таким образом, если в первом случае плотность потока и пространственная плотность близки к средней для этого роя (табл. 3.3), то второй случай показывает заметное увеличение его активности именно для случая метеороидов, размерами большими 1 мм.

Если объём околоземного космического пространства составляет величину порядка 10^{15} км^3 , то общее число метеорных частиц размерами более 1 мм в нём в период максимума 2002 г. $\approx 8 \cdot 10^7$, то есть почти на два порядка превосходило средние показатели. Эти данные показывают, что в 2002 г. имелась предсказанная (Клыков, Шанов, 2002) вспышка активности Персеид, предшествующая классическому максимуму потока 12/13.08.

Полученные значения плотности потока дают возможность рассчитать количество соударений метеоров роя с объектами в околоземном пространстве. Так, для $N = 60$ число соударений с нормально расположенным к потоку экраном площадью 10^4 м^2 составит $n = 25$ в год, для $N = 140$, соответственно, $n = 56$ соударений в год.

Кроме этого, метеорный поток стимулирует появление в ионосфере квазипериодического заряженного слоя. Для случая, представленного здесь, его параметры можно оценить следующим образом. Удельная мощность потока колеблется в пределах $10^{-5} - 10^{-7} \text{ Вт/м}^2$. Усреднённый период пульсаций 0,02–0,05 Гц. Можно отметить в связи с этим, что проблема воздействия на биологические организмы инфразвуковых излучений сверхмалой мощности приобретает в последнее время некоторую актуальность.

б) Космическая опасность. Проблема взаимодействия крупных космических тел естественного происхождения при сверхорбитальных скоростях входа в околоземное пространство и в дальнейшем в атмосферу Земли и последствия такого явления представляют фундаментальную комплексную проблему естествознания, непосредственно связанную с взаимодействием ОКП и биосферы и имеющую выход в практическую деятельность человечества.

Процесс входа космического тела в атмосферу можно разделить на три основные стадии:

1. Полёт в разреженной атмосфере до высот около 100 км. Здесь тело нагревается от столкновения с молекулами воздуха, но не испытывает заметного сопротивления. Внешние слои метеороида нагреваются до температур выше 1000 К. Такой режим обтекания практически не оказывает заметного воздействия на крупные тела, однако, мелкие фрагменты (менее 100 мкм) при соответствующих углах входа в атмосферу могут или полностью сгореть, или замедлиться, отдать тепло и остаться на околоземной орбите. Именно распределение слоёв таких микрочастиц описано нами выше в п. 2.1. Здесь характерным параметром является отношение длины свободного пробега к размеру тела — число Кнудсена K_n .

2. Полёт в режиме непрерывного обтекания тела потоком воздуха, когда воздух можно считать сплошной средой и не учитывать его молекулярный состав. Перед телом возникает ударная волна, за которой наблюдается скачок давления и температуры. Давление может достигать сотен атмосфер, температура — нескольких десятков тысяч градусов. Возникают деформации тел, оплавление и испарение их поверхностей, абляция.

3. При приближении к поверхности Земли плотность воздуха растёт, сопротивление увеличивается. Тело либо практически останавливается на какой-то высоте, либо продолжает путь до столкновения с Землёй. При этом крупные тела, попадающие в нижние слои атмосферы со скоростями, часто превышающими число Маха 50 для соответствующей высоты, разделяются на отдельные фрагменты, каждый из которых продолжает падение самостоятельно. Ударные волны отражаются от поверхности Земли и производят возмущения в тропосфере и выше, а также самой земной поверхности.

Таким образом, первая зона полёта метеороида в атмосфере соответствует большим числам Кнудсена $K_n \geq 0,1$, две других — малым $K_n < 0,1$.

В первой зоне изменением массы метеороида можно пренебречь, так как абляция практически отсутствует и тело не разрушается. Здесь движение определяется законами ньютоновской механики:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{\rho v^2}{2} CS \quad (3.17)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \theta \quad (3.18)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_3 + z} = mg \cos \theta \quad (3.19)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.20)$$

Здесь m — масса метеороида, v — скорость его подлёта к Земле, ρ — плотность атмосферы в точке, S — площадь поперечного сечения метеороида (площадь миделя), θ — угол его входа в атмосферу, z — высота над уровнем моря, C — коэффициент сопротивления воздуха.

Изменение плотности атмосферы с высотой рассчитывается по барометрической формуле. Коэффициент C считают зависящим только от числа Кнудсена, причём он убывает с высотой и изменяется в пределах $2 > C > 0,92$ при изменении Kn от 10 до 0,1. Так, для полёта в разреженной атмосфере часто принимается $C = 2$, в достаточно плотной атмосфере — $C \approx 1$ (Тирский, 2000).

Давление сжатого газа перед летящим телом в этой зоне пропорционально газодинамическому давлению потока этого газа (Боярчук, 1999)

$$P \approx \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.21)$$

а давление позади тела практически нулевое. Разница этих давлений и создаёт тормозящую силу.

Таким образом, зависимость изменения скорости тела от действия тормозящей силы и ускорения под действием силы тяжести пропорционально квадрату этой скорости и определяется уравнением (3.17).

Для расчёта движения метеороида в нижних слоях атмосферы система уравнений (3.17)–(3.20) не подходит, так как не учитывает абляцию и связанные с ней эффекты потери массы, реактивной силы и т. д.

В общем виде система уравнений, описывающих движение во второй и частично третьей зоне при $Kn < 0,1$, записывается (в плоскости, проходящей через ось z) как

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho v^2 C S - f v \frac{dm}{dt} \quad (3.22)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \theta \quad (3.23)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_3 + z} + mg \cos \theta - C_L \frac{\rho v^2}{2} S \quad (3.24)$$

$$\zeta \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{2} C_H \rho S (v^2 - v_{cr}^2) \quad \text{при } v > v_{cr},$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{при } v < v_{cr},$$
(3.25)

где f — коэффициент реактивной отдачи, $-1 < f < 1$, C_L — коэффициент подъёмной силы, ζ — удельная теплота абляции небесного тела ($\approx 5 \cdot 10^6$ Дж/кг для каменных и железных метеоритов, C_H — коэффициент теплопередачи, зависящий от размеров, плотности и скорости метеороида, в среднем принимается равным $\approx 0,02$, v_{cr} — критическая скорость, ниже которой абляция не играет существенной роли (≈ 3 км/с).

Площадь S в общем случае — величина переменная, причём для случая шара

$$S = S_0 \left(\frac{m}{m_0} \right)^{2/3}. \quad (3.26)$$

Минимальной скоростью столкновения небесного тела с Землёй является вторая космическая скорость 11,2 км/с, если оно догоняет Землю. Максимальная скорость складывается из скорости обращения Земли вокруг Солнца (29,8 км/с) и параболической скорости относительно Солнца на расстоянии 1 а. е. (42,2 км/с). Это составляет 72 км/с при подлёте метеороида со стороны апекса Земли, а с учётом притяжения Земли достигает 72,8 км/с. То есть максимальная скорость столкновения всегда превышает критическую v_{cr} , и при входе тела в верхнюю атмосферу абляция происходит всегда. Угол входа изменяется от 90° (вертикальный вход) до весьма малых значений, которые, впрочем, наблюдаются достаточно редко.

Мелкие тела в результате этого сгорают в атмосфере.

Крупные тела сгореть не успевают. При этом траектория их полёта становится всё более крутой, пока они не потеряют свою скорость. После этого будет происходить их вертикальное падение в атмосфере при $dv/dt = 0$, так как сила тяжести уравновешена силой сопротивления воздуха. В этом случае скорость падения

$$v_n = \sqrt{\frac{mg}{C\rho S}}. \quad (3.27)$$

Как правило, эта скорость составляет 50–150 м/с. Именно с такой скоростью упало на Землю большинство известных метеоритов.

Однако не все тела успевают затормозиться. Размер небесного тела, способного пройти через атмосферу и на большой

скорости врезаться в Землю, определяется неравенством

$$L > 0.15 \frac{P_0}{\rho_0 g_0 \sin \theta}, \quad (3.28)$$

где P_0 и g_0 — давление и ускорение силы тяжести на поверхности Земли, ρ_0 — плотность небесного тела.

Этот критерий определяет минимальные размеры небесных тел, которые могут сохранить достаточную скорость для образования высокоскоростного ударного кратера. Для Земли это: ледяные метеороиды диаметром более 1,5 м, каменные (>0,6 м) и железные (>0,2 м) метеорные тела. Следует отметить, что данный критерий не относится к обломкам развалившегося в атмосфере тела, которые опускаются на поверхность Земли с дозвуковыми скоростями и образуют ударные кратеры другого вида (*Боярчук, 1999*).

При прохождении небесного тела через атмосферу со сверхзвуковой скоростью создаётся ударная волна, способная в случае крупного тела вызвать достаточно серьёзные разрушения на поверхности Земли. Так, ударная волна, возникшая при падении Тунгусского метеорита, повалила лес на площади около 2 тыс. кв. км.

Помимо нагрева, излучения и генерации ударных волн, при пролёте небесного тела в атмосфере с космической скоростью в ней начинают происходить определённые химические процессы. Ударное сжатие воздуха за фронтом ударной волны вызывает реакцию между кислородом и азотом, приводящую к образованию окисла азота, блокирующего образование озона:



Количество NO, образующегося при пролёте небесного тела, пропорционально величине энергии, передаваемой атмосфере, и составляет почти 7 г на каждые 10^6 Дж. Так, при падении Тунгусского метеорита образовалось около $30 \cdot 10^6$ т окисла азота. Наблюдавшийся после падения метеорита беспрецедентный рост леса в этом районе был вызван, скорее всего, выпадением окислов NO, сыгравших роль удобрений. Хотя, с другой стороны, сразу после падения метеорита в этих районах должны были идти кислотные дожди.

После того, как небесное тело прошло через атмосферу и столкнулось с поверхностью, начинается ряд процессов. При скорости удара о поверхность, превышающей 15 м/с, происходит испарение вещества как ударяющего тела, так и поверхности Земли. В этом случае образуется султан пара, который первым

покидает место удара. Если при меньших скоростях соударения султан пара не формируется, то разлёт выбросов сильно тормозится атмосферой и область их рассеяния будет ограниченной. В данном случае атмосфера не только влияет на характер рассеяния выбросов, но и отсеивает самую мелкую их фракцию, которая может оставаться во взвешенном состоянии длительное (до года) время в атмосфере. Это явление может оказать существенное влияние на климат Земли, особенно при падении на неё крупных небесных тел.

Выбрасываемый из точки удара султан пара состоит из горячего и быстро разлетающегося вещества, обычно обгоняющего даже наиболее высокоскоростные обломки твёрдых выбросов. Атмосферные газы отбрасываются облаком горячих паров, давление которых в начале расширения составляет несколько десятков тысяч атмосфер. При расширении пара от точки удара формируется ударная волна. Радиус поражения такой волной можно оценить как (*Adushkin, Nemchinov, 1994*).

$$R_{\text{км}} = 5,6E_{\text{Мт}}, \quad (3.30)$$

где E — энергия удара, выраженная в мегатоннах тротилового эквивалента.

Далее, по аналогии с ядерным взрывом, образуется раскалённый шар из пара, который поднимается в верхние слои атмосферы и создаёт далее грибовидное облако. Место удара, таким образом, подобно эпицентру ядерного взрыва, может также захватывать пыль и обломки и поднимать их на большую высоту. Так же как и при ядерном взрыве, до образования грибовидного облака в окружающее пространство идёт мощное световое и тепловое излучение, способное вызвать катастрофические пожары.

Сам же султан пара при определённых условиях может прорваться через верхние слои атмосферы и продолжить расширение в околоземное пространство. Численное моделирование показывает (*Боярчук, 1999*), что для начала прорыва в атмосферу должно быть выделено количество энергии, эквивалентное взрыву 150 Мт тротила. Мощность самого большого наземного взрыва, произведённого в СССР в 1961 г., эквивалентна 60 Мт тротила, что соответствует $2,5 \cdot 10^{17}$ Дж энергии, и подобного прорыва не было. Что касается падения небесных тел, то прорыву при таких условиях соответствует каменный метеороид диаметром 100 м, падающий со скоростью 30 км/с и образующий кратер диаметром 3 км.

Кроме ударной волны, возникающей в атмосфере при пролёте через неё небесного тела, подобная волна возникает и при ударе

тела о поверхность Земли. Радиус поражения ударной волной (также по аналогии с ядерным взрывом) $R_{\text{км}}$, возникшей при взрыве с энергией $E_{\text{МТ}}$, определяется как

$$R = 5,6 \cdot E^{0,33}. \quad (3.31)$$

Здесь показатель степени в правой части зависит от высоты взрыва и приведён для случая наземного взрыва. При взрыве в атмосфере он увеличивается. К примеру, для Тунгусского взрыва этот показатель равен 8.

Помимо взаимодействия с атмосферой, часть энергии удара падающего тела переходит в сейсмические волны в земной коре. Доля полной энергии удара, передающаяся земной коре, составляет около 5%. Это приводит к землетрясению в точке удара с параметрами, определяемыми эмпирическим выражением

$$\lg E_s = a + bM, \quad (3.32)$$

где E_s — сейсмическая энергия землетрясения, M — сила землетрясения в баллах по шкале Рихтера a и b — коэффициенты, имеющие у разных авторов различные величины ($a = 4 \div 6$, $b = 1,5 \div 2,5$).

Самое сильное из зафиксированных землетрясений произошло 31 января 1906 г. у берегов Эквадора (*Трёшников, 1988*) и имело магнитуду $M = 8,9$. Это соответствует полной энергии удара $2,8 \cdot 10^{19}$ Дж. Такая энергия выделяется при падении астероида диаметром 450 м со скоростью 20 км/с. Однако, разрушительное действие ударных землетрясений существенно меньше, чем обычных землетрясений, так как при ударных землетрясениях распространяются сейсмические продольные Р-волны, а при обычных землетрясениях — более разрушительные поперечные S-волны. По аналогии, эксперименты с ядерными взрывами показали, что по разрушительной силе ударные землетрясения соответствуют на единицу меньшим по магнитуде естественным землетрясениям. Можно привести после данных рассуждений результаты одного из экспериментов по математическому моделированию Тунгусского явления. Из них можно заключить, что тело общей массой около 10^8 кг вошло в атмосферу по траектории, направленной под углом 35° со скоростью около 40 км/с, разрушилось и резко затормозилось на высотах 20–7 км. Воздушные потоки за ударными волнами разрушили лесной массив, а излучение от нагретых до 10–12 тыс. К остатков тела и окружающей траекторию воздуха воспламенили деревья. Отразившись от земной поверхности, воздушные волны и конвективные потоки рассеяли превратившиеся в пыль остатки

тела (ледяная часть, естественно, испарилась). Ударная волна вызвала колебания воздуха и твёрдой поверхности, аналогичные колебаниям в результате 15–20 Мт взрыва на высоте 10 км.

Такой же процесс зарегистрирован с метеоритом Ривелсток, упавшим в 1965 г. в Канаде. При оценке его массы в 4 тыс. т, скорости входа в атмосферу около 12 км/с, общей энергии возмущений, эквивалентной взрыву 10–20 кт тротила (аналогично взрыву над Хиросимой), было найдено всего около 1 г этого метеороида.

Поскольку около 70 % поверхности нашей планеты составляют океаны, вероятность падения небесных тел в них значительно выше, чем на сушу. Однако, в прогнозах цунами, образующихся при таком столкновении, наблюдаются довольно значительные расхождения. Общая картина столкновения тела с океаном при этом не изменяется. При входе небесного тела в воду океана впереди него образуется ударная волна большой интенсивности. В силу того, что небесное тело движется с гиперзвуковой скоростью, ударная волна сильно вытянута, а её передний фронт отстоит от тела на незначительное расстояние. То есть, взаимодействие тела с водой определяется практически ударом самого тела (Боярчук, 1999).

В работах (Немчинов, 1994; Adushkin, Nemchinov, 1994) приведены результаты численного моделирования столкновения Земли с астероидом при падении его в океан. Так, например, падение астероида радиусом 0,2 км в Балтийское море средней глубиной $\approx 0,6$ км может создать волну с начальной амплитудой 0,3–0,8 км. Здесь весьма показательно описание подводного ядерного взрыва «Бейкер» мощностью 20 кт у атолла Бикини в лагуне с глубиной $H_0 = 60$ м. По расчётам, радиус сферы полностью испарённой воды вокруг заряда составлял 10 м при массе 4 кт. Через 4 мс после взрыва над его центром начал подниматься купол со скоростью 0,75 км/с, которая быстро уменьшалась из-за сопротивления атмосферы и тяготения. После прорыва пузыря газа, увлекая за собой часть воды, вырвались в атмосферу, и образовалось конденсационное облако. Давление в газовом пузыре упало, и вода стала заполнять образующуюся полость. Края воронки поднялись, образовался пароводяной столб — султан. Его максимальная высота составила 1,8 км, наибольший диаметр 0,6 км, что превысило глубину лагуны в 10 раз, толщина стенок — 90 м, а количество поднятой вверх воды оценивалось приблизительно в 1 Мт. Базисная волна — смесь воды и пара — к 240 с достигла высоты 0,5 км при радиусе 5,5 км. Первая из гравитационных волн к 11 с имела максималь-

ную высоту 28 м и находилась на расстоянии 300 м от центра взрыва. На расстоянии 6,6 км наиболее высокой была девятая волна — 1,8 м. Обработка этих результатов дала возможность получить эмпирическое соотношение между глубиной водоёма и характерного размера с энергией E при условии, что разность высоты волны над уровнем дна и глубины водоёма меньше самой глубины дна H_0

$$E \approx H_0^{9/2}. \quad (3.33)$$

Таким образом, взрыв «Бейкер» был при увеличении глубины до 600 м приближённо пересчитан на энергию взрыва 600 Мт. Подобную энергию имеет железный метеороид массой 12 Мт и, соответственно, диаметр 150 м, движущийся со скоростью 20 км/с (или при такой же скорости каменный метеороид диаметром 200 м или ядро кометы с плотностью 1 г/см³ и диаметром 300 м). Размер такого тела намного меньше рассматриваемой глубины океана. Поскольку тело с данными размерами без сильного торможения пройдёт слой воды до дна, то при ударе о него произойдёт взрыв, во многом аналогичный ядерному и приводящий к подъёму купола, выбросу воды и образованию султана, базисной и гравитационной волн. При этом картина явлений достаточно близка к картине подводного ядерного взрыва. Амплитуда гравитационной волны составит $\approx 300\text{--}800$ м на расстоянии 3 км от места падения.

Проведённые ядерные испытания и моделирование явлений при падении тел различной массы в воду позволило получить эмпирические зависимости для соотношения высоты гравитационной волны h и расстояния r от места падения:

$$h \sim r^{-1} \quad (3.34)$$

Для приведённого примера с энергией падения, эквивалентной массе тела 600 Мт на расстоянии порядка 200–300 км от места падения, высота волны будет составлять 10 м. Можно сравнить полученную величину с реальными природными катастрофами. Так, за последние 100 лет было зарегистрировано 14 сильных цунами у берегов Камчатки. Из них наиболее катастрофическими были 5 цунами с высотой волн от 5–7 до 10–20 м. Столь катастрофические цунами будут наблюдаться на очень больших расстояниях от места падения небесных тел — до 2000 км для тел диаметром до 1 км (Немчинов и др., 1994).

Проведённые рядом авторов расчёты дали основание сделать следующие выводы.

При падении небесных тел диаметром 6–10 км в океан глубиной 4–5 км возникает водяной вал с высотой порядка глубины океана на расстоянии около 25 км от места падения (при скорости тела 20–30 км/с).

При распространении волны её амплитуда затухает обратно пропорционально расстоянию от места падения. Цунами, возникающие при падении в океан не очень крупных астероидов и ядер комет (0,1–1 км) могут приводить к катастрофическим последствиям регионального и глобального характера. Удар водяного вала о прибрежные горы на сравнительно небольших расстояниях от места падения может приводить к существенному изменению рельефа.

Выброс воды, особенно солёной воды морей и океанов, на высоты до 30–40 км может приводить к сложным химическим аэрономическим процессам и, возможно, даже к частичному разрушению озонового слоя.

Наиболее частыми являются столкновения Земли с веществом как регулярных, так и спорадических метеорных потоков, с метеороидами. В результате в течение года в атмосферу Земли попадает (*Микиша и др.*, 1995) до $2 \cdot 10^5$ тонн метеорного вещества в виде мелких фракций (или даже до $3 \cdot 10^6$ т/сут. — *Сазонов*, 2000), которые или полностью испаряются в верхней атмосфере, или долетают до поверхности Земли в виде больших метеоритов. Наиболее крупные метеороиды, входящие в состав метеорных потоков, выпадают на Землю в виде метеоритов. За последнее столетие на Землю упали два крупных метеорита: Тунгусский (1908 г.) и Сихоте-Алиньский (1947 г.). Крупнейший метеорит упал в Аризоне (Barringer Meteor Crater, Каньон Дьявола диаметром 1,2 км, глубиной ≈ 175 м, возрастом около 50 тыс. лет). Оценка энергии Тунгусского явления даёт величину, соответствующую взрыву около 5–20 Мт, энергии Сихоте-Алиньского — величину, соответствующую взрыву примерно до 20 кт. Оценка массы Аризонского метеорита (астероида?) — 12 тыс. тонн, что даёт энергию соударения с Землёй, эквивалентную 250 Мт.

Авторы целого ряда работ провели расчёт соответствия диаметра метеоритного (или астероидного) кратера магнитуде землетрясения, сопоставив энергию удара метеорита при скорости столкновения 40 км/с энергией землетрясения. Энергия сильнейшего (магнитуда 8,9 по шкале Рихтера) землетрясения сравнима по этим расчётам с энергией удара астероидного тела диаметром 2 км (что, кстати, не совсем соответствует результатам, приведённым выше). Глобальность ожидаемой катастрофы при ударе

с такой энергией подтверждается оценкой размера кратера, образующегося на Земле в результате соударения. Расчёты для энергии, соответствующей землетрясению в 8,9 балла, дают глубину кратера порядка 20 км, что равно средней толщине земной коры. Далее делаются следующие выводы: 1) астероиды диаметром менее 0,5 км вызывают локальные повреждения на поверхности Земли; 2) астероиды диаметром от 0,5 км до 2 км вызывают серьёзные повреждения регионального характера; 3) астероиды диаметром более 2 км способны вызвать катастрофу глобального масштаба; 4) кроме этого, при глобальной катастрофе в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, что приводит к эффекту «ядерной зимы».

К примеру, математическая модель падения астероидно-кометного тела в районе п-ова Юкатан около 65 млн лет назад показывает (*Pierrazzo, 1997*), что в атмосферу было выброшено около 700 млрд т воды и до 300 млрд т серы. Значительная часть серы достигла стратосферы, где её окислы соединились с водой и образовали мощный слой аэрозолей, вызвавший на Земле эффект «ядерной зимы», что было достаточно для катастрофического вымирания большей части растительного и 75 % животного мира (включая динозавров). При этом выделилась энергия, эквивалентная взрыву 10^8 Мт тринитротолуола (*Сазонов, 2000*), что даёт возможность оценить размеры упавшего тела в 10–15 км (*Инатов, 2000*).

К.И. Чурюмов (*Чурюмов, 2002a*) более склоняется к кометному происхождению кратера Чиксулуб. По его мнению, значительная масса пыли, входящая в кометное ядро, после соударения с Землёй и взрыва поднялась в высокие слои атмосферы. В результате изменилось направление градиента температуры, а также резко упало количество солнечной энергии, поступающей к поверхности, что привело к установлению «ядерной зимы». Это, а также отравление биосферы кометными газами (цианом, угарным газом и др.) вызвало массовое вымирание биоты. Прослойка толщиной в 1 см, обогащённая иридием в морских осадочных породах более 100 районов Земли возрастом 65 млн лет разделяет две геологические эры — мезозойскую и кайнозойскую.

Можно здесь перечислить некоторые известные на сегодняшний день крупные астроблемы (кратеры, образованные падением небесных тел) на поверхности нашей планеты. Это: Попигайская астроблема (диаметр около 100 км, возраст 36–37 млн лет), Карская (≈ 65 км, 70 млн лет), Пучеги-Катунская (≈ 80 км, 175 млн лет) на территории России, кратер Чиксулуб (*Chicxulub*) диаметром 170–300 км и возрастом 65 млн лет на побережье

Мексика. Кратер Маникуаган (70 км, 200 млн лет) на севере Канады. Всего же на Земле известно более 200 астроблем (*Микиша и др.*, 1995).

С ударами крупных метеороидов и астероидов часто связывают массовые уничтожения биоты, происходившие время от времени в истории Земли. На рис. 3.12 представлены данные о периодах катастрофического вымирания морских животных за последние 250 млн лет (*Блинников, 2002; Веймарн и др.*, 1998; *Витязев, 2000; Раур, Sepkovski, 1984*).

Однако, если космическое тело не является астероидом или метеороидом, а по структуре ближе к рыхлому кометному ядру, то последствия столкновения с Землёй будут более катастрофичны. Процессы, затрагивающие жизнь цивилизации, начнутся уже в верхней атмосфере. Это ударные волны, запыление, резко снижающее прозрачность атмосферы, различные световые эффекты.

Ярким примером воздействия падающей кометы на процессы, происходящие в околопланетном пространстве и её атмосфере, является следующее событие, впервые наблюдавшееся в истории человечества.

С 16 по 22 июля 1994 г. произошло столкновение осколков кометы Шумейкеров-Леви (SL9) с Юпитером. 22 осколка, состоящих из льда, космической пыли и твёрдых вкраплений, размерами от нескольких сот метров до 3 км входили в атмосферу планеты со скоростями до 65 км/с. Наблюдения этого события дали наглядную иллюстрацию процессов, происходящих в подобных случаях, и показали, что столкновение подобной кометы с Землёй привело бы к глобальной катастрофе для биосферы: энергия соударения составила до 10^{24} Дж. Это в 10^4 раз больше накопленного на Земле ядерного потенциала и в 10^6 превышает энергию столкновения Земли с Тунгусским метеоритом (*Фортон и др.*, 1996; *Тирский, 2001*).

При указанных скоростях входа в атмосферу Юпитера и шкале её высот 30 км лобовое давление на фрагменты кометы SL9 составляло величину порядка 10^5 атм, и разрушение их начало происходить ещё над облаками планеты. В дальнейшем образовавшаяся крупная пыль в облаке горячего газа (до десятков тысяч градусов за ударной волной) взрывалась и в таком виде, расширяясь продолжало двигаться вглубь атмосферы. Через несколько десятых долей секунды после взрыва основная часть вещества собиралась в чашеобразном слое радиусом ≈ 3 км и толщиной ≈ 1 км с отогнутыми вверх краями чаши. Через 1 с после взрыва облако имеет радиус около 7 км, через 6 с —

10 км. Далее ударная волна движется вниз и достаточно быстро затухает. После её ухода образуется термик (облако нагретого газа), который всплывает под действием архимедовой силы. Образуется струйно-конвективное движение газа вверх со скоростью до 3,5 км/с. Колонка восходящего газа имеет диаметр порядка 40 км и состоит лишь на 10–15% из вещества кометы. В дальнейшем выходящие из атмосферы Юпитера и наблюдавшиеся астрономами огненные шары имели размеры в несколько тысяч километров и поднимались над лимбом планеты на ≈ 3000 км. На местах входа фрагментов кометы в атмосферу образовывались пятна размерами в несколько тысяч километров и сохранявшиеся в течение нескольких месяцев (*Тирский, 2001*).

Наблюдались: генерация внутренних гравитационных волн поднимающимися облаками взрыва, возмущения ионосферы и магнитосферы, аномалии в радиоизлучении радиационных поясов Юпитера.

Более слабо проявили себя эффекты: световое эхо от спутников Юпитера, возбуждение сейсмической активности в процессе столкновения.

Имеются отдельные сообщения о наблюдении уярчения радиационных поясов в ДМ-диапазоне, возбуждение фиолетового полярного сияния, вспышки УФ- и рентгеновского излучения при ударе одного из осколков, уменьшение яркости плазменного тора спутника Ио в крайнем ультрафиолете и др. (*www.science.ru, 2002*).

Таким образом, последствия ударов (и даже не только ударов) небесных тел о Землю могут быть достаточно серьезными — от локальных разрушений до глобальных бедствий планетарного масштаба. В табл. 3.4 сведены данные о предполагаемых последствиях столкновения небесных тел с Землёй при различных энергиях соударения (*Боярчук, 1999; Тооп, 1994*).

Вместе с тем, оценка частоты столкновений даёт величины, значительно более низкие по сравнению с частотой разрушительных землетрясений: для тел типа Тунгусского метеорита от 200 до 700 лет, для астероидов с диаметром от 0,5 до 2 км — частота составляет 70–20 тыс. лет, для астероидов диаметром более 2 км — 1 млн. — 300 тыс. лет (*Микиша, 1995*).

В качестве номинального порога, при котором наступает глобальный эффект, (*Боярчук, 1999*) принимается значение энергии $2 \cdot 10^5$ Мт в тротиловом эквиваленте, которое соответствует энергии каменного небесного тела диаметром 1,5 км. Как отмечают авторы этой работы, ошибки в определении номинальной пороговой энергии могут составить целый порядок.

Таблица 3.4. Основные последствия столкновения небесных тел с Землёй

Поражающий фактор	Результат влияния	Длительность влияния	Масштаб действия	Энергия соударения, Мт
Пыль в атмосфере	«ядерная зима»	годы	глобально	$> 10^5$
	прекращение фотосинтеза	месяцы	глобально	$> 10^6$
	полная темнота	месяцы	глобально	$> 10^7$
Пожары	горение, дым	часы	локально	$\leq 10^4$
		месяцы	регионально	$> 10^6$
		месяцы	глобально	$> 10^7$
Окислы азота	кислотные дожди	дни	локально	> 10
		месяцы	регионально	$> 10^3$
	нарушение озонового слоя	годы	глобально	$> 10^5$
Ударная волна	механические разрушения	минуты	локально	$\leq 10^4$
		часы	регионально	$> 10^7$
Цунами	механические разрушения	часы	регионально	$> 10^4$
Выбросы воды и углекислоты	потепление климата	десятилетия	глобально	$> 10^4$

Более оптимальным будет, видимо, его значение в диапазоне $1,5 \cdot 10^4 \div 10^7$ Мт, что соответствует энергиям тел диаметром $0,6 \div 5$ км при скорости 20 км/с и $0,4 \div 3$ км при скорости 42 км/с. Тогда средняя частота падения тел, соответствующая нижней и верхней границе интервала неопределённости, составляет 7×10^4 лет и $6 \cdot 10^6$ лет соответственно. В этом случае номинальное значение частоты падения тела, способного вызвать глобальную катастрофу, соответствует одному падению в 100 тыс. лет.

С другой стороны, основываясь на данных, полученных в результате испытаний ядерного оружия, следует, что взрыв с энергией 10^5 – 10^6 Мт тротилового эквивалента приводит к образованию такого количества пыли, что это вызовет резкое снижение температуры на большей части суши и приведёт к эффекту «ядерной зимы» (Вавилов, 1988; Израэль, 1987; Моисеев, 1988; Стенчиков, 1987). Такая энергия выделяется и при столкновении Земли с небесным телом размерами 1–2 км и скоростью

20 км/с. Нижняя оценка частоты таких соударений — около 300 тыс. лет.

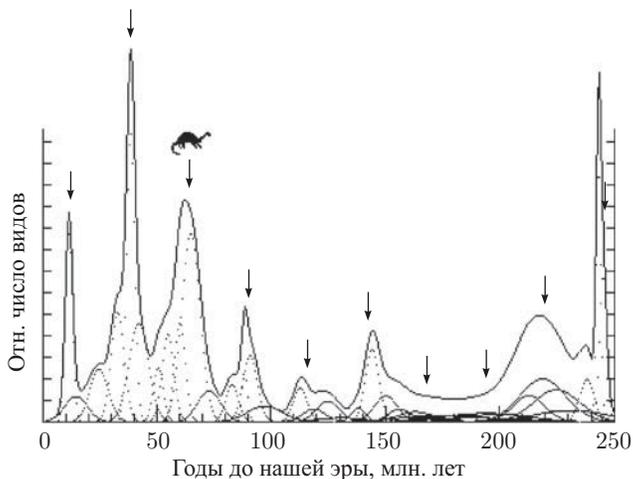


Рис. 3.12. Одна из реконструкций массового вымирания морских животных в истории Земли

На рис. 3.13 представлена усреднённая по различным данным (Боярчук, 1999; Сазонов, 2000) зависимость частоты столкновения астероидов от их размеров.

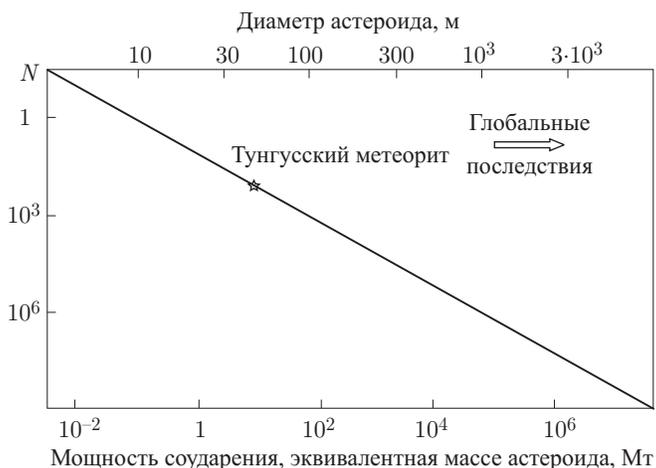


Рис. 3.13. Сравнительная оценка зависимости частоты столкновений (N) от размера астероида и мощности столкновения с Землёй

При энергиях соударения, меньших 1–2 Мт тротилового эквивалента, кометные тела взрываются в верхних слоях атмосферы. При таких энергиях основную опасность представляют каменные и железо-каменные метеориты. Кометы дают основной вклад в общий поток опасных тел при энергиях соударения 3–20 Мт тротилового эквивалента. В частности, распад ядер мини-комет на высотах 8000–24000 км над Землёй приводит к образованию крупных облаков водяного пара, что вызывает повышение уровня океана на 2.5 см каждые 10^4 лет (Сазонов, 2000). При энергиях, больших 20 Мт и до $\approx 10^6$ Мт, астероидный и кометный компоненты дают примерно одинаковый вклад в общий поток опасных объектов. При более высоких энергиях соударений кометная составляющая резко возрастает.

Вместе с тем (Сазонов, 2000) считается, что неизвестны ещё около 10^5 астероидов и комет, имеющих размеры более 100 м и пересекающих орбиту Земли. Этот факт совместно с анализом свыше 130 ударных кратеров на поверхности Земли может значительно увеличить результаты оценки вероятности столкновения Земли с естественными космическими объектами.

Таким образом, астероидная и метеоритная (включая ядра комет) опасность существует и способна достаточно активно воздействовать на природу Земли. Однако, хотя падение на Землю небесного тела является достаточно редким событием, риск погибнуть в результате космической катастрофы для каждого отдельного человека вполне сопоставим с риском гибели от более традиционных источников опасности (Боярчук, 1999).

Сейчас стало достаточно ясным, что эволюционное развитие биосферы прерывалось региональными и глобальными катаклизмами. При этом изменялась направленность многих процессов. Наряду с другими факторами, это способствовало как исчезновению жизненных форм, так и возникновению новых. Несомненно, воздействие ударных событий на биосферу и процессы в ОКП влияло на формирование и эволюцию биосферы (Витязев, 2000).

Здесь можно суммировать и результаты воздействия космических тел естественного происхождения на околоземное космическое пространство.

Это периодические и внезапные процессы резкого повышения загрязнённости ОКП частицами метеорного, астероидного, кометного происхождения, компонентами газов кометного происхождения, что ведёт к уменьшению общего потока тепла, поступающего в биосферу, физическим и химическим процессам в верхней атмосфере и ионосфере, изменяющим их свойства,

изменению условий прохождения радиоволн различных частот через ионосферу.

Образование экрана из водяного пара уже в геокороне, изменяющего тепловой режим не только атмосферы, но и плазмы магнитосферы.

Возмущения в магнитосфере и ионосфере в результате ударного воздействия космических тел, движущихся со сверхзвуковыми скоростями.

Ионизация верхних слоёв атмосферы: метеоры создают на ночной стороне плотный и тонкий ионосферный слой — спорадический слой E_s . Подобные ионосферные неоднородности, создаваемые метеорами, используются в сверхдальней радиосвязи.

Аномалии в излучении радиационных поясов, приводящие к генерации аномальных полярных сияний, инфразвуковых и сверхнизкочастотных колебаний в ОКП, проникающих к поверхности Земли.

Вместе с тем, следует отметить, что ОКП является своеобразным экраном, защищающим, хотя и частично, земную биосферу от прямых воздействий естественных космических тел. Последствия таких воздействий при отсутствии ОКП были бы значительно более катастрофичными.

3.3. Воздействие техногенных отходов на состояние околоземного космического пространства и процессы в земной природе

Проблему техногенных отходов в ОКП можно рассматривать как с точки зрения экологии космоса, так и исходя из вопросов воздействия этих отходов на земную природу с целью предотвращения (или, по крайней мере, уменьшения) такого воздействия.

Проблема увеличения числа техногенных объектов в ОКП становится всё более актуальной в связи с рядом факторов:

- проблемами безопасности пилотируемых космических полётов;
- столкновениями космических объектов друг с другом или с техногенным мусором с образованием новых осколков;
- возможностью непрогнозируемого выпадения космических объектов и техногенных осколков на Землю, химическим, биологическим, радиоактивным заражением её поверхности и атмосферы;
- разрушением космических объектов в результате взрывов на орбите и взрывов их ракет-носителей в верхних слоях атмосферы при старте, прямо воздействующих на земную природу;

— заражением верхней атмосферы, ионосферы, биосферы продуктами сгорания ракетного топлива при запусках космических объектов;

— возникновением помех астрономическим наблюдениям и различным экспериментам в ОКП;

— изменением свойств ОКП, верхней атмосферы и ионосферы Земли, что может привести к необратимым изменениям в биосфере.

Как было отмечено выше, опасность для запускаемых аппаратов представляет большое число техногенных отходов, возникших вследствие нескольких тысяч запусков и более ста разрушений, имевших место за годы космической эры. При столкновении с осколками космические объекты могут быть повреждены и не выполнять далее свои функции, а находящиеся на них люди могут погибнуть. Вообще любые столкновения в околоземном пространстве представляют потенциальную опасность, поскольку при этом возникает большое количество обломков, создающих дополнительную угрозу как столкновений в будущем, так и угрозу земной природе при своих падениях.

Возможные последствия столкновения космических аппаратов с техногенными осколками многообразны — от медленной эрозии поверхности (оптических приборов, датчиков, панелей солнечных батарей) до взрыва и полного разрушения. Достоверно установлено, что основную опасность представляют мелкие частицы, число которых резко увеличивается с уменьшением размеров. В настоящее время опасность столкновения космического аппарата с частицами размером более 1 см стала вполне реальной.

Опасность столкновений чревата возникновением лавинообразного процесса загрязнения, что приведёт, помимо прочего, к невозможности дальнейшей космической деятельности человечества. Ориентировочная современная оценка таких столкновений — 1 за год. Некоторые специалисты считают, что этот лавинообразный процесс уже начался, его интенсивность будет нарастать и к середине XXI в. число столкновений увеличится в 10–20 раз (*Назаренко, Чернявский, 1995*). На 2000 г. зафиксировано одно столкновение (*Алавердов и др., 2000а*). Французский ИСЗ № 23606 (массой 50 кг, высотой орбиты 650 км) столкнулся с фрагментом РН «Ариан», в результате чего от него отделился большой наблюдаемый кусок гравистабилизирующей штанги.

На рис. 3.14 приведены результаты расчёта, выполненного для трёх вариантов предполагавшегося ежегодного прироста чис-

ла искусственных объектов в интервале высот от 200 до 4000 км на 13%, на 510 объектов и на 320 объектов в год (*Физика косм. простр.*, 1997). Такие варианты увеличения числа искусственных объектов в околоземном космическом пространстве были выбраны на основании анализа их количества в разные периоды до 1976 г. Согласно этим данным, при наиболее быстром (1) ежегодном приросте числа крупных объектов в околоземном пространстве (ежегодно на 13%) первое столкновение спутника с крупным телом искусственного происхождения прогнозируется к 1989 г., а при наиболее медленном (3) приросте (на 320 объектов в год) к 1997 г. Последующее развитие событий подтвердило прогноз, сделанный для случая наиболее медленного прироста числа искусственных объектов в околоземном пространстве. Кривая 2 соответствует промежуточному темпу прироста.

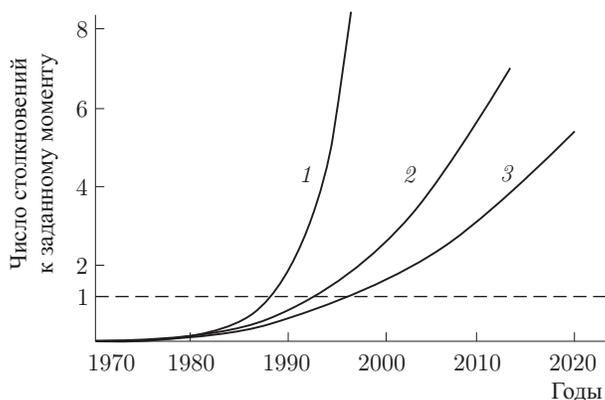


Рис. 3.14. Прогноз столкновений техногенных объектов в ОКП

При оценке риска столкновений космических объектов с техногенными отходами применяется ряд достаточно сложных методов. Так называемый прямой детерминированный метод использует в качестве входной информации дискретную совокупность космических объектов с определёнными орбитами. В работе (*Хуторовский, 1995*) предлагается метод, в котором ищутся интервалы опасных сближений любых пар космических объектов, оцениваются геометрические характеристики каждого сближения и вероятность столкновения. Здесь задачи решаются с использованием архива опасных сближений, в котором содержится достаточно полная информация относительно всех опасных сближений, имевших место между любыми двумя объектами. Для формирования архива опасных сближений требуется весьма

большой объём вычислений, требующий расчёта всех сближений до 10^4 пар объектов на суточном временном интервале. Этот метод даёт в настоящее время наиболее точные результаты по сравнению с другими. Очевидным преимуществом является также его способность выдавать предупреждения о возможных реальных столкновениях в будущем, что позволяет космическим службам организовать комплекс мероприятий по возможному предотвращению, а также наблюдению самого процесса столкновения.

Наиболее традиционным является статистический подход к расчёту столкновений космических объектов. Его основной особенностью, в отличие от детерминированного, служит представление движения совокупности космических объектов во времени и пространстве в виде пуассоновского случайного процесса. При таком предположении эволюция ансамбля объектов описывается пространственной плотностью $F(\mathbf{r}, t)$, где \mathbf{r} — трёхмерный вектор декартовых координат X, Y, Z , t — время. Физический смысл функции $F(\mathbf{r}, t)$ — число объектов на единицу объёма в окрестностях точки \mathbf{r} в момент времени t (Хуторовский, 1995).

Из описанных методов расчёта столкновений объектов в околоземном пространстве статистический проще, к тому же он позволяет моделировать более широкий круг ситуаций, нежели детерминированный. Однако, последний более точен и полон при анализе космической обстановки и может быть использован для настройки статистических моделей и повышения их точности. Поэтому при построении современных моделей космического мусора, с помощью которых выполняется анализ обстановки в околоземном пространстве, оценивается безопасность космических полётов, проектируются наземные и космические системы и измерительные средства, используются оба указанных метода.

В работе (Хуторовский и др., 1998) рассмотрены некоторые характеристики риска столкновений для орбитального комплекса «Мир», полученные по архивам в период с июля 1992 г. по август 1994 г.

Всего за этот период зафиксировано 124 опасных сближения каталогизированных объектов. Из них произошло:

- одно сближение на расстояние менее 1 км;
- три сближения на расстояние от 1 до 2 км;
- одно сближение на расстояние от 2 до 3 км.

Наиболее опасным для ОКС «Мир» оказалось сближение с ИСЗ «Космос-1508». 8 ноября 1992 г. космический аппарат сблизился с орбитальной станцией на минимальное расстояние $\approx 0,3$ км с относительной скоростью 12,7 км/с. Авторы оце-

нивают значение вероятности столкновения при этом событии как $0,21 \cdot 10^{-4}$, что близко к ожидаемой годовой вероятности столкновения с каталогизированным объектом. 15.09.1997 г. экипаж ОКС «Мир» перебрался в возвращаемый модуль «Союз» во время предсказанного опасного сближения с ИСЗ NSTJ-2 (Алавердов В.В. и др., 2000б).

Упрощённая формула для расчёта годовой вероятности P_c столкновения между всеми каталогизированными и некаталогизированными искусственными объектами в ОКП получена (Хуторовский и др., 1998):

$$P_c \approx 0.030 + 0.009 \frac{n_\Sigma}{n_p}, \quad (3.35)$$

где n_Σ — суммарное число некаталогизированных объектов различных размеров, учитываемых при расчёте вероятности столкновения; n_p — число каталогизированных обломков разрушений в российском каталоге.

Расчёты, проведённые далее, показывают, что суммарная вероятность столкновений практически не зависит от распределения числа некаталогизированных объектов по размерам, а определяется их общим числом. Чем меньше размер учитываемого при анализе риска столкновения объектов, тем больше величина этого риска. Столкновения среди объектов более 10 см по этим оценкам достаточно редки (примерно одно в 25 лет). Однако, для объектов размерами 1–2 см происходит уже одно столкновение в год, а для частиц техногенного мусора 0,1–0,2 см — до 200 в год.

В работе (Назаренко, Чернявский, 1995) исследовалась вероятность столкновения КА с некаталогизированным техногенным мусором в ОКП.

Эти расчёты проводились из предположения, что величина d возможных размеров техногенных космических отходов задаётся плотностью распределения $p(d)$. Методика оценки среднего числа ожидаемых столкновений N некоторого космического аппарата диаметром $D_{КА}$ с космическим мусором разных размеров основана на интегрировании дифференциального уравнения

$$\frac{dN(D)}{dt} = \frac{\pi}{4} \int_d (D + d)^2 p(d) \rho(t) \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) V_r(t, A) dA dd \quad (3.36)$$

Здесь $\rho(t)$ — плотность космического мусора (число объектов в единице объёма в данной точке околоземного пространства, A — азимут относительно скорости рассматриваемого объек-

та и приближающегося к нему объекта, $p(t, A)$ — нормированная плотность распределения возможных значений азимута, $V_r(t, A)$ — относительная скорость космического объекта.

Произведение второго интеграла на плотность имеет смысл потока космического мусора через сферическую поверхность с единичной площадью сечения.

По выражению (3.36) определялась вероятность столкновения КА с фрагментами определенного космического мусора, в частности ОКС «Мир» (рис. 3.15).

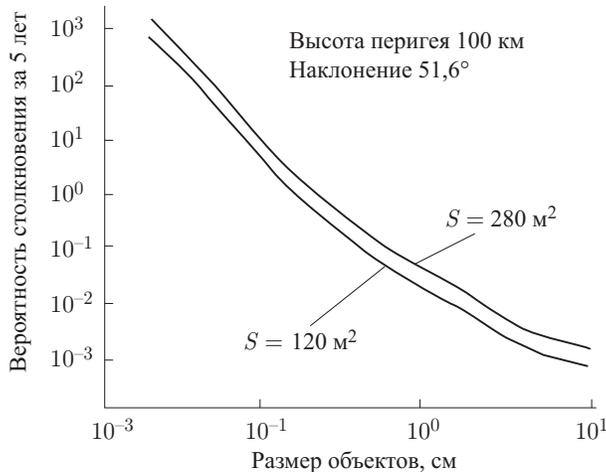


Рис. 3.15. Вероятность столкновения ОКС «Мир» с техногенным космическим мусором для двух значений площади столкновения

Также показано, что вероятность столкновения станции с осколками размерами более 1 см составляет несколько процентов, что при средней скорости столкновения около 12 км/с может привести к катастрофическим последствиям. Вероятность столкновения с течением времени растёт, и уже сейчас возникла проблема разработки способов защиты проектируемых аппаратов.

Достаточно важной причиной в увеличении числа техногенных объектов в ОКП являются взрывы спутников на орбите или взрывы последних ступеней ракет-носителей на последнем участке выведения их на орбиту, которые начались ещё на заре космической эры. Так, например, взрывы вторых ступеней семи ракет Дельта увеличили объём искусственного космического мусора на 1300 наблюдаемых и каталогизированных фрагментов (Clark, 1994). Распад широко известного спутника-баллона PAGEOS

дал до 80 осколков (Касименко, Рышлова, 1995). Максимальное число осколков было получено при взрыве верхней ступени ракеты-носителя Титан-Транстейдж — 509. В 90-х годах взрывы происходили с верхними ступенями ракет Титан, Космос, Ариан, Рокот, Пегас (Рышлова, 1995). С 1961 по 1998 зарегистрировано 153 взрыва на околоземных орбитах (Алавердов и др., 2000), в среднем по 3–5 в год.

Подсчёт числа осколков, образующихся при взрывах и распадах космических объектов на геостационарных орбитах, ограничен размерами ≈ 1 м. Оценки их числа дают величину, по крайней мере, в 3 раза превышающую количество каталогизированных объектов (Касименко и др., 1995, 2000).

В работе (Вершков и др., 2000, 2001) проведено моделирование последствий взрывов ИСЗ Экран-2 (1978 г.) и Транстейдж (1992 г.) на геостационарной орбите.

При скорости взрыва 250 м/с максимальные изменения наклона и долготы узла орбиты фрагментов относительно орбиты ИСЗ не превысили $\pm 4,7^\circ$. Перигейные и апогейные расстояния орбит фрагментов находятся в пределах 4,8–9,9 радиусов Земли, то есть различаются на 23 000 км. Все орбиты фрагментов пересекаются в точке взрыва.

Родительское тело также изменяет свою орбиту при взрыве, его можно считать одним из самых больших фрагментов. При скорости взрыва большей 100 м/с самые крупные осколки получают приращение скорости 1–10 м/с. Вариации их элементов орбит невелики, эволюционируют примерно одинаково. При максимальных скоростях появляется большое число мелких осколков со значительным разнообразием орбит. Орбиты фрагментов массой от нескольких граммов до килограмма распределяются в пространстве с достаточно большим эксцентриситетом. Более мелкие осколки улетают с большей скоростью на большие расстояния.

В экваториальной геоцентрической системе координат область движения каталогизированных геостационарных искусственных объектов определяется в виде тора, наклонённого к экватору на $7,35^\circ$ шириной по склонению 15° и толщиной по радиусу 6000 км. На рис. 3.16 показана эта область и область движения осколков ИСЗ после одного взрыва за один оборот. Разница величин больших полуосей орбит фрагментов приводит к существенному различию отвечающих им плоскостей Лапласа. В результате эволюции максимальные значения наклона орбит наиболее удалённых осколков достигают 28° .

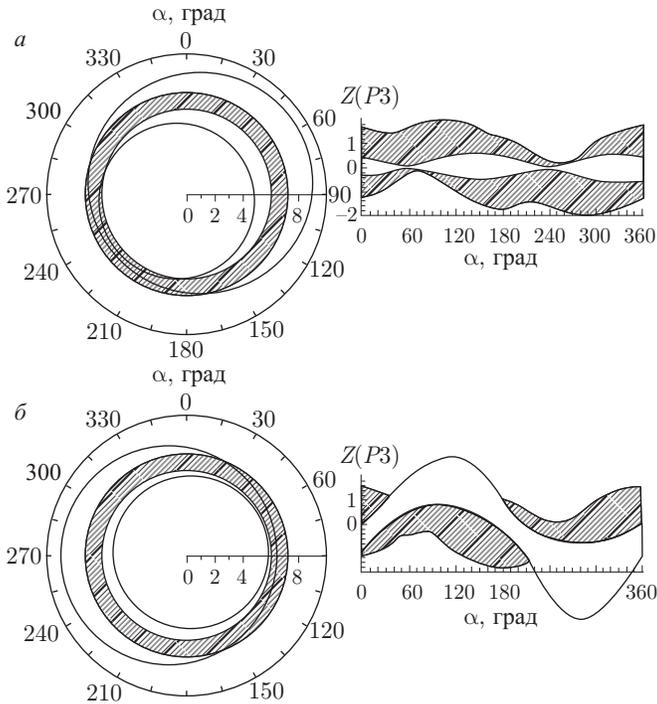


Рис. 3.16. Эволюция облака обломков после взрыва объекта на геостационарной орбите

Таким образом, в предположении того, что приращение скоростей обломков спутника Экран-2 при взрыве составило до 250 м/с, область их современного расположения по сравнению с геостационарным кольцом увеличилась в два раза по расстоянию от Земли, в 5 раз по ширине с максимальной плотностью искусственного мусора внутри кольца (рис. 3.16)

Результаты моделирования хорошо коррелируют с результатами специальной наблюдательной программы геостационарного мусора ESOС (*Schildknecht, etc., 2001*).

Высокая точность разработанной долгопериодической теории движения даёт возможность использовать её при детерминированном моделировании засорённости геостационарной зоны (*Вершков и др., 2001*).

В работе (*Бордовицына, Дружинина, 1998*) приведены результаты статистического моделирования динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада (взрыва) космического объекта на орбите в ОКП. Показано, что пер-

воначально после взрыва облако техногенных осколков имеет форму постоянно расширяющегося и удлиняющегося эллипсоида. Время его существования ограничено моментом замыкания облака, когда фрагменты оказываются рассеянными вдоль всей орбиты родительского тела

$$T_A = \frac{P_{\max}^2}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (3.37)$$

где P_{\max} и P_{\min} — максимальный и минимальный периоды обращения выброшенных частиц, движущихся по орбитам с большими полуосьями a_{\max} и a_{\min} .

С момента замыкания облака и образования тора, заполненного фрагментами мусора, эта структура начинает разрушаться под действием возмущений различной природы, определяемых параметрами орбит фрагментов, их размерами и массами. Время, в течение которого тор расширяется и объём, занятый фрагментами, приобретает форму полосы, по широте ограниченной наклоном орбиты родительского объекта, определяется как

$$T_C = \frac{360}{\Delta\dot{\Omega}}, \quad (3.38)$$

где $\Delta\dot{\Omega} = \dot{\Omega}_{\max} - \dot{\Omega}_{\min}$ — интервал скорости векового изменения долготы узла орбит фрагментов.

Проведённый авторами (*Бордовицына, Дружинина, 1998*) статистический анализ процесса распада показал, что максимальное скопление мусора после распада низколетящего космического объекта находится в диапазоне высот $H = 500-1000$ км с прямыми восхождениями $\alpha = 10^\circ-20^\circ, 140^\circ-170^\circ, 220^\circ-260^\circ$ и склонениями $\delta = -50^\circ - 85^\circ, 80^\circ$.

Максимальное скопление техногенных осколков после распада космического объекта на геостационарной орбите находится в диапазоне высот $H = 25000-41000$ км с параметрами $\alpha = 0-90^\circ$ и $\delta = 0-20^\circ$.

Анализ интервалов изменения величин больших полуосей фрагментов низкоорбитального объекта показывает, что около 15% фрагментов сразу попадает в атмосферу и сгорает. Около 20% фрагментов сгорает в атмосфере в течение первых 15 суток. Далее облако расплзается на отдельные фрагменты, имеющие свою орбиту. Первоначально после взрыва облако фрагментов имеет форму эллипсоида, существующего около 40 мин с радиусом разлёта фрагментов около 2000 км. Затем облако в течение примерно 280 мин (3 оборота родительского тела) постепенно приобретает форму тора, которая сохраняется около 70 суток.

После распада геостационарного космического объекта форма эллипсоида сохраняется около 80 мин, формирование тора происходит в течение примерно 66–77 час.

Авторами (*Касименко и др.*, 2000) проведён детальный сравнительный анализ связи взрывов на низких орбитах с состоянием ОКП. Показано, что максимальное количество взрывов приходится на минимумы солнечного цикла.

Весьма чётко прослеживается корреляция между количеством взрывов по месяцам и распределением метеороидов в ОКП в течение года.

В работе (*Касименко и др.*, 2001) проанализированы взрывы, вызванные различными причинами. Часть из них является направленными. Другие связаны с неполадками питания и истечением топлива. Причины некоторых неизвестны. Результаты анализа показали, что взрывы космических объектов происходят в разное время после запуска: от нескольких минут до 30 лет. В короткий промежуток времени после запуска КА чувствителен к быстрым изменениям потока заряженных частиц из-за солнечных протонных событий. В этом случае в основном имеют место направленные взрывы и взрывы, связанные с неполадками питания. Определяются 4 периода для взрывов: несколько часов после запуска, десять суток после запуска, один год и шесть лет. Распределение количества взрывов в течение года в 11-летнем цикле солнечной активности имеет два максимума, совпадающих как с максимумом солнечных космических лучей, так и галактических космических лучей. Другим внешним фактором, вызывающим взрывы, являются столкновения с микрометеоритами естественного происхождения. Лишь совместное влияние потока заряженных частиц и столкновений с метеорным веществом объясняет имеющееся распределение количества взрывов. Эти зависимости можно объяснить электрическими воздействиями на поверхности и внутри КА. Особенно наглядно они проявляются в сезонном числе зависимости взрывов для геостационарных спутников — максимумы приходятся на весну и осень, когда данные КА попадают в земную тень и электрический потенциал их поверхности увеличивается.

Проведённые расчёты и наблюдения убедительно показывают, что взрывы космических объектов в ОКП приводят к значительному загрязнению его в больших объёмах и, соответственно, к изменению техногенного и физического состояния.

Число обломков размерами от 10 см, образовавшихся в результате столкновений и взрывов космических объектов, на низких (500–5000 км) орбитах оценивается в настоящее время

в несколько десятков тысяч. Число мелких осколков, не наблюдаемых средствами контроля ОКП, составляет по данным (*Portree, et al., 1993*) величину порядка 10^{11} .

Таким образом, столкновения и взрывы техногенных тел в ОКП являются основным фактором, увеличивающим его загрязнение.

Очищение ОКП происходит, главным образом, при воздействии плазмы солнечного ветра: в годы максимумов солнечной активности количество техногенных и естественных частиц уменьшается почти на 50% (*Касименко и др., 1995*).

Низкие орбиты также постоянно очищаются за счёт сопротивления атмосферы.

Однако, все эти естественные факторы не решают проблемы уменьшения техногенной загрязнённости ОКП в целом.

Прогноз количества ежегодно образующегося космического мусора при различных вариантах технической политики на 2000–2023 гг. показал, что даже при различных вариантах последней количество мусора будет возрастать, особенно на высотах более 1000 км (рис. 3.17 — *Назаренко, Чернявский, 1995*)

Отмеченную тенденцию необратимого роста числа объектов техногенного происхождения в ОКП подтверждают и данные долгосрочного прогноза обстановки в околоземном пространстве на сотни и тысячи лет. Поэтому начинать принимать соответствующие меры по предотвращению их роста необходимо уже в настоящее время, в том числе исследование возможности возникновения лавинообразного процесса загрязнения околоземного космического пространства.

Наиболее актуальной сейчас является проблема воздействия техногенных отходов как на состояние ОКП, так и на процессы, происходящие в земных экосистемах.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют систематические детальные исследования влияния на биосферу Земли искусственного мусора, попадающего в неё из околоземного пространства. Однако проблема уже поставлена, и такие исследования начинают разворачиваться.

Здесь можно выделить процессы загрязнения атмосферы, почвы и водного покрова планеты остатками топлива ракет-носителей, а также загрязнение атмосферы частицами окиси алюминия микронных размеров, могущее в большой степени повлиять на её прозрачность (*Jackson, Bernhard, 1997*).

К настоящему времени проведён ряд экспериментальных оценок влияния выбросов из двигательных установок ракет-носителей на атмосферу (*Горькавый, 1993; Климов и др., 2000; Jackson,*

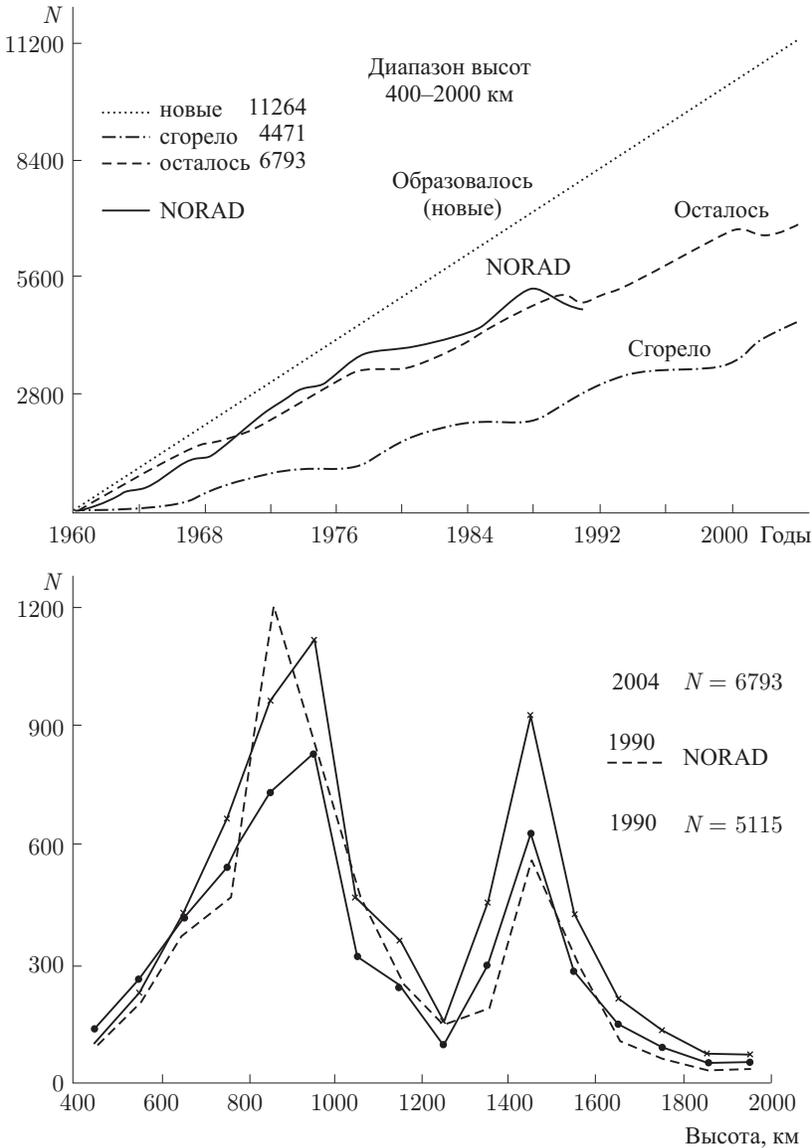


Рис. 3.17. Прогноз числа частиц техногенного мусора на низких орбитах (Назаренко, Чернявский, 1995)

Bernhard, 1998). Среди выбросов содержатся компоненты следующих химических соединений: $\text{HCl} + \text{Cl}$, NO , CO , H_2O , H_2 , Ar^+ , Al_2O_3 . В приземном слое атмосферы до высоты ≈ 1 км выбро-

сы этих веществ приводят к токсичному загрязнению облаков, выпадению кислотных дождей, изменениям погодных условий в районе старта. Однако, благодаря значительной турбулентности нижних слоёв атмосферы такие эффекты достаточно кратковременны. В стратосфере же влияние загрязнений носит значительно (до года) более длительный характер. К тому же уменьшение прозрачности атмосферы в результате попадания сюда частиц окиси алюминия, может сказаться на её тепловом балансе.

С увеличением высоты над поверхностью Земли увеличиваются и размеры зоны возмущений в ОКП. Так, при выбросах газа и плазмы (из ионных двигателей) в магнитосфере может произойти резкое изменение динамического равновесия волн и частиц, что вызывает высыпание частиц из неё и возникновение суббуриевых возмущений. Таким образом, срабатывает своеобразный спусковой механизм, инициирующий развитие крупномасштабных геофизических явлений в ОКП, то есть совершается переход магнитосферы из одного энергетического состояния в другое.

Это показывает, что уже сами запуски космических аппаратов оказывают влияние на состояние ОКП, изменение которого может вызвать обратное воздействие на биосферу.

Кроме того, такие продукты сгорания, как соединения хлора, азота и водорода, являются катализаторами реакций с участием молекул озона, и их роль в фотохимическом цикле озона велика. В мезосфере (70–90 км) основными компонентами топлива, выбрасываемыми двигателями, являются водород и вода. Здесь при самой низкой в атмосфере температуре молекулы воды конденсируются и смерзаются с образованием кристаллов. В итоге образуются облака, подобные серебристым, которые становятся самыми высокими облаками в атмосфере. В области F-ионосферы (до 400 км) продукты сгорания топлива взаимодействуют с компонентами ионосферной плазмы. В результате образуется область с пониженным содержанием электронов — ионосферная «дыра». Её возникновение сопровождается свечением, нарушениями радиосвязи, возбуждением волновых явлений разного рода. Такие эффекты продолжаются в течение нескольких часов после старта ракеты.

Распространение газовой фракции описывается в общем случае кинетическими уравнениями больцмановского типа (Шематович, 1993). После установления теплового равновесия с окружающей средой происходит перенос и диффузия газового облака под действием атмосферных процессов. При этом, наряду с динамикой, важную роль играют процессы химического взаимодей-

ствия между веществом выброса космического объекта или его ракеты-носителя и составляющими атмосферы. Причём газовая фракция является химически весьма активной по отношению к окружающим атмосферным газам. В результате как локально, так и в больших объёмах существенно изменяются свойства атмосферного газа, образуются малые химические и радиоактивные примеси, изменяется степень ионизации атмосферного газа.

В целом, перенос и диффузия определяют процесс распространения техногенных газовых примесей в атмосфере и ионосфере и во многом характеризуют экологическое воздействие и антропогенное загрязнение ОКП продуктами выбросов ракетно-космической техники.

Так, 18.04.1997 г., в верхних слоях атмосферы над Калифорнией было обнаружено облако остатков ракетного топлива. Подобное наблюдалось впервые в практике пусков ракет-носителей. Метеорологические службы, обнаружившие облако на высоте 19 км, связывают его либо с пуском 6 апреля ракеты-носителя «Союз-5» с космодрома Байконур (расценивается как более вероятный), либо с пуском 9 апреля ракеты-носителя «Молния-М» с космодрома Плесецк. Облако имело толщину 90 м и диаметр около 150 км. Визуально не наблюдалось, но приборы уверенно регистрировали наличие в нём остатков керосина. За 12 дней облако пропутешествовало 9650 км (*Rambler-science*. 2001)

Можно упомянуть целый ряд работ (*Дмитриев*, 1995; *Кричевский*, 1999 и т.д.), в которых подробно рассматриваются проблемы загрязнения природы продуктами работы ракетных двигателей, остатками конструкций ракет, превратившихся к началу XXI века в весьма актуальную проблему, связанную не только с экологическими проблемами, но и с вопросами международного права. Так, например, площадь загрязнения Алтайского края остатками ракетного топлива превысила 250 км², общий вес упавшего после запусков ракет мусора — 2 тыс. тонн, широко распространён феномен «жёлтых детей».

На рис. 3.18 представлены положения зон загрязнений на земной поверхности, образованных основными действующими космодромами мира, суммированные автором на основе анализа ряда работ (*Железняков*; *Киселёв и др.*, 2001; *Новиков и др.*, 1986; *Уманский*, 2001; *Шингарева*, 2000), а в табл. 3.5 — их координаты и азимуты, в которых производятся запуски.

Здесь можно отметить, что область выпадения остатков конструкций РН для космодрома Байконур простирается до Якутии, трасса запусков с космодромов Cape Canaveral заканчивается над Индийским океаном около островов Принс-Эдуард. Полётная

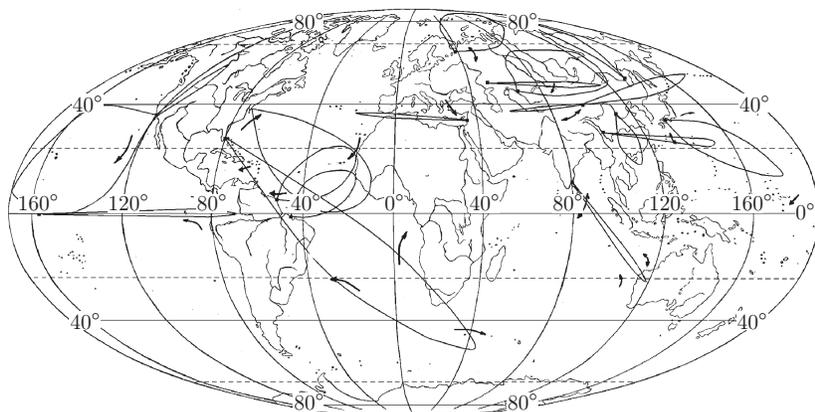


Рис. 3.18. Зоны загрязнений, создаваемые основными действующими космодромами мира. Стрелками показаны направления ветров, преобладающие в течение года в нижних слоях тропосферы

трасса базы Vandenberg имеет протяжённость около 10000 км и простирается над Тихим океаном и заканчивается у острова Кантон (острова Феникс) и близ атолла Кваджалейн (Маршалловы острова). Основным районом старта при запусках по проекту «Морской старт» является экваториальная зона в Тихом океане вблизи острова Рождества, зона падения отделяющихся частей достигает территории Южной Америки. Хотя надо признать, что последний проект является одним из самых экологичных: после отделения космического аппарата разгонный блок уходит на орбиту хранения, где из него стравливаются остатки топлива и газы.

Весьма актуальным представляется исследование заражения земной природы радиоактивными и биологическими материалами, попадающими на Землю вследствие космических экспериментов в ОКП (Рыхлова, 1995).

Уникальные результаты получены при изучении засорённости области высот 800–1000 км в NASA. В ОКП выводились космические аппараты с ядерными энергоустановками и радиоизотопными термоэлектрическими генераторами. Объекты с ядерными энергетическими устройствами на борту после окончания активного существования переводятся на такие высоты, где они уже не представляют непосредственной радиационной опасности. Сейчас в этой зоне находятся 37 российских и 1 американский объект (Дмитриев, 1995). Суммарная масса радиоактивных веществ на них — около тонны (Васильев, Шмельсов, 1995).

Таблица 3.5. Основные действующие космодромы мира и азимуты запусков

Космодром (страна)	Координаты	Азимуты запусков
Байконур (Россия)	45,6° с.ш., 63,3° в.д.	0°–90°
Плесецк (Россия)	62,7° с.ш., 40,3° в.д.	350°–90°
Свободный (Россия)	51,5° с.ш., 138,5° в.д.,	350°–10°
Капустин Яр (Россия)	48,5° с.ш., 45,8° в.д.,	≈ 90°
Palmachim (Izrael)	31,9° с.ш., 34,7° в.д.	270°–280°
Sriharikota (India)	13,79° с.ш., 80,25° в.д.	140°–160°
Kagoshima (Japan)	31,15° с.ш., 131,5° в.д.	100°–170°
Jiuquan (China)	41,1° с.ш., 100,3° в.д.	49°–50°, 270°
Taiyuan (China)	37,81° с.ш., 11,5° в.д.	180°–190°
Xichang (China)	28,1° с.ш., 102,3° в.д.	90°–110°
Alcantara (Brazil)	2,17° ю.ш., 44,23° з.д.	0°–90°
Cape Canaveral (USA)	28,4° с.ш., 80,5° з.д.	90°–140°
Vandenberg (USA)	34,6° с.ш., 120,5° з.д.	45°, 170°–270°
Wallops Island(USA)	37,8° с.ш., 75,5° з.д.	70°–140°
Kourou (France)	5,2° с.ш., 52,73° з.д.	350°–100°
Sea Launch	0° ш., 154° з.д	90°

В результате тонких исследований выявлено, что имеется большая вероятность засорения этой зоны радиоактивными отходами. Здесь наиболее вероятным является следующий процесс (Мещеряков, 1998). При выводе на орбиту захоронения из корпуса ядерного реактора выбрасывались урановые стержни. Это неизбежно приводило к попаданию значительного количества радиоактивного теплоносителя из контура реактора в околоземное пространство. Остаток в реакторе может попасть в окружающее пространство при столкновении с другими объектами или их обломками. Облако радиоактивных отходов, как показано выше, распространяется в ОКП на значительные расстояния, загрязняя большие его объёмы.

Необратимые экологические последствия техногенного загрязнения по отношению к состоянию атмосферы и ионосферы надёжно пока не выявлены. Однако не исключено, что они могут быть обнаружены. Это, в частности, касается влияния сгорающего искусственного мусора на физико-химические процессы

в верхней атмосфере (особенно над крупными промышленными центрами), процессы в озоновом слое, на погоду и процессы в нижней атмосфере. И, наконец, важны исследования нарушения короткой и ультракороткой радиосвязи в результате отражения радиоволн от слоёв мелких металлических осколков на низких орбитах.

Ряд данных указывает на тенденцию накопления компонентов искусственного происхождения в верхней атмосфере.

Увеличение количества техногенных отходов в ОКП увеличивает и число падений искусственных космических объектов и техногенных отходов на поверхность Земли (*Микуша и др., 1995; Назаренко, Чернявский, 1995; Jackson, Bernhard, 1997*).

В среднем большие куски орбитального мусора с площадью сечения более 1 м² падают на Землю раз в неделю. В 1978 г. «Космос-954» упал в северной Канаде, через год обломки орбитальной станции «Скайлэб» рассыпались над Австралией. Большой резонанс вызвали также падения ИСЗ «Космос-1686» (1991 г.), «Космос 398» (1995 г.), «China-40» (1996 г.), ОКС «Салют-7», FSW-1 и «Марс-98» с ядерным устройством на борту в 1996 г., падения последних ступеней ракет-носителей «Протон» на территорию Казахстана (1999 г.), вызвавшие загрязнение атмосферы и почвы.

Особую тревогу вызвали запуски и падения на Землю спутников с ядерными источниками энергии на борту. Однако уже известны случаи падения таких спутников на Землю, например, падение ИСЗ «Космос-954», падение ИСЗ «Космос-1402», а также неудачный запуск первого навигационного спутника США, развеявшего радиоактивные материалы над Индийским океаном (*Рыхлова, 1995*).

При падении осколков искусственных космических аппаратов на Землю может происходить ряд явлений, аналогичных результатам падений естественных тел: прямое ударное воздействие на поверхность суши и океанов; запыление атмосферы, загрязнение биосферы продуктами экспериментов в космосе и т. д.

Нами была проведена оценка последствий предстоящего падения ОКС «Мир» массой около 130 тонн и средней площадью поперечного сечения около 120 м² на Землю при различных вариантах её входа в атмосферу с использованием выражений из п. 3.2.

Она показала, что при падении ОКС «Мир» на поверхность Земли может выделиться энергия, эквивалентная энергии взрыва до 15 тонн тротила и образоваться кратер размерами порядка размеров станции, что может вызвать катастрофы локального

масштаба. При падении ОКС МИР в океан может возникнуть волна высотой до 3 м в месте падения. Это максимальное значение амплитуды волны для полной массы ОКС.

К сожалению, службами контроля спуска ОКС «Мир» не были опубликованы данные о результатах входа её фрагментов в океан. Вероятно, падение не оказало сколько-нибудь заметного влияния на его состояние.

Ещё одним фактором загрязнения ОКП (ионосферы) является наличие собственной атмосферы вокруг крупных космических аппаратов, находящихся в зоне пилотируемой космонавтики (это, главным образом, пилотируемые космические аппараты и орбитальные космические станции). Здесь в результате микротечений, газоотделения материалов, работы различных бортовых систем (например, жизнеобеспечения) образуется собственная атмосфера космических аппаратов с параметрами, существенно отличающимися от параметров окружающей среды. Отмечены (Климов и др., 2000) её заметные изменения в нейтральном и ионном составе, электромагнитных излучениях, потоках заряженных частиц. Сложное взаимодействие набегающего потока ионосферной плазмы с такой искусственной атмосферой приводит в ряде случаев к возникновению различных разрядных явлений, сопровождающихся свечением окружающей среды и поверхности самого аппарата, генерации электромагнитных излучений, ускорением заряженных частиц ионосферной плазмы.

Здесь следует ещё раз отметить, что исследования перечисленных отрицательных последствий воздействия искусственного космического мусора на биосферу Земли представляются весьма актуальными, поскольку монотонное увеличение степени загрязнения околоземного космического пространства установлено достаточно надёжно, и в ближайшие годы эта тенденция не изменится (Назаренко, Чернявский, 1995).

Основные виды воздействий компонентов околоземного космического мусора на земные экосистемы представлены как итог на рис. 3.19.

3.4. Околоземное космическое пространство как открытая энергетическая система

Околоземное космическое пространство можно рассматривать как гигантскую открытую систему, через которую проходят потоки энергии из Вселенной к Земле и в обратном направлении, а также генерирующую энергию в результате процессов, происходящих в различных её зонах.



Рис. 3.19. Виды воздействий компонентов околоземного космического мусора на земные экосистемы

Основным источником энергии, определяющим процессы на Земле и в ОКП является Солнце с температурой $T_c = 5770$ К. Сюда также относится космическое фоновое (реликтовое) излучение с температурой около 3 К, мощность которого, однако, составляет не более 0,1 % солнечного. Суммарная мощность всех видов попадающих в ОКП заряженных частиц, включая частицы солнечного ветра и галактические космические лучи ещё меньше.

Изменение солнечной постоянной (мощности солнечного излучения, приходящегося на 1 м^2 на расстоянии земной орбиты) представлено на рис. 3.20 (Frolich, Lean, 1998). Оно достаточно коррелирует с 11-летним циклом активности и обусловлено во

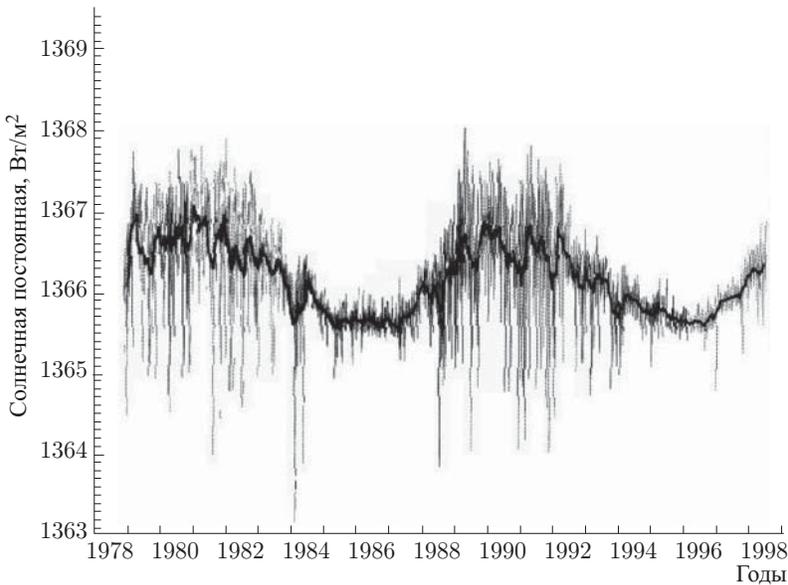


Рис. 3.20. Вариации светимости Солнца

многом прохождением пятен по диску Солнца. Величина вариаций в среднем составляет менее 0,1% от величины солнечной постоянной и сохраняется в течение достаточно большого по геологическим меркам промежутка времени.

Поток кинетической энергии солнечного ветра в окрестностях Земли составляет $0,46 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ (Пудовкин, 2000). В период максимума солнечной активности этот поток может возрасти до $2,6 \div 8 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ (Иванов-Холодный, 2000). Из них на поток электронов приходится около 40%. Однако, и эти величины

составляют лишь сотые доли процента общей светимости Солнца (рис. 3.21).

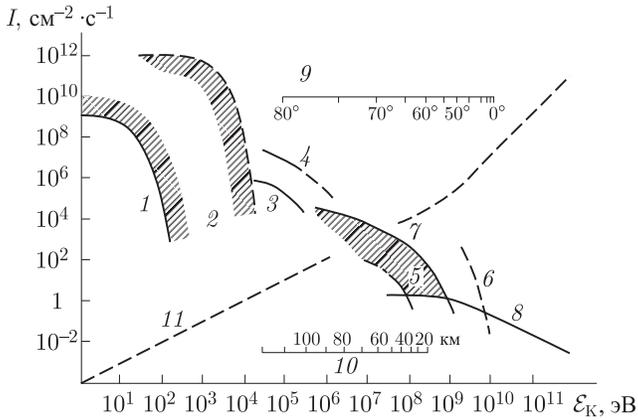


Рис. 3.21. Корпускулярные потоки в ОКП в виде интегрального энергетического спектра протонов (горизонтальная ось — кинетическая энергия протонов, вертикальная — поток протонов) (Сюняев, 1986). 1 — спокойный солнечный ветер; 2 — возмущённый солнечный ветер; 3, 4 — частицы полярных сияний; 5–7 — солнечные космические лучи; 8 — галактические космические лучи; 9 — геомагнитная широта, на которую могут проникать ионы протоны с энергией, большей заданной; 10 — шкала высот, на которые могут проникать сверху протоны с энергией, большей заданной; 11 — условная граница между плазмой и протонами, движущимися в геомагнитном поле по штермеровским орбитам

В области высот 5000–500 км над поверхностью Земли коротковолновое излучение Солнца взаимодействует с верхними слоями газовой оболочки, порождает заряженные частицы высоких энергий и вносит вклад в формирование радиационных поясов. В слоях, смежных с ОКП, выше 80 км плотность атмосферы достаточно велика, так что излучение вызывает диссоциацию и ионизацию её молекул и атомов. Таким образом поглощается практически всё излучение вплоть до дециметрового диапазона.

Потоки энергии к Земле и от неё показаны на рис. 3.22. Принято считать, что Земля поглощает энергию космических источников своей атмосферой и верхними слоями земной мантии. Здесь приведены, естественно, достаточно приблизительные оценки, поскольку данные различных авторов (Будыко, 1978; Горшков, 1995; Сватков, 1974; Эбелинг и др., 2001) различаются в среднем на 10%. Очевидно только, что баланс энергии естественного происхождения, поступающей к Земле и направленной от неё, уравновешен.

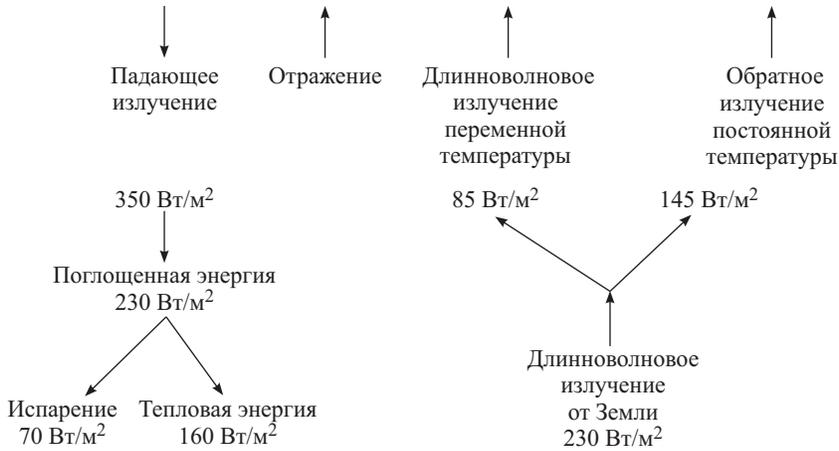


Рис. 3.22. Поток энергии, проходящей через ОКП вблизи Земли

Спектральное распределение энергии Солнца представлено на рис. 1.1 настоящей работы. Оно близко к распределению равновесного планковского излучения с цветовой температурой $T_c = 5770$ К. Средняя температура у поверхности Земли с учётом её альbedo и парникового эффекта составляет $T_0 = 288$ К ($+15^\circ\text{C}$), то есть солнечное излучение представляет собой практически чистый источник свободной энергии, который может преобразовываться в упорядоченные макроскопические движения с к.п.д. согласно второму закону термодинамики $\eta = (T_c - T_0)/T_c = 0,95$ (Горшков, 1995).

Доля солнечной энергии, отражённая от Земли и окружающей её атмосферы и нижних слоёв ОКП, определяется сферическим альbedo

$$A_{sp} = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (3.39)$$

где Φ_0 — падающий поток солнечного излучения, Φ — рассеянный поток.

Часть солнечного потока, равная $(1 - A_{cф})\Phi_0$, поглощается Землёй, нагревает её и переизлучается в инфракрасном диапазоне. Это излучение характеризуется эффективной температурой, связанной с альbedo Земли уравнением теплового баланса

$$4\sigma T_{ei}^4 = (1 - A_{sp})I + 4\varepsilon, \quad (3.40)$$

где I — солнечная постоянная.

Левая часть — уходящее солнечное излучение, правая — поглощённая с добавкой ε , характеризующей поток внутреннего тепла из недр Земли.

По данным (Будыко, 1978) в среднем на Землю после прохождения ОКП попадает поток удельной мощностью 350 Вт/м^2 . Из них 102 Вт/м^2 отражается атмосферой, поглощается атмосферой 81 Вт/м^2 , земной поверхностью — 157 Вт/м^2 . За счёт испарения воды с поверхности Земли и конденсации в атмосфере в последнюю переносится ещё 88 Вт/м^2 , и ещё 17 Вт/м^2 за счёт турбулентных потоков тепла. Поверхность Земли излучает в пространство только оставшиеся 52 Вт/м^2 . Длинноволновое излучение значительно мощнее и составляет 186 Вт/м^2 . Удельная мощность потока энергии от земного ядра к поверхности невелика: $\varepsilon = 0,2 \text{ Вт/м}^2$ (Жарков, 1983).

Спектральное распределение энергии, испускаемой Землёй, имеет достаточно сложный характер (рис. 3.23). Оно заключено между распределениями энергии абсолютно чёрного тела с тем-

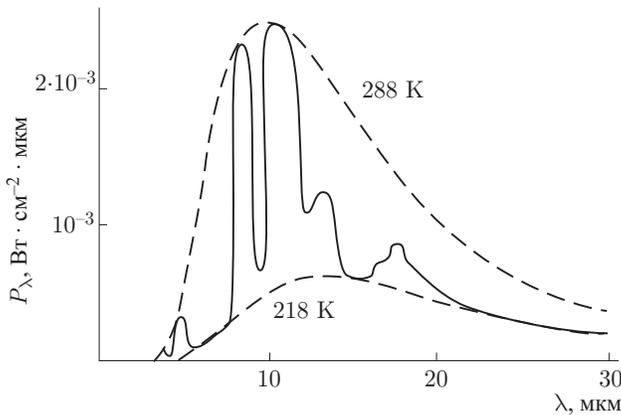


Рис. 3.23. Спектральный состав естественного излучения Земли

пературами 288 К и 218 К. Общая мощность этого длинноволнового излучения составляет 230 Вт/м^2 и уравнивает мощность излучения, попадающего к поверхности Земли от Солнца. Вид спектрального распределения длинноволнового излучения Земли обусловлен тем, что поверхность Земли испускает излучение как абсолютно чёрное тело с температурой 288 К, а в ОКП уходит та часть излучения, для которого атмосфера прозрачна. В остальных областях спектра в ОКП и далее в открытый космос

излучает стратосфера, температура которой составляет в среднем 218 К.

Интегральные характеристики потоков энергии у земной поверхности представлены в табл. 3.6 (Горшков, 1995; Климов и др., 2000; Лосев, 2001).

Таблица 3.6. Потоки энергии у земной поверхности

Виды процессов	Мощность	
	Вт	Доля, %
Солнечная радиация	$1,8 \cdot 10^{17}$	100
Поглощение атмосферой и земной поверхностью	10^{17}	69
Поглощение земной поверхностью	$8 \cdot 10^{16}$	46
Расход за испарение	$4 \cdot 10^{16}$	24
Турбулентные потоки тепла	10^{16}	7
Перенос тепла с экватора к полюсам:		
– атмосферой,	$3 \cdot 10^{15}$	3
– океаном	$2 \cdot 10^{15}$	2
Поглощение суши	$2 \cdot 10^{16}$	13
Испарение:		
– суши (эвапотранспирация)	$5 \cdot 10^{15}$	3
– растениями (транспирация)	$3 \cdot 10^{15}$	2
Диссипация ветровой энергии	$2 \cdot 10^{15}$	1
Диссипация волновой энергии	10^{15}	0,6
Фотосинтез	10^{14}	0,06
Падение всех осадков (гравитационное)	10^{14}	0,08
Гидроресурсы рек	$3 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Виды возобновимых мощностей (геотермальная, вулканов и гейзеров, приливная, лунного излучения, падающего на Землю)	$3 \cdot 10^{13}$	0,02
Антропогенное усиление парникового эффекта	10^{15}	0,6
Современное мировое энергопотребление человечества	$1,2 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{-3}$

Как видно из табл. 3.6, человечество уже потребляет энергию, величину которой можно сравнить с падающей солнечной энергией.

Перечислим кратко механизмы передачи энергии из межпланетной среды в ОКП, точнее в магнитосферу, в которой аккумулируется основная часть энергии ОКП.

Отток энергии от основания короны Солнца происходит вследствие теплопроводности, конвекции плазмы и магнитного поля, а также волн.

На Солнце генерируются магнитогидродинамические волны различного типа, но основным носителем волновой энергии в межпланетной среде являются альвеновские волны, поскольку магнитозвуковые волны в бесстолкновительной межпланетной плазме затухают.

Энергия, подводимая к магнитосфере альвеновскими волнами, составляет $Q_a = 5 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18}$ эрг/с при поперечном сечении магнитосферы $5 \cdot 10^{20}$ см² (радиус $1,3 \cdot 10^5$ км), то есть поток энергии альвеновских волн составляет максимум 6×10^{-3} эрг/с · см².

В настоящее время одной из главных проблем является изучение способов передачи энергии межпланетной среды (точнее — переходной области) внутрь магнитосферы (Ковалевский, 1976):

- 1) прямое вторжение плазмы через область дневных полярных каспов и боковую поверхность магнитопаузы, ограничивающую плазменный слой;
- 2) проникновение заряженных частиц в результате магнитного дрейфа и диффузии;
- 3) вхождение высокоэнергетичных частиц через хвост при прямом проникновении межпланетного магнитного поля;
- 4) непосредственная передача энергии электрического поля межпланетной плазмы;
- 5) передача посредством гидромагнитных механизмов, то есть вязкого взаимодействия и пересоединения магнитных силовых линий межпланетного и геомагнитного полей;
- 6) передача энергии волнами (ударными, магнитозвуковыми, альвеновскими, плазменными, электростатическими);
- 7) передача энергии при деформации магнитосферы, обуславливаемой давлением межпланетной среды (что приводит к генерации МГДВ и нагреву тепловой плазмы);
- 8) передача энергии посредством теплопроводности.

Накопленная внутри магнитосферы энергия может высвободиться в различных формах как непрерывно, так и под действием «спускового» механизма (изменение направления межпланетного магнитного и электрического полей, увеличение динамического давления межпланетной среды, неустойчивость внутри магнито-

сферы, а в XX веке и техногенные причины) и в конечном итоге диссипирует в ионосфере и атмосфере.

Эта энергия, равная для средней геомагнитной бури 10^{22} – 10^{23} эрг, диссипирует преимущественно тремя способами:

- а) столкновительным возбуждением (нагрев ионосферы), ионизацией атомов и молекул и высвечиванием (электронные и протонные полярные сияния, гидроксильное излучение и т. д.)

$$Q_{\text{с.и.в.}} = Q_{\text{с.}} + Q_{\text{и.}} + Q_{\text{в.}} = 10^{17}\text{--}10^{18} \text{ эрг/с;}$$

- б) нагревом ионосферы и атмосферы вследствие джоулевых потерь и теплопроводности — до 10^{18} эрг/с;
- в) при разбухании магнитосферы (кольцевые токи)

$$Q_{\text{к.т.}} = 10^{18}\text{--}10^{19} \text{ эрг/с;}$$

- г) энерговыделением в авроральной зоне;
- д) красной эмиссией кислорода (6300 \AA) и разогреванием верхней атмосферы;
- е) гидроксильной эмиссией как индикатором энергии, вносимой в атмосферу вторгающимися корпускулами, вызывающими диссоциацию её молекул.

В общем случае магнитосфера как основной накопитель энергии ОКП может аккумулировать энергию, не превосходящую энергию геомагнитного поля вне Земли

$$E_3 = \frac{M_3^2}{3R_3^3} = 8,37 \cdot 10^{24} \text{ эрг} = 8,37 \cdot 10^{17} \text{ Дж.}$$

Наиболее мощные магнитные бури могут достигать достаточно близких значений энергии. Так, при магнитной буре 31.03.2001 г. величина энергии, выделившейся в магнитосфере Земли, составила $\approx 5 \cdot 10^{17}$ Дж. Однако, поток энергии через поверхность магнитосферы в ОКП даже в случае, если бы эта энергия выделилась за 1 с, не превзошёл бы $2,5 \text{ Вт/м}^2$.

Величину такого же порядка имеют вызывающие эти бури потоки солнечных вспышек в районе орбиты Земли, около 0,1–0,2% светимости Солнца.

Значительно меньшие потоки дают явления магнитных пересоединений межпланетного магнитного поля с силовыми линиями геомагнитного поля — их полная мощность составляет величину $\approx 10^{12}$ Вт (Петрукович, Зелёный, 2001а).

Поток кинетической солнечного ветра на орбите Земли в двухжидкостной модели, как уже указывалось выше, весьма мал.

Естественное излучение в окрестностях Земли складывается из ряда компонентов: радиоизлучения атмосферных электрических помех, теплового радиоизлучения Земли, космического радиоизлучения, радиоизлучения Солнца и планет.

В XX в. мощность техногенного радиоизлучения Земли значительно превзошла её естественное радиоизлучение и стало самым заметным в Солнечной системе в полосе частот, больших 30 МГц (излучения на более низких частотах эффективно экранируются ионосферой).

Это оказывает определённое влияние на состояние ОКП, выводя его даже при спокойной геомагнитной обстановке из состояния неустойчивого равновесия. К примеру, в области геостационарных орбит на высоте около 40 тыс. км наблюдаются семидневные колебания электромагнитного поля планеты, связанные с недельным ритмом жизни городов (только в США работают более 20 млн радиопередатчиков) — *Дмитриев, 1995*). То есть, прогноз состояния ОКП неразрывно связан уже в настоящее время с прогнозом деятельности всего человечества.

Мировое потребление энергии, эквивалентное $12 \cdot 10^{12}$ Вт, вероятно, оказывает влияние на распределение радиации в ОКП (*Климов и др., 2000*). Однако, мощность потока энергии в ОКП, даже при её 100-процентной передаче, составляет $2,4 \cdot 10^{-2}$ Вт/м².

Однако, многие данные показывают, что вывод ОКП из состояния динамического равновесия не требует значительных потоков энергии по сравнению с общей энергией, постоянно подводимой к околоземной среде. К примеру, 10–12 мая 1999 г. в несколько раз упала концентрация и в два раза скорость протонов солнечного ветра. В результате резко отодвинулась от Земли граница магнитосферы, практически исчезли радиационные пояса. Электроны межпланетного пространства свободно достигали Земли, вызвав в северном полушарии аномально мощную магнитную бурю и полярные сияния. Вернулось ОКП к нормальному состоянию только через несколько месяцев (*Pierrazzo, 1997*). То есть естественное воздействие с энергией порядка 0,1–0,2% от величины солнечной постоянной может уже надолго вывести ОКП из состояния равновесия.

Здесь сразу следует отметить, что хотя техногенные воздействия в ОКП в настоящее время имеют мощность на два

порядка меньшую мощности естественных воздействий, их рост проходит практически по экспоненциальному закону (Горшков, 1995; Лесков, 1996; Лосев, 2001). При таком законе возрастания техногенные воздействия уже в этом веке могут превзойти естественные, что в значительной мере может сказаться на условии равновесия ОКП.

Таблица 3.7. Потоки энергии естественного и техногенного происхождения через ОКП

№	Вид воздействия	Мощность потока энергии воздействия, Вт/м ²	% солнечного
1	Солнечное излучение вариации в течение цикла активности	1367	<0,1
2	Солнечный ветер, тах	$8 \cdot 10^{-3}$	
3	Альвеновские волны	$6 \cdot 10^{-6}$	
4	Реликтовое 3 К-излучение	1,4	<0,1
5	Пересоединения межпланетного магнитного поля с силовыми линиями геомагнитного поля	$2 \cdot 10^{-3}$	
6	Магнитные бури, тах	2,5	0,2
7	Естественный поток от стратосферы (218 К)	60	4,4
8	Техногенный поток от Земли, тах	$2,4 \cdot 10^{-2}$	
9	Поток, обусловленный техногенным увеличением парникового эффекта	2	0,15

Биосфера Земли, обладая огромным количеством обратных связей, достаточно устойчива к внешним воздействиям. ОКП, обладая обратными связями, тем не менее, не может обладать такой устойчивостью. Число молекул (число ячеек памяти) в биосфере определяется как 10^{48} . Для ОКП эта величина гораздо меньше — почти на двадцать порядков. Здесь можно за недостатком данных в современной науке провести некоторые аналогии. В биологии на основе анализа данных о круговороте углерода показано, что нарушение стабилизации биосферы произошло после начала промышленной революции, когда антропогенная доля потребления продукции биосферы превысила 1%. До этого остававшаяся невозмущённой часть биосферы в течение всей её эволюции компенсировала антропогенные нарушения за счёт

действия отрицательных обратных связей. Даже такая глобальная катастрофа, как Юкатанское событие, уничтожило лишь часть крупных животных, не нарушив нормального функционирования остальной части биоты и её способности к стабилизации окружающей среды.

Околосемное космическое пространство, не обладая таким количеством отрицательных связей, значительно быстрее реагирует на техногенное загрязнение. Об этом свидетельствует заметное изменение его свойств в течение совсем небольшого периода с момента начала космической эры.

Современные техногенные воздействия на ОКП пока относительно невелики (табл. 3.7 — *Murtazov, 2003a*) и не превосходят 0,5 % от величины солнечной постоянной.

По аналогии с порогом устойчивости биосферы можно было бы определить порог устойчивости ОКП к внешним и внутренним техногенным воздействиям величиной, равной 1 % от солнечной постоянной (14 Вт/м^2 на площадке, перпендикулярной направлению на Солнце или $3,5 \text{ Вт/м}^2$ при отнесении к поверхности Земли).

Равновесие ОКП как любой физической системы характеризуется устойчивостью по любому её параметру. Возмущение какого-либо параметра приводит, как было показано выше, к возникновению компенсирующих процессов, возвращающих околосемное пространство в равновесное состояние (так называемый принцип Ле Шателье–Брауна, соблюдающийся как в физических, так в биологических и экологических системах). Однако после значительных возмущений, связанных всё более часто с техногенным воздействием, околосемное пространство может и не вернуться к первоначальному состоянию (или перейти в другое стационарное состояние) с, естественно, обратным воздействием на экосистемы. Каким будет такое воздействие? Какое общее техногенное воздействие нужно, чтобы на длительный срок вывести околосемное пространство из состояния своего достаточно неустойчивого равновесия? Какими станут новые параметры ОКП после возвращения его в стационарное состояние?

В связи со всем сказанным, задача определения предельно допустимых уровней воздействия на околосемное пространство может стать главной задачей исследований ближайшего десятилетия. Она является чрезвычайно актуальной по отношению к антропогенным воздействиям всех видов, и от её скорейшего решения зависят как дальнейшее развитие космической деятельности человечества, так и обеспечение существования современной цивилизации.

Глава 4

МОНИТОРИНГ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

4.1. Цели и задачи мониторинга околоземного пространства. Анализ современных возможностей мониторинга околоземного космического пространства

Понятие мониторинга окружающей среды как основной составляющей любой экологической экспертизы, вопросов охраны окружающей среды и методов её рационального использования весьма широко трактуется различными авторами (*Кормилицын и др.*, 1994; *Коробкин, Передельский*, 2000; *Петров*, 1997; *Протасов*, 1997; *Реймерс*, 1990; *Фёдоров, Гильманов*, 1980 и т.д.). Анализ различных подходов к этому понятию позволяет дать некоторое общее определение мониторинга окружающей среды.

Мониторинг — (лат. *monitor* — надзирающий). Наблюдение и непрерывная (квазинепрерывная) оценка состояния природной среды под влиянием антропогенных воздействий с целью рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Это определение можно положить в основу понятия мониторинга ОКП (*Муртазов*, 2001*д,е*).

Мониторинг околоземного космического пространства — наблюдения и постоянный контроль естественного и антропогенного загрязнения; выработка методов оценки физического состояния околоземного космического пространства как части природной среды. Разработка прогноза возможных последствий возрастающей антропогенной нагрузки на околоземное пространство с целью как его охраны, так и предотвращения отрицательного воздействия на земную биосферу.

Разработка и координация глобального мониторинга окружающей среды осуществляется в рамках ЮНЕП при ООН и Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Основные цели этой программы (Коробкин, Передельский, 2000):

- организация расширенной системы предупреждения об угрозе здоровью человеку;
- оценка влияния глобального загрязнения атмосферы на климат;
- оценка количества и распределения загрязнений в биологических системах, особенно в пищевых цепочках;
- оценка критических проблем, возникающих в результате сельскохозяйственной деятельности и землепользования;
- оценка реакции наземных экосистем на воздействие окружающей среды;
- оценка загрязнения океана и влияния загрязнения на морские экосистемы;
- создание системы предупреждений о стихийных бедствиях в международном масштабе.

По мнению автора данной работы, весьма необходимым является включение в разработку проекта глобального мониторинга окружающей среды пункт, связанный с мониторингом ОКП: *оценка характеристик процессов в околоземном космическом пространстве, связанных как с естественным состоянием, так и техногенными воздействиями на него, с целью прогноза дальнейшего воздействия ОКП на биосферу.*

В связи с тем, что ОКП является сложной системой, в которой происходят взаимодействия между её компонентами как под влиянием различных внутренних причин, так и в большой степени внешних воздействий, следует разделить мониторинг ОКП на мониторинг его собственно физического состояния и мониторинг естественного и техногенного загрязнения ближнего космоса.

К физическому мониторингу ОКП относится, во-первых, прогноз «космической погоды», параметрами которой являются (Климов и др., 2000):

- температура и концентрация компонент низкотемпературной плазмы (ионы, электроны и нейтральные частицы);
- магнитные и электрические поля и токи;
- энергетические спектры заряженных частиц и спектральный состав электромагнитных излучений.

В 1999 году была разработана шкала «космической погоды» — первая попытка систематического исследования всего комплекса явлений, солнечно-земных связей, потенциально опасных для земной цивилизации. Выделяются 3 категории явлений: геомагнитные бури, радиационные бури и нарушения радиосвязи. Каждая категория разделяется на 5 уровней: незначительный (1

балл); умеренный (2 балла); сильный (3 балла); очень сильный (4 балла) и экстремальный (5 баллов). Наиболее опасны экстремальные геомагнитные бури, приводящие к полному выходу из строя сетей электропитания, появлению сильных токов в трубопроводах и практически полному прекращению радиосвязи на всех частотах. Экстремальные радиационные бури приводят к опасному облучению космонавтов, экипажей и пассажиров высотных самолётов.

Далее, весьма большое значение имеет экологический низкочастотный электромагнитный мониторинг, который исследует:

- роли механизмов генерации и энергетики электромагнитных излучений в процессах передачи и трансформации энергии солнечного ветра в ионосфере и верхней атмосфере Земли;
- антропогенное электромагнитное воздействие на ОКП (излучения линий электропередач, нагрев ионосферы излучением наземных передатчиков) и обратную реакцию последнего;
- медико-биологические проблемы воздействия естественных и антропогенных электромагнитных полей;
- корреляции регистрируемых на КА излучений с экстремальными явлениями и процессами на поверхности, в атмосфере и литосфере Земли (тайфуны, землетрясения, мощные взрывы, энергетические катастрофы и т. д.).

Для количественной оценки солнечной активности, играющей основную роль в формировании «космической погоды», применяются индексы, связанные с реальными потоками электромагнитного излучения. Наиболее часто используется индекс F10.7 — величина потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (2800 МГц), хорошо соответствующий изменениям суммарной площади солнечных пятен и количеству вспышек во всех активных областях (Иванов-Холодный, 2000).

Таким образом, проблема прогноза «космической погоды» в XXI веке стала актуальной ввиду профилактики стрессовых ситуаций в работе лётчиков, космонавтов, диспетчеров, операторов, даже водителей общественного транспорта. Отделения реанимации кардиологических клиник также нуждаются в таком прогнозе.

Для примера можно привести данные о состоянии солнечной и геофизической активности (табл. 4.1), которая ежедневно распространяется *NOAA Space Environment Center Boulder, Colorado, USA*.

Техногенная засорённость ОКП достигла к началу XXI в. весьма значительных величин, что привело к созданию службы мониторинга техногенной космической обстановки: от датчиков прямого соударения до средств наблюдения наземного и космического базирования. Эта же служба позволяет следить и за естественным космическим мусором в ОКП. Так как фрагменты космического мусора дрейфуют на своих орбитах под влиянием неравномерности гравитационного поля, солнечного ветра и магнитных бурь, требуется постоянное обновление сведений о космическом мусоре и ведение постоянно корректируемого банка данных о нём. До настоящего времени такого банка, подобного банку об ИСЗ, пока не существует.

Естественно, техногенное состояние ОКП, обусловленное наличием в нём космических аппаратов и отходов космической деятельности, прямо связано с его физическим состоянием.

В нижней части ОКП на высотах 200–1000 км процессы, связанные главным образом с солнечной активностью, являются основным возмущающим фактором, влияющим на движение космических аппаратов, фрагментов техногенного и естественного мусора (*Касименко, Микиша и др., 2000*).

1. Наблюдается существенный нагрев газа верхней атмосферы на высотах 300–400 км до температуры 600–800 К при минимуме и 900–1200 К при максимуме солнечной активности. Основным источником нагрева является поглощение крайнего УФ-излучения Солнца нейтральной составляющей верхней атмосферы. В высоких широтах существенную роль играют дополнительные источники энергии магнитосферного происхождения («высыпание» заряженных частиц, электродинамическая диссипация), которые при сильных геомагнитных возмущениях могут вызвать возрастание температуры на величину до 500 К.

2. Основными видами нейтральных частиц в верхней атмосфере являются молекулы N_2 , O_2 и атомы O , N , He , H , а ионизованных — ионы N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , N^+ , H^+ , образующиеся под действием дальнего солнечного ультрафиолета (хотя на этих высотах содержание последних относительно невелико).

3. Разреженный газ верхней атмосферы испытывает сложный комплекс вариаций, определяемый в первую очередь пространственно-временными характеристиками источников энергии и системы динамических процессов в верхней атмосфере.

Важнейшими вариациями плотности в верхней атмосфере являются:

- 11-летняя, связанная с циклом солнечной активности, в течение которого плотность изменяется в среднем на ве-

NOAA SEC Report of Solar-Geophysical Activity 25 Jan 2002

:Product: Report of Solar-Geophysical Activity

:Issued: 2002 Jan 25 2210 UT

#Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,

#Space Environment Center and the U.S. Air Force.

#Joint USAF/NOAA Report of Solar and Geophysical Activity

SDF Number 025 Issued at 2200Z on 25 Jan 2002

- Ia.** Analysis of Solar Active Regions and Activity from 24/2100Z to 25/2100Z:
Solar activity was low. Region 9794 (N13W03) produced the largest flare of the past day, a C6/Sn at 25/0225 UTC.
Region 9787 (S09W21) remains the largest sunspot group on the visible disk but is not particularly complex and has not produced major activity.
New Regions 9800 (N07E63) and 9801 (S03E77) rotated into view.
- Ib.** Solar Activity Forecast: Solar activity is expected to be low to moderate. C-level activity is expected to continue and there is a small chance of an isolated M-class flare.
- IIa.** Geophysical Activity Summary 24/2100Z to 25/2100Z:
The geomagnetic field was quiet to unsettled.
- IIb.** Geophysical Activity Forecast: The geomagnetic field is expected to be quiet to unsettled.
- III.** Event Probabilities 26 Jan-28 Jan
Class M 30/30/30
Class X 01/01/01
Proton 01/01/01
PCAF green
- IV.** Penticton 10.7 cm Flux
Observed 25 Jan 235
Predicted 26 Jan-28 Jan 240/245/250
90 Day Mean 25 Jan 223
- V.** Geomagnetic A Indices
Observed Afr/Ap 24 Jan 003/004
Estimated Afr/Ap 25 Jan 006/006
Predicted Afr/Ap 26 Jan-28 Jan 008/008-008/010-008/010
- VI.** Geomagnetic Activity Probabilities 26 Jan-28 Jan
- a.** Middle Latitudes
Active 15/15/15
Minor storm 05/05/05 Major-severe storm 01/01/01
- b.** High Latitudes
Active 20/20/20
Minor storm 05/05/05
Major-severe storm 01/01/01

личину ≈ 20 на высоте 600 км (область максимальной амплитуды данной вариации:

- полугодовой эффект, при котором максимальное изменение плотности на величину ≈ 3 наблюдается на высотах $\approx 500-600$ км:

- кратковременные и нерегулярные вариации плотности, связанные с геомагнитной активностью (до ≈ 8 на высоте 600 км).

В связи с появлением в ОКП в XX веке большого количества техногенных тел (космических объектов и техногенных отходов) было введено понятие техногенной космической обстановки, мониторинг которой в общем и осуществляется службами контроля космического пространства.

Техногенная космическая обстановка — целостное, включающее в себя множество техногенных космических тел, образование, состояние которого определяется условиями нахождения этих тел в ОКП и факторами иного рода, со свойствами, не сводящимися к свойствам отдельных техногенных тел и не вытекающих из этих свойств (Пудовкин О.Л., 2000). Задачи, решаемые в процессе мониторинга техногенной космической обстановки, определяются совокупностью взаимосвязанных моделей: 1) информационными моделями; 2) моделями оценки пространственно-временного распределения техногенных космических тел; 3) моделями оценки состояния техногенной космической обстановки (рис. 4.1)

Информационные модели данных о техногенных космических телах обеспечивают решение задач оценки состояния техногенной космической обстановки. При проведении системного анализа техногенной космической обстановки техногенные космические тела характеризуются набором координатной и некоординатной информации. При анализе появления неконтролируемых техногенных космических тел в настоящее время наиболее широко применяется эмпирическое соотношение между массой взорвавшегося объекта и образовавшимися в результате обломками. Модели данных о ТК-телах, возникновение которых нельзя прогнозировать, актуализируются посредством широко применяемых в России съёмных датчиков соударений, устанавливаемых на ИСЗ и орбитальных станциях. В США для этого используются данные радара *Haystack*.

Модели оценки пространственно-временного распределения, включающие в себя также модели актуализации, подразделяются на глобальные (универсальные по области применения) и локальные, в частности, модели геостационарной области. В основе координатных моделей (Назаренко, 2001; Хуторовский, 1995) лежит детерминированный подход с определением опасных сближений контролируемых техногенных тел с контролируемыми полезными грузами, определяемых их относительной скоростью, временем появления событий, вероятностью столкновения.



Рис. 4.1. Концептуальная модель оценки состояния техногенной космической обстановки (Пудовкин, 2000)

Локальные модели геостационарной орбиты относительно свойства контролируемости ТК-тел инструментальными средствами делятся на координатные и некоординатные. Скорости относительного движения здесь не превосходят 100 м/с, и их столкновения не приводят к взрывным эффектам.

Таким образом, перечисленные модели приводят к моделям оценки состояния техногенной космической обстановки, что в общем отвечает задачам мониторинга техногенной составляющей ОКП.

По способу осуществления мониторинг ОКП как метод астрофизических исследований подразделяется на прямой и дистанционный.

К прямому мониторингу относятся все способы контроля состояния ОКП, которые можно осуществить при проведении непосредственного определения параметров околоземного пространства аппаратурой, установленной на космических объектах.

Так, например, для контроля двух типов не доходящего до поверхности Земли солнечного излучения (жёсткого УФ, рентгеновского и корпускулярного), запущены патрульные ИСЗ «КОРОНАС» (Россия), «GOES» (USA), «YONKON» (Japan), SOHO (USA). Продолжая начатые ранее измерения потоков излучения, эти спутники стали регулярно получать также изображения Солнца в рентгеновских и УФ-лучах.

Европейское космическое агентство в конце 2000 г. запустило четыре ИСЗ, образующих единую систему «Cluster», предназначенную для изучения в ОКП магнитного поля Земли, его взаимодействия с Солнцем. Система изучает структуру магнитосферы под действием солнечного ветра. Зафиксированы перемещения полярных каспов, хотя ранее считалось, что их пространственное положение достаточно стабильно. Получено первое экспериментальное доказательство существования волн в магнитопаузе (Cornilleau-Wehrlin, 2001).

Сюда же относится определение физических параметров плазмы магнитосферы и ионосферы, величин магнитного и электрического полей и т. д., а также изучение распределения частиц космического мусора техногенного и естественного происхождения при помощи датчиков соударения.

Кроме того, большое значение имеет изучение воздействий процессов в ОКП на сами космические аппараты: образование поверхностного заряда, воздействия галактических и солнечных космических лучей, сопротивление слоёв верхней атмосферы, столкновения с космическим мусором и метеорными телами, эффекты ориентации, фотонный шум, деградация поверхностей (www.sec.noaa.gov).

К дистанционному мониторингу относятся по сути все методы наблюдения ОКП, возможные в доступных с поверхности Земли диапазонах электромагнитных колебаний, представляющие оптимизированные к соответствующим условиям методы астрофизических исследований. Данные дистанционного мониторинга при сравнении с данными геофизического мониторинга состояния биосферы позволяют в какой-то степени оценивать воздействие процессов в ОКП на процессы в биосфере, прогно-

зировать экологическую ситуацию на Земле в зависимости от воздействия из космоса.

Активные методы дают возможность изучить в контролируемых условиях основные физические процессы, протекающие при антропогенных воздействиях на ОКП.

При их использовании изучается реакция околоземной среды на контролируемое возмущение, производимое путём инъекции плазмы, нейтрального газа, пучков частиц и электромагнитных излучений. Поэтому иногда эксперименты в космосе, связанные с использованием активных методов, называют контролируемыми (*Физика косм. простр.*, 1997). Это подчёркивает связь между откликом среды и начальным возмущением, параметры которого контролируются. В зависимости от степени возмущения среды активные эксперименты могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся эксперименты типа меченых атомов, которые практически не возмущают среду, а в основном трассируют процессы и явления. Эксперименты второй группы предполагают осуществление локальных дозированных возмущений среды. Классическим примером экспериментов первого типа является исследование процессов в околоземном пространстве с помощью искусственно создаваемых светящихся облаков, которые образуются в результате инъекции паров щелочных металлов: лития, натрия, бария, цезия с борта ракет и космических аппаратов. Первые эксперименты такого рода были проведены ещё в самом начале космической эры.

Подобные методы позволяют также глубже понять явления, возникающие при взаимодействии космических аппаратов с окружающей средой. В частности, с использованием активных методов можно определять преимущественные каналы антропогенных воздействий, эффективность их влияния на различные области околоземного пространства. Наконец, что весьма важно, активные эксперименты дают информацию для оценки масштабов антропогенных воздействий и их последствий, а также для установления экологических границ космических экспериментов и производственной деятельности в космосе. Понятие экологические границы используется для обозначения ограничений на такие воздействия, которые приводят к нежелательным возмущениям планетарной и космической среды или к разрушению уникальных космических объектов.

Следует отметить, что проблема определения экологических границ человеческой деятельности в околоземном пространстве весьма актуальна (*Физика косм. простр.*, 1997).

Возможности мониторинга ОКП весьма ограничены как пропусканием земной атмосферы, так и пропусканием отдельных слоёв ионосферы, магнитосферы, которое может изменяться в зависимости от их физического состояния.

На рис. 4.2 показаны окна прозрачности атмосферы и ионосферы, наличие которых определяет основные требования к ме-

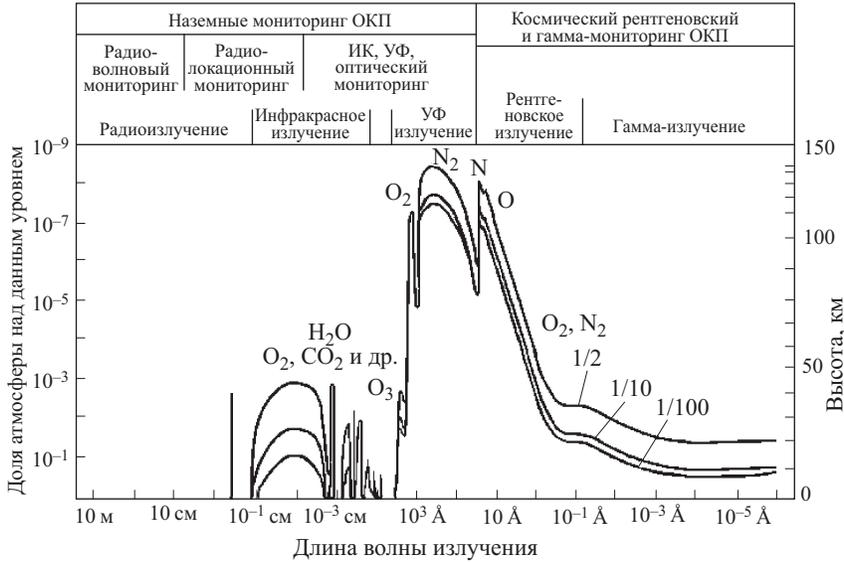


Рис. 4.2. Области пропускания излучения атмосферой и ионосферой Земли и виды мониторинга ОКП. Приведены кривые высот, до которых доходит соответствующая доля падающего в ОКП излучения

тодам исследований ОКП и организации таких исследований на земной поверхности.

Земная атмосфера почти полностью прозрачна для падающего электромагнитного излучения лишь в двух сравнительно узких окнах: оптическом — от 300 нм до 1,2–2 мкм (ИК-область до 8 мкм состоит из ряда узких полос пропускания) и в радиодиапазоне — для волн длиной от 1 мм до 15–30 м.

Непрозрачность атмосферы для всех других волн определяется поглощением и рассеянием излучения на молекулах и атомах, а также отражением радиоволн от электронов ионосферы и магнитосферы.

В УФ-области спектра излучение поглощается в основном слоем озона с максимумом $3 \cdot 10^{12}$ молекул/см³ на высотах 25–27 км.

В интервале 180–100 нм поглощение определяется процессами ионизации и диссоциации кислорода, содержание которого уменьшается с высотой и становится исчезающе малым на высотах свыше 150 км.

В области короче 100 нм поглощение связано с процессами ионизации молекулярного азота и атомарного кислорода. Уменьшение их концентрации с высотой приводит к тому, что выше 150 км атмосфера становится полностью прозрачной во всём УФ-диапазоне.

В рентгеновском и гамма диапазоне поглощение зависит от количества вещества, расположенного выше данного уровня атмосферы. В связи с этим, начиная с 30–40 км атмосфера становится практически прозрачной для фотонов с энергией, превышающей 20 кВ (то есть для длин волн короче 0,5 Å). До поверхности Земли первичные космические лучи и гамма-излучение не доходят.

В ближнем ИК-диапазоне (короче 5,5 мкм) имеется несколько окон прозрачности и зависимость пропускания атмосферы от длины волны имеет весьма сложный вид. В дальнем ИК-диапазоне расположено лишь два окна прозрачности 8–13,5 мкм и 16–26 мкм. В длинноволновой части первого окна расположены крылья полосы поглощения молекулы CO_2 с центром около 15 мкм. В этой полосе прозрачность достигает 50–80%. В области 9,3–10 мкм расположена слабая полоса поглощения озона. Поглощение во втором окне определяется молекулами CO_2 и H_2O .

В области субмиллиметровых волн поглощение определяется молекулами H_2O , CO_2 и O_2 .

В области миллиметровых длин волн ослабление падающего излучения зависит от влажности атмосферы и определяется полосами поглощения водяного пара и молекулярного кислорода.

В декаметровой области радиодиапазона непрозрачность атмосферы определяется отражением радиоволн от ионосферы и зависит от её состояния и состояния нижних слоёв магнитосферы.

Таким образом, выбор средств мониторинга ОКП определяется пропусканием атмосферой и ионосферой Земли падающего на неё электромагнитного и корпускулярного излучения.

Это позволяет разделить средства мониторинга ОКП на наземные, использующие все виды астрофизических приборов для регистрации излучений, и космические, в которых такие приборы, наряду с датчиками соударений, размещаются на искусственных космических объектах.

К наземным средствам мониторинга относятся радиолокационные, лазерные и оптические устройства, позволяющие вести наблюдения вплоть до геостационарных орбит (рис. 4.3) (Логинов, Пирогова, 2000).

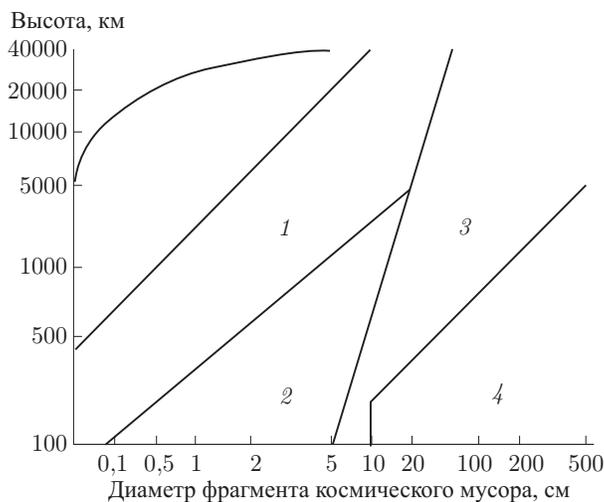


Рис. 4.3. Возможности существующих наземных радиолокационных, оптических и лазерных средств мониторинга загрязнённости ОКП

Наземные радиолокационные станции (4), работающие в диапазоне от миллиметрового до метрового, осуществляют в настоящее время непрерывный обзор ОКП. Следует отметить, что именно планетные радиолокаторы позволили измерить на низких орбитах концентрацию и распределение частиц с размерами, большими 2 мм (Goldstein, 1995). Постоянный контроль таких частиц космического мусора на низких орбитах осуществляется, главным образом, с помощью РЛС «Haystack» (США) и «Fgan» (Германия) (Козлов, 1997; Мешков, 2001).

К сожалению, Россия не обладает собственными радиотехническими средствами для обнаружения малоразмерных космических объектов, вследствие чего пока не представляется возможным организовать непрерывный и достоверный мониторинг ОКП в различных целях.

В связи с этим большое значение для нашей страны имеет разрабатываемый ОКБ МЭИ комплекс радиолокационного мониторинга ОКП (Мешков, 2001). Базой комплекса «Кобальт-РЛС» являются радиотелескопы ТНА-1500, размещённые на подмосковном пункте «Медвежья Озёра» и в г. Калязин (Тверская обл.),

Таблица 4.2. Возможности современных систем РЛС

Параметры системы	Система РЛС				
	Аресибо	Голдстоун	Евпатория	Хайстек	Кобальт РЛС
Рабочая длина волны, см	12,6	3,5	6	3	6
Мощность, кВт	1000	480	150	16	5
Площадь передающей антенны, м ²	30360	2560	2600	700	2000
Площадь приёмной антенны, м ²	30360	2560	2Х2000	700	2000
Шумовая температура приёмной системы, К	30	20	50	25	50
Минимальный размер регистрируемого объекта на низкой орбите, мм	1,8	0,8	1,7	1,4	5
Минимальный размер регистрируемого объекта на геостационарной орбите, мм	20	8	10	16	30

а также передатчик С-диапазона мощностью 3,9 кВт в непрерывном режиме.

К перспективным средствам получения некоординатной информации о телах различного происхождения в ОКП является радар некогерентного рассеяния ИСЗФ СО РАН (Иркутск), являющийся одним из главных геофизических инструментов России по контролю физического состояния ионосферы. Режим частотного сканирования и веерная диаграмма направленности, высокий потенциал позволяют радару осуществлять одновременно с определением параметров ионосферы измерение некоординатной информации о телах в ОКП (*Заворин и др., 2001*).

Одним из основных средств контроля ОКП остаётся российско-украинская радиолокационная система, состоящая из 70-метровой антенны и передатчика 6-сантиметрового диапазона со средней мощностью 150 кВт в Евпатории и двух 64-метровых антенн ОКБ МЭИ, которая и обеспечивает основную массу исследований в этой области.

Здесь следует отметить, что разработанные в настоящее время двухпозиционные радиолокационные системы и высокопотен-

циальные РЛС сантиметрового диапазона (1) могут быть использованы для регистрации космического мусора размером от нескольких мм до нескольких см в диапазоне расстояний до геостационарной орбиты.

Наземные лазерные локационные средства (2) способны с высоким разрешением обнаруживать и распознавать космические объекты размерами от нескольких мм на низких орбитах до $\approx 5\text{--}10$ см на орбитах высотой до 40000 км.

Основная задача лазерных локационных средств состоит в высокой точности определения расстояния до объекта в ОКП. Это весьма важно, когда объект движется вдоль луча зрения, то есть в случае когда угловые измерения вообще не дают информации для определения его положения (падающий спутник или фрагмент космического мусора, опасный для Земли астероид). Ряд таких лазерных локаторов, совмещённых с оптическими средствами наведения, работает во всём мире и даёт точность определения расстояния в ОКП до 1 см (*Выгон и др.*, 2000; *Ардашев и др.*, 1998).

В настоящее время Российская лазерная сеть включает в себя (*Выгон и др.*, 2000): станцию в районе Комсомольска-на-Амуре (поддержание каталога космических объектов и космического мусора; станцию «Космотэн» на Северном Кавказе (координатные измерения, а также фотометрические наблюдения с целью распознавания ИСЗ и космического мусора, система адаптивной оптики); станцию в г. Щёлково Московской области (определение дальности объектов до расстояний 40000 км с погрешностью меньше 1 см; совместную с Узбекистаном станцию на г. Майданак.

Современный лазерный локатор может проводить локацию даже не имеющих уголковых отражателей объектов в ОКП при условии достаточной точности наведения на них. То есть оптический телескоп, который может дать такую точность, должен в перспективе иметь оптическую систему, позволяющую использовать его для определения дальности до обнаруживаемых объектов методом лазерной локации.

Однако, ввиду отсутствия статистической информации об отражательных свойствах поверхностей космического мусора в диапазоне частот излучения лазерных дальномеров они не используются для непрерывного мониторинга ОКП.

Одним из основных средств мониторинга ОКП являются оптические наблюдения (3), позволяющие обнаруживать, сопровождать, распознавать космические тела размерами от 5 см на низких орбитах до 1 м на геостационарных орбитах. Единствен-

ным недостатком оптических систем является их прямая зависимость от условий наблюдения (состояния атмосферы, яркости фона неба и др.), что в значительной степени стимулирует создание оптических систем мониторинга ОКП космического базирования (Рыхлова, 1998).

Следует отметить, что информация, получаемая средствами оптико-лазерных систем, не конкурирует с данными радиолокационного мониторинга. Эти два средства мониторинга ОКП дополняют друг друга.

Сопоставление зон действия радиолокаторов и оптических средств мониторинга на рис. 4.3 показывает (Багров, 1995; Логинов, Пирогова, 2000), что допустимо как расширение зоны действия РЛС в область высоких орбит, так и применение оптических телескопов с большой апертурой для мониторинга низких орбит. Однако, повышение проникающей силы оптических инструментов до уровня, достаточного для изучения пылевой составляющей, технически осуществимо, тогда как повышение эффективности РЛС ограничено дифракцией радиоволн на частицах размером порядка длины волны локатора.

К основным методам оптического мониторинга относятся методы астрометрии и небесной механики, предоставляющие данные для определения орбит, многоцветная фотометрия, спектральный и поляриметрический методы (некоординатная информация), необходимые для распознавания объектов. Однако, ввиду специфики оптических наблюдений объектов в ОКП, наибольшее развитие получила, главным образом, их *BVR*-фотометрия, оперативно осуществляемая с использованием ПЗС-приёмников.

Все эти методы образовали новую науку, занимающуюся мониторингом ОКП — околоземную астрономию (Багров, 2001).

В настоящее время накоплена значительная информация об отражательных свойствах в оптическом диапазоне как материалов поверхностей искусственных космических объектов, из которых образуется техногенный космический мусор, так и поверхностей естественного космического мусора (Муртазов, 2000).

Разработана классификация оптических свойств поверхностей техногенных отходов в сравнении с оптическими свойствами естественного космического мусора, позволяющая проводить идентификацию техногенных отходов, используя зависимость «альбедо в видимой области a_v — показатель цвета (B–V)» (Муртазов, 1994, 2000). Здесь V — видимый блеск объекта в визуальной ($\lambda_{\max} = 550$ нм), B — в синей ($\lambda_{\max} = 440$ нм) областях спектра.

Характерно, что применительно к космическому мусору и аварийным космическим аппаратам, располагающимся на орбитах выше 3000–5000 км и, особенно, геостационарной, оптическая информация практически становится единственно доступной для целей мониторинга. Следует отметить, что современные методы формирования изображений с компенсацией турбулентности атмосферы уже дают возможность получать прямые детальные изображения космических объектов в видимой части спектра, а ИК-наблюдения резко повысили информативность, необходимую для распознавания объектов.

К средствам оптического мониторинга ОКП можно в принципе отнести любой телескоп, с помощью которого можно обнаружить объект, произвести измерения его орбиты и оптических характеристик.

Такими средствами, занимающимися поиском опасных астероидов ещё задолго до попадания последних в ОКП, являются: Паломарская служба инспектирования астероидно-кометных тел, Паломарская служба инспектирования астероидов, пересекающих орбиты планет, пункт поиска опасных астероидов на обсерватории Китт-Пик *Spacewatch*, англо-австралийская служба инспектирования опасных астероидов. В России и странах СНГ такими обсерваториями являются Крымская астрофизическая обсерватория, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (Северный Кавказ), обсерватория астрофизического института Казахской АН. Эпизодическими исследованиями в этой области занимаются практически все университетские обсерватории России.

Основную роль в открытиях астероидов играет в настоящее время проект Массачусетского технологического института LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research), по которому с 1998 г. ведутся ПЗС-наблюдения астероидов и объектов в ОКП.

Следует повториться, что из 1500–2000 опасных для Земли астероидов указанными службами к 2002 г. открыты уже около 600 объектов (www.nasa.gov, 2002), рис. 4.4.

Исследования объектов на низких орбитах при помощи крупных телескопов, имеющих параллактические и азимутальные монтировки, ввиду невозможности отслеживания ими быстро движущихся по небесной сфере объектов, не проводятся. Таким образом, при исследовании техногенного мусора в ОКП применяются главным образом телескопы на монтировках, специально разработанных для наблюдений ИСЗ. Исключение составляют наблюдения объектов на геостационарных орбитах.

Можно привести ряд результатов, полученных в последние годы при исследованиях техногенных объектов в ОКП (*Выгон и др.*, 2000):

— проведены фотометрические наблюдения нескольких десятков объектов и фрагментов на высокой и геостационарной орбите;

— посредством фотометрии в инфракрасном диапазоне впервые была измерена температура радиатора и по ней установлено состояние ядерной энергетической установки аварийного КА «Космос-1900», чем была показана возможность дистанционной диагностики состояния энергетических установок космических аппаратов;

— впервые в ИК-диапазоне (8,5–11,9 мкм) зарегистрировано излучение ОКС «Мир» и ИСЗ ERS-2, «Ресурс» и «Макрос» при их заходе в тень Земли и выходе оттуда, что даёт возможность сбора дополнительной информации для распознавания КА и круглосуточного их обнаружения;

— с помощью макета 28-элементной адаптивной оптической системы на г. Майданак достигнуто предельное (0,15") разрешение изображений звёзд и начаты работы по формированию изображений КА с компенсацией турбулентности атмосферы, причём в ходе этих работ получены прямые изображения комплекса «Мир-Атлантис».

Авторы отмечают, что для успешного продолжения работ по оптическому мониторингу техногенных объектов в ОКП необходимо создание каталога их отражательных (и излучательных) характеристик.

Общая картина исследований техногенного состояния ОКП представлена на рис. 4.5 по данным (*Багров, 1995; Логинов, Пирогова, 2000*). Глубина проводимых исследований разбита на пять уровней, от эпизодических наблюдений до полного мониторинга всех техногенных и естественных объектов в ОКП.

Следует отметить, что полного мониторинга не достигает ни один из методов исследования естественного и техногенного загрязнения ОКП.

Близким к четвёртому уровню, то есть случаю достаточно систематическим исследованиям, близки координатные измерения параметров орбит объектов в геостационарной зоне оптическими методами, исследование фотометрических параметров искусственных космических объектов и их обломков.

Периодическими исследованиями (соответствующими третьему уровню) являются радиолокационные измерения параметров орбит искусственных объектов и астероидов в ОКП, измерения

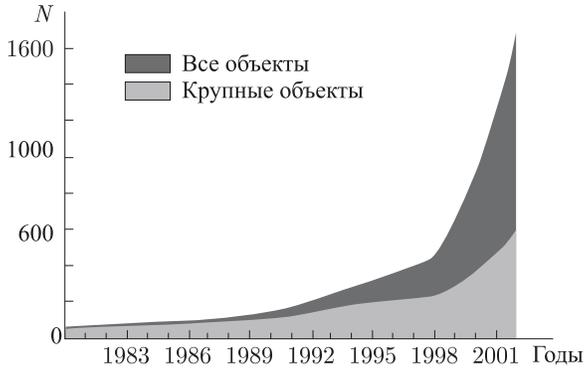


Рис. 4.4. Динамика открытия опасных для Земли астероидов (крупные — объекты диаметром более 1 км) по сравнению с общей численностью астероидов, пересекающих орбиту Земли (NASA)

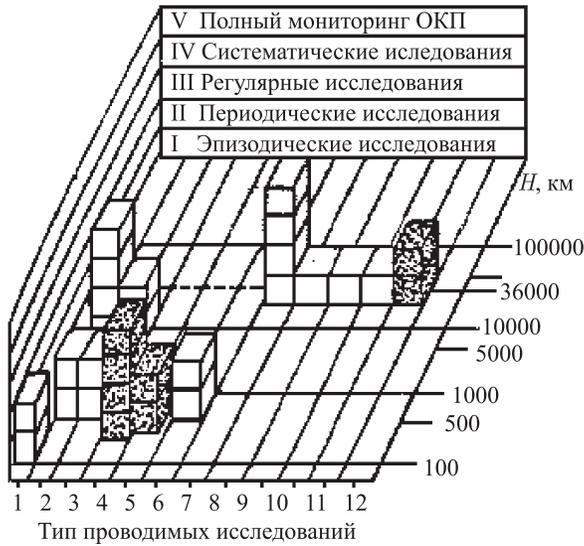


Рис. 4.5. Уровень исследований техногенного состояния ОКП с помощью наземных средств: 1 — статистические методы; 2 — координатные измерения параметров движения; 3 — координатные измерения параметров вращения; 4 — радиолокационные измерения параметров орбит в метровом и дециметровом диапазоне; 5 — радиолокационные исследования в сантиметровом и миллиметровом диапазоне; 6 — фотометрические методы; 7 — спектральные методы; 8 — поляризационные методы; 9 — базисные фотометрические исследования; 10 — базисная спектрометрия; 11 — измерения с помощью двухпозиционных РЛС со сверхдлинными базами в международной интерферометрической сети; 12 — базисная поляриметрия

положения объектов в ОКП при радиолокации в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

Таким образом, возможности современных наземных оптико-электронных и радиолокационных средств исследования ОКП используются не более чем на 40% и глубина исследований не достигла самого высокого уровня — полного мониторинга всех техногенных и естественных объектов в ОКП.

Исходя из этого, можно предположить, что достаточно высокие потенциальные возможности оптико-электронных систем для наблюдения объектов в ОКП не означают, что их использование должно идти до исчерпания технически возможных пределов. Исследования пылевой составляющей вещества в ОКП весьма эффективны при изучении их воздействия на специальные мишени и датчики или характера эрозии поверхностей возвращаемых аппаратов. Поэтому реальным пределом геометрических размеров изучаемых дистанционными средствами объектов будет тот, который соответствует частицам, способным разрушить мишень или вызвать разрушение работающего космического аппарата. Исходя из оценки баллистического эффекта от соударения с частицей на скорости 10 км/с, этому пределу соответствует характерный размер 0,1 см.

Внеатмосферный мониторинг техногенного состояния ОКП только ещё начинает развиваться. Внеатмосферные телескопы значительно выигрывают в чувствительности по сравнению с наземными, особенно в ИК-области спектра, вследствие поглощения и эмиссии этого излучения парами воды и молекулами CO₂ атмосферы. Кроме того, при применении космических средств обнаружение ранее неизвестных фрагментов космического мусора позволяет (*Емельянов и др., 2001*):

- уменьшить дальность наблюдения и, следовательно, обнаруживать фрагменты малого размера;
- проводить контроль параметров движения техногенного мусора в любое время суток, обеспечивая непрерывность мониторинга;
- обеспечивать в связи с этим решение задачи с помощью одного космического аппарата.

В связи с этим весьма интересен проект геостационарного радиационно-охлаждаемого телескопа (*Абросимов и др., 2000*) на ГИСЗ «Электро» с целью мониторинга техногенного загрязнения геостационарных орбит. Этот проект позволит России сделать приоритетный вклад в решение проблемы создания системы защиты Земли.

В рамках программы развёртывания российского сегмента Международной космической станции было предложено провести эксперимент НОРТ — наблюдение околоземных объектов разнесёнными телескопами. Одна из задач эксперимента — обеспечение безопасности полёта МКС и контроль за техногенным и естественным мусором в районе его орбиты. За каждый виток вокруг Земли телескопы НОРТ будут осматривать более 20–25 % небесной сферы, поэтому приоритет получаемых данных достаточно высок (*Артамонов и др.*, 2000).

Подобные эксперименты, имеющие характер постоянного мониторинга ОКП, в мировой практике ранее не выполнялись из космоса.

Задача мониторинга космического мусора с размерами, меньшими 0,1–1 см, решают системы контактной регистрации ударов на основе специальных датчиков. Функционирование таких датчиков основывается, по крайней мере, на четырёх физических явлениях (*Логинов, Пирогова*, 2000). Это механическое замыкание двух расположенных один над другим электродов из металлической фольги, разделённых тонкой диэлектрической прокладкой, резкое увеличение электропроводности диэлектриков под действием развивающихся при ударе высоких давлений, пьезоэффект и быстрая деполяризация электрически поляризованных сред. Из этих явлений наиболее продуктивными являются два последних, так как они позволяют создать плёночные датчики генераторного типа, в которых электрический сигнал несёт информацию о параметрах удара. Датчики на основе пьезоконпозиционных материалов способны реагировать на удар частиц размерами от долей миллиметра до сантиметра при скоростях соударения от нескольких десятков метров в секунду. Подобные датчики в нашей стране устанавливались на ИСЗ и орбитальных станциях «Салют» и «Мир», американских спутниках (*Смирнов и др.*, 2001). Весьма эффективно с 1996 г. работает прибор GORID (Geostationary Impact Detector) Европейского космического агентства на Российском геостационарном спутнике «Экспресс-2» (*Микиша, Рыхлова, Смирнов*, 2001).

При изучении воздействия космического мусора на объекты в ОКП показано, что существует принципиальная возможность использования плоских СБ для измерения параметров частиц космического мусора (*Бургасов, Надирадзе*, 2002). В соответствии с проведёнными расчётами, СБ скачкообразно и необратимо теряют от 0,1 до 0,5 % электрической мощности при ударах частиц, имеющих скорости выше 6–7 км/с и размеры $d_k > 0,03\text{--}0,04$ см. Потоки таких частиц на низких и средних

орбитах достигают уровня $1 \div 2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что, при площади батарей $S = 50 \text{ м}^2$, позволяет проводить измерения плотности потока частиц с точностью не хуже 30 % в течение 1/4 года.

Таким образом, к началу XXI века сформировалась система мониторинга, позволяющая оценивать как физическое состояние ОКП, так и загрязнённость его естественными и техногенными отходами. Вместе с тем, можно отметить, что в этой области остаётся ещё масса проблем, требующих решения и на принципиальном, и на практическом уровне.

На основании анализа технических возможностей различных средств контроля техногенного состояния ОКП выработана общая структурная схема осуществления техногенного мониторинга ОКП на современном уровне (рис. 4.6) (Логинов, Пирогова, 2000). Основными источниками информации о космических объектах, техногенном и естественном мусоре в ОКП, их отражательно-излучательных характеристиках являются радиолокационные, оптические, инфракрасные и лазерные средства наземного и космического базирования, а также датчики прямого соударения. Результаты исследований накапливаются и систематизируются в автоматизированном банке данных о техногенном состоянии ОКП. В качестве базовой информации используются также результаты моделирования состояния ближнего космоса и процессов в нём.

4.2. Разработка метода физического моделирования оптических характеристик космических объектов как основы для функционирования систем оптического мониторинга околоземного космического пространства

Знание оптических свойств поверхностей как космических объектов, так и естественного и техногенного мусора весьма необходимо для создания систем распознавания искусственных и естественных (астероидов, метеороидов) объектов в ОКП по данным их оптических наблюдений.

Автором настоящей работы был разработан метод физического моделирования для получения спектральных и фотометрических характеристик космических поверхностей для дальнейшего использования в различных экспертных системах оптического мониторинга ОКП (Курьшев, Муртазов, Верецагин, 1985; Курьшев, Муртазов, 1987).

Подобный метод время от времени применялся для моделирования кривых блеска поверхностей небесных тел с целью срав-

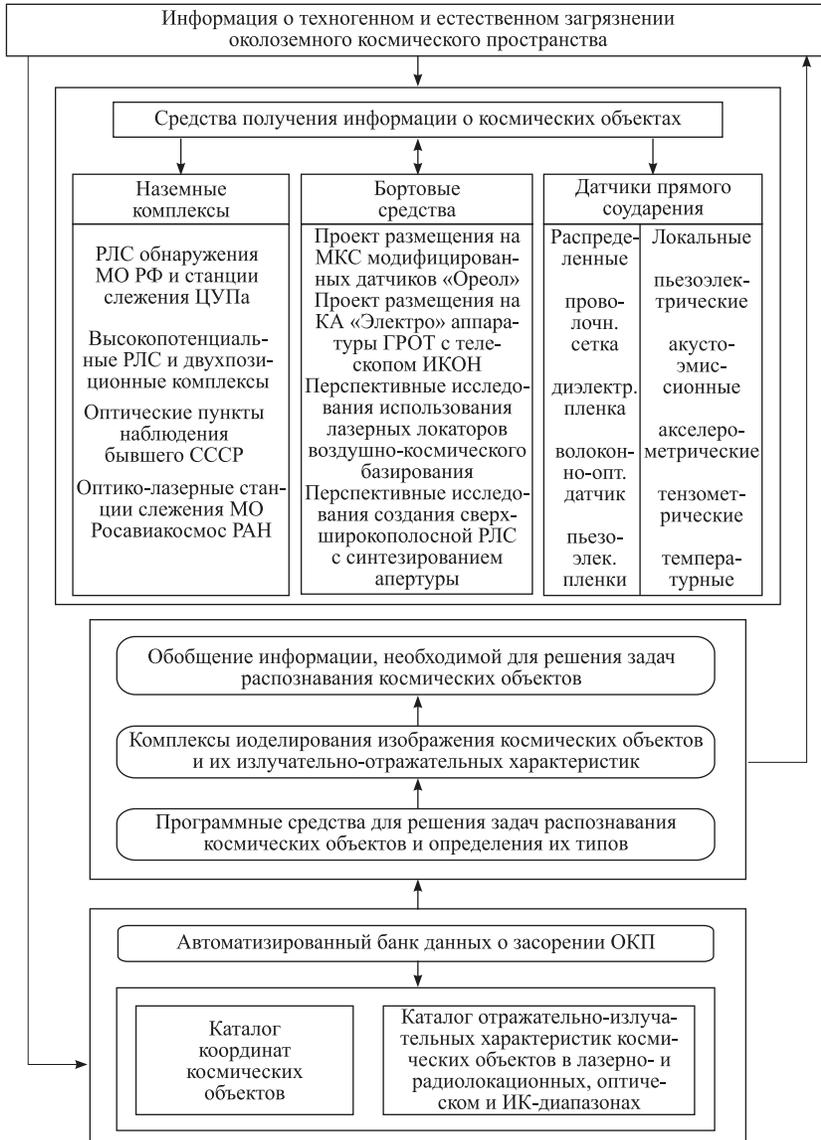


Рис. 4.6. Схема организации мониторинга техногенной обстановки в ОКП

нения его результатов с результатами фотометрии тел Солнечной системы, лишённых атмосферы, (Антипова-Каратаева и др., 1976; Бугаенко и др., 1971; Matthews, 1971; Oetking, 1966).

К середине 80-х гг. XX в. сложилась ситуация, когда этот метод в различных его вариациях был применён для помощи в решении обратной задачи фотометрии естественных и техногенных космических объектов целым рядом организаций и авторов. Следует отметить, что первые статьи по физическому моделированию фотометрических свойств безатмосферных небесных тел и искусственных космических объектов автора настоящей работы и (Barucci, Fulchignoni, 1984, 1985) были опубликованы практически одновременно и содержали одинаковые принципиальные требования к проведению экспериментов и техническим параметрам аппаратуры.

Проводимые эксперименты подразделяются на два типа: эксперименты, в которых измеряется яркость поверхности, и эксперименты по измерению световых потоков, рассеянных моделями объектов. К первому типу относится моделирование фотометрических и спектральных свойств поверхности Луны, планет, покрытий ИСЗ и элементов техногенного мусора, ко второму — моделирование кривых блеска астероидов и искусственных космических объектов.

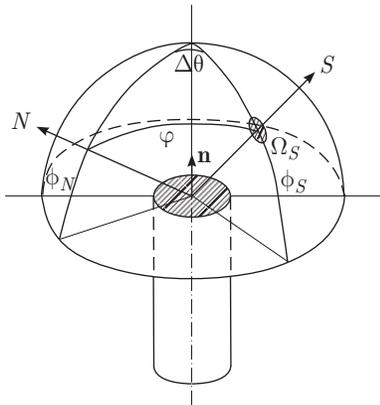


Рис. 4.7. Спутникоцентрическая система координат, использовавшаяся при проведении экспериментов

Общая схема проведения экспериментов по физическому моделированию оптических свойств астрономических объектов соответствует реальным условиям их наблюдений: объект освещается параллельным потоком излучения и рассеивает его; наблюдатель с помощью

какого-либо приёмника излучения регистрирует и измеряет рассеянный в его направлении поток. Направление рассеяния здесь определяется фазовым углом объекта и ориентацией его относительно наблюдателя и Солнца (например, углами $\Delta\theta$, ϕ_1 , ϕ_2 в системе координат объекта (рис. 4.7)).

Таким образом, при разработке аппаратуры для моделирования оптических характеристик искусственных космических объектов и их поверхностей потребовался учёт как условий освещения их Солнцем, так и условий видимости с Земли.

Требования к аппаратуре для физического моделирования с учётом таких условий впервые были сформулированы автором в следующем виде:

- конечность видимого с объекта, находящегося в ОКП, радиуса солнечного диска (0,0093 рад с расстояния 1 а. е.);
- параллельность падающих на космическую поверхность лучей ввиду достаточной удалённости Солнца;
- максимум излучения, освещающего объект, приходится на жёлто-зелёную область спектра с $\lambda_m = 475$ нм и наблюдается при $\lambda_m = 555$ нм с поверхности Земли;
- изображение любого астрономического объекта в астрономическом инструменте точечное. Для случая близкого и крупного объекта (например, МКС) в результаты измерений следует вводить соответствующие редукции.

Источником параллельного пучка излучения в лабораторных условиях для имитации Солнца служит коллиматор со стабилизированным для фотометрических целей источником света и близкому к солнечному спектральному распределению энергии излучения.

Все известные эксперименты по физическому моделированию проводились в интегральном свете в визуальной области спектра (лампа накаливания с $\lambda_m = 596$ нм (Бугаенко и др., 1971), ксеноновая дуговая лампа (Oetking, 1966)).

Приёмник излучения — любое фотометрическое устройство. Естественно, для этих целей наилучшие характеристики имеет звёздный электрофотометр с усилителем, работающим в достаточно большом динамическом диапазоне (с линейностью выходной характеристики $U = f(\Phi)$ в широком интервале измеряемого светового потока Φ) и большим коэффициентом усиления (Matsews, 1971).

При моделировании кривых блеска астероидов и ИСЗ возникает вопрос о виде изображения модели в поле зрения фотометра. При реальных наблюдениях изображения этих объектов являются точечными. В работах (Lanczi, 1966, 1967) для выполнения этого условия цилиндрическая модель ИСЗ, покрытая напылённой в вакууме MgO, наблюдалась с большого расстояния в телескоп. В Ужгородской лаборатории космических исследований наблюдения модели «Мидас-7» производились в фотометр, служащий для реальных наблюдений с расстояния в несколько километров (Михайлец, 1982). Поскольку интенсивность подсветки, размеры и покрытие этой модели подбирались с расчётом обеспечения идентичности диапазонов работы аппаратуры для случая наблюдения самого ИСЗ «Мидас-7», максимальный блеск

модели соответствовал максимальному блеску объекта. В то же время, в работах (Кошкин, 1988; Matthews, 1971) наблюдения моделей астероидов проводились с малых (≈ 1 м) расстояний с учётом поправок за неточность их изображений.

Нами при проведении исследований в результаты измерений потоков от моделей и поверхностей вводились редукции за неточность их изображений в полевой диафрагме приёмного устройства.

На Станции наблюдений ИСЗ Рязанского государственного педагогического университета автором в соответствии с разработанными требованиями создана методика исследований и создана комплексная установка для проведения экспериментов по физическому моделированию оптических характеристик объектов на геостационарных орбитах, астероидов, планет и их спутников, лишённых атмосферы, и их поверхностей (табл. 4.3 — *Курышев, Муртазов, Верецагин, 1985; Курышев, Муртазов, 1987*).

Из законов рассеяния излучения диффузными поверхностями известно, что поток, попадающий в приёмник излучения, пропорционален яркости поверхности в наблюдаемой площадке. Для случая, реализованного в наших измерениях в системе координат рис. 4.7, это выразится

$$d\Phi(\lambda) = b(\lambda) \sin \phi_N d\omega dS, \quad (4.1)$$

где $b(\lambda)$ и dS — яркость и площадь освещённой площадки, $d\omega$ — телесный угол объектива приёмного устройства, под которым он виден с образца поверхности.

Если теперь регистрируется поток $d\Phi_0$ от какого-либо ортотропного (рассеивающего по закону Ламберта) стандартного образца плоской поверхности, поставленной в такие же условия видимости, то

$$\Phi_0(\lambda) = b_0(\lambda) \sin \phi_N d\omega dS, \quad (4.2)$$

откуда

$$b(\lambda) = b_0(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\Phi_0(\lambda)}. \quad (4.3)$$

Относительно Солнца спектральная яркость поверхности для этих случаев определялась по формуле

$$B_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_\lambda E_\lambda^0 d\lambda, \quad (4.4)$$

Таблица 4.3. Основные конструктивные параметры установки для физического моделирования оптических характеристик астрономических объектов

Осветительное устройство

Объектив:	
диаметр, мм	80
относительное отверстие	1:10
Электрическая мощность источника излучения, Вт	
лампа К 9	300
лампа КГМ	100
Точность контроля стабильности излучаемого потока, %	1

Приёмное устройство

Объективы:	
фокусное расстояние, мм	35; 50
относительное отверстие	1:3,5; 1:2
Поле зрения, град	2,5; 1,6
Стабильность контрольного источника света по току, %	0,1

Подвеска модели

Число осей	2
Пределы изменения скорости вращения осей, мин ⁻¹	0,5–5,0
Максимальные размеры модели, мм	50 × 50

Расстояния

Модель — объектив осветительного устройства, мм	7700
Модель — объектив приёмного устройства, мм	2000

Спектральные характеристики

Диапазон чувствительности, нм	
призма Аббе	400–700
дифракционная решётка	300–800
Дисперсия, нм/мм	
призма Аббе	0,5–3,0
дифракционная решётка	3,0–4,0
Относительная спектральная чувствительность в интегральном свете	
максимум, м	534
полуширина, м	116

Точность измерений

Разности долгот источника и приёмника излучения, град	0,017
Углов ориентации модели, град	1
Величин сигнала на выходе, %	1
Фотометрических характеристик, %	3
Спектральных характеристик, %	5

где E_{λ}^0 — солнечная спектральная освещённость исследуемой поверхности.

Таким образом определялась спектральная яркость поверхностей астрономических объектов.

При определении относительной величины светового потока, рассеянной моделью астрономического тела, приёмным устройством регистрируется поток $d\Phi(\lambda)$, рассеянный моделью в направлении наблюдателя (заданное углами ϕ_N и $\Delta\theta$) в телесный угол $d\omega$

$$d\Phi(\lambda) = \sum_{i=1}^n b_i(\lambda) \sin \phi_N dS_i d\omega, \quad (4.5)$$

где $b_i(\lambda)$ и dS_i — яркость и площадь i -го элемента поверхности ИСЗ.

Этот случай и является реализацией проведения оптических наблюдений астероидов, искусственных спутников Земли, элементов космического мусора.

4.3. Оптические свойства космического мусора в ОКП

а) Исследование оптических свойств поверхностей материалов, образующих техногенные отходы в околоземном пространстве. Конструкция любого ИКО имеет ряд покрытий, основной задачей которых является рассеяние в пространство падающего на объект излучения. Это большей частью покрытия, образованные различными красками, тканями а также элементами экрано-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) (Акишин, Новиков, 1986), состоящей из нескольких слоёв металлизированной полимерной плёнки, переложенной стекловатой. Среди материалов покрытий обязательно присутствуют металлы, в основном алюминий. К внешним элементам конструкции ИСЗ, а также к одной из составляющих космического мусора относятся солнечные батареи космических объектов.

Естественно, эти же покрытия находятся на поверхности фрагментов техногенного космического мусора, появляющегося в результате распада по различным причинам ИСЗ и их ракет-носителей. Сюда надо добавить осколки солнечных панелей, вклад которых в общую популяцию космического мусора может оказаться достаточно большим, осколки внутренних устройств и приборов ИКО.

В процессе исследований автором определялись фотометрические и спектральные характеристики рассеяния следующих образцов покрытий ИКО:

- 1) ткань стеклянная металлизированная ТСОН–СОТ М, ТУ 6-11-173-74;
- 2) материал Д-16 (внешнее покрытие эмаль ЭП-140 белая);
- 3) ткань армидная металлизированная плотная, дублированная со стекловалью. Окантовка — ткань посеребряная, металлизированная;
- 4) материал ЭФ-32-301, внешнее покрытие — лак ЭП-730, алюминий;
- 5) стеклотекстолит (ткань стеклянная Т-10, связующее ЭФ-32-301);
- 6) элемент солнечной панели;
- 7) майлар;
- 8) стекловата;
- 9)–13) различные ткани.

По результатам проведённых исследований были определены оптические характеристики как техногенных покрытий, так и шероховатых поверхностей, в сравнении с оптическими характеристиками поверхностей безатмосферных космических тел, представляющих две составляющие космического мусора — естественную и искусственную.

Амплитуда F зеркальной вспышки связана с её шириной таким образом, что $F_{\text{цил}} \approx (1/\Delta)$ для вспышки от цилиндрической и $F_{\text{пл}} \approx (1/\Delta^2)$ для вспышки от плоской поверхности. Минимальные угловые размеры конуса, в котором наблюдается зеркальная вспышка, равны видимому с астрономического объекта диаметру солнечного диска (или при моделировании — видимому с исследуемой поверхности диаметру объектива осветительного устройства). В нашем случае ширина вспышки от плоской ячейки солнечной батареи, весьма близкой к идеальной плоскости, совпала с углом (36'), под которым с модели в установке наблюдается объектив осветительного устройства. Проведённые измерения профилей вспышек от зеркальных плоских и цилиндрических поверхностей показали с точностью до ошибок совпадения величины амплитуды вспышки с её шириной.

К примеру, фотометрическая кривая в области V плоского образца № 2 (рис. 4.16 а) показывает заметную вспышку. Её амплитуда относительно диффузной составляющей $\Delta m = 3,69^m \pm \pm 0,03^m$. Полуширина зеркальной вспышки по $\Delta\theta$ составила $\Delta\theta_{0.5} = 2,5^\circ$ при видимом диаметре объектива осветительного устройства $\Delta_0 = 0,6^\circ$.

Профиль зеркальной вспышки определяется выражением

$$f = \sqrt{\frac{t}{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)}, \quad (4.6)$$

где t_0 — общая продолжительность вспышки, t — время, прошедшее от начала вспышки.

В наших экспериментах эти величины равны: $t_0 = \Delta$ — ширина вспышки, t — угловое расстояние от края вспышки.

В случае диффузного рассеяния для идеальных (ортотропных) рассеивателей, которыми часто являются техногенные поверхности, яркость зависит только от угла падения I и не зависит от направления наблюдения $(i', \Delta\varphi)$. В этом случае интенсивность элемента поверхности Δs зависит только от проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную лучу зрения, а индикатриса рассеяния представляет собой сферу, касаемую к поверхности в рассматриваемой точке. Яркость поверхности, освещённой под углом падения i потоком солнечного излучения $b = (E_{\oplus}/\pi) \cos i'$. Для идеальной сферы Ламберта фазовая функция получается интегрированием по i и i' :

$$F(\varphi) = \frac{1}{\pi} [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos \varphi]. \quad (4.7)$$

Диффузное рассеяние света реальными астрономическими объектами, лишёнными атмосферы, то есть главным образом, спутниками планет, астероидами, метеорным веществом удобнее описывается законом Ломмеля–Зеелигера, который, в отличие от закона Ламберта для ортотропных поверхностей, учитывает вторичное излучение от рассеивающей поверхности. На вид фазовой функции заметное влияние оказывают микро- и макро-структура такой поверхности. Наличие этих структур приводит к взаимному затенению частиц поверхности друг другом (*Irvine, 1966*), появлению эффекта противостояния при малых фазовых углах. Эффекты затенения дают в некоторых случаях интересные результаты. Автором проведена лабораторная фотометрия цилиндрической модели ИСЗ, поверхность которой покрыта порошком CaCO_3 с довольно высоким альбедо в видимой области (до 0,5 — *Муртазов, 1983*). Наклон фазовой кривой этой модели больше, нежели у рассеивателей Ламберта и Ломмеля — Зеелигера, расхождение с ними увеличивается по экспоненциальному закону с фазовым углом (кривая 4 на рис. 4.8). Несмотря на то, что такой порошок не является однократным рассеивателем, влияние взаимозатенения частиц поверхности приводит к практическому

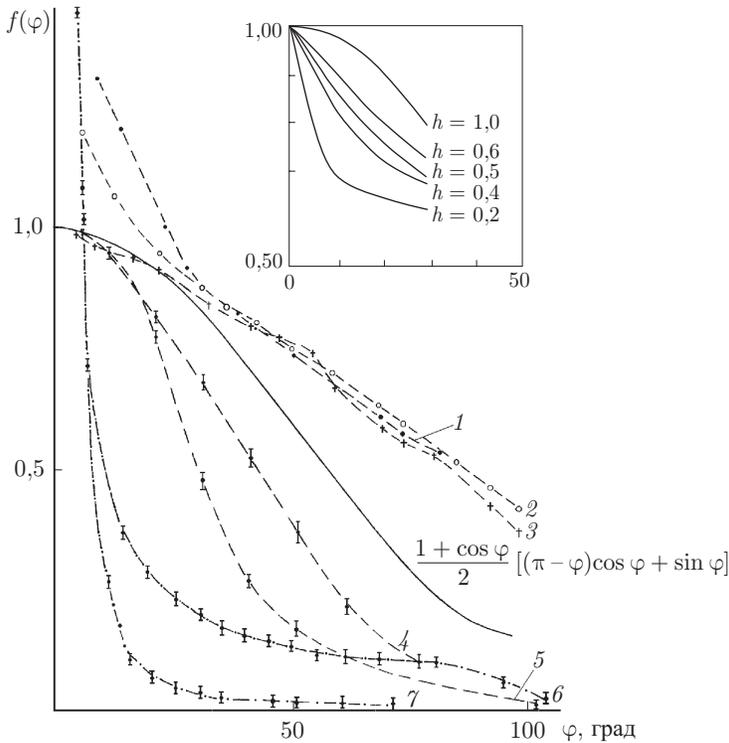


Рис. 4.8. Фазовые кривые некоторых материалов покрытий поверхностей космического мусора в сравнении с фазовыми кривыми идеальных рассеивателей (сплошная линия) и лунной поверхности (врезка)

совпадению кривой 4 с фазовой кривой образцов лунного грунта с таким же размером фракций (*Антипова-Каратаева и др.*, 1976). Для объяснения рассеяния света лунной поверхностью Хапке (*Нарке*, 1963) в своё время была предложена модель поверхности, состоящей из мелких зёрен, собранных случайным образом в открытую пористую решётку. В этой решётке направление падения является преимущественным для выхода света. Фотометрическая функция Хапке выражается в виде интегрального закона рассеяния следующим образом

$$F(\varphi) = L(\varphi)S(\varphi)B(\varphi). \quad (4.8)$$

В этом выражении

$$S(\varphi) = \frac{1}{\pi} [(\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi] + 0,1(1 - \cos \varphi)^2 \quad (4.9)$$

фазовая функция одиночной частицы, а

$$B(\varphi) = 2 - \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2h} \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] \left[3 - \exp \left(-\frac{h}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] \quad (4.10)$$

учитывает ослабление излучения при обратном рассеянии. Функция $L(\varphi)$ в интегральном законе соответствует функции Ломмеля–Зеелигера. Величина h — параметр упаковки, определяющий пористость грунта:

$$h = 2 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{2/3} \quad (4.11)$$

для Луны и астероидов имеет значение 0,4–0,8.

В связи с этим представляют интерес яркостно–фазовые характеристики образцов стеклотканей (рис. 4.9–4.11). Фотометрия их проводилась для случая, когда поверхность образца направлена к источнику света S (угол между направлением на S и главной нормалью n к поверхности равен углу падения i), то есть в используемой системе координат разность долгот между S и $N \Delta \theta = 0$, фазовый угол $\varphi = \phi_S - \phi_N$.

Приведённые кривые яркости b_V стеклотканей в визуальной области V показывают, что последние не являются идеальными рассеивателями. Особенностью рассеяния света нитями стекловолокна является значительное боковое рассеяние при $\varphi - i \approx \approx 90^\circ$, что приводит к возникновению избытков рассеяния в этих диапазонах фазовых углов (*Курьшев, Муртазов, 1987*) Вместе с тем, ячеистая структура стекловолокна, образованная перпендикулярно прошитыми друг другу нитями, явление глории в самих нитях приводят к кривым, вид которых (совершенно неожиданно) для фазовых углов в пределах $0 \div 20^\circ$ описывается функцией Хапке. Такой же вид в том же диапазоне фазовых углов имеют кривые яркости образца стеклотекстолита (рис. 4.10), поверхность которого представляет собой пористую непрозрачную решётку, дающую как эффект обратного рассеяния (связанный, главным образом, с исчезновением теней), так и диффузно-направленную составляющую. Исследованная автором поверхность, образующаяся при протравливании зеркальной алюминиевой модели ИКО концентрированным раствором щёлочи, также даёт эффект диффузно-направленного рассеяния.

Интересно отметить тот факт, что подобные фазовые кривые характерны для многих поверхностей, имеющих пористую структуру. В работах (*Акимов, 1980; Веверка, 1980; Герелс, 1974; Курьшев, Муртазов, 1989; 1990*) суммированы факторы, увеличивающие наклон фазовых кривых и дающие заметный эффект

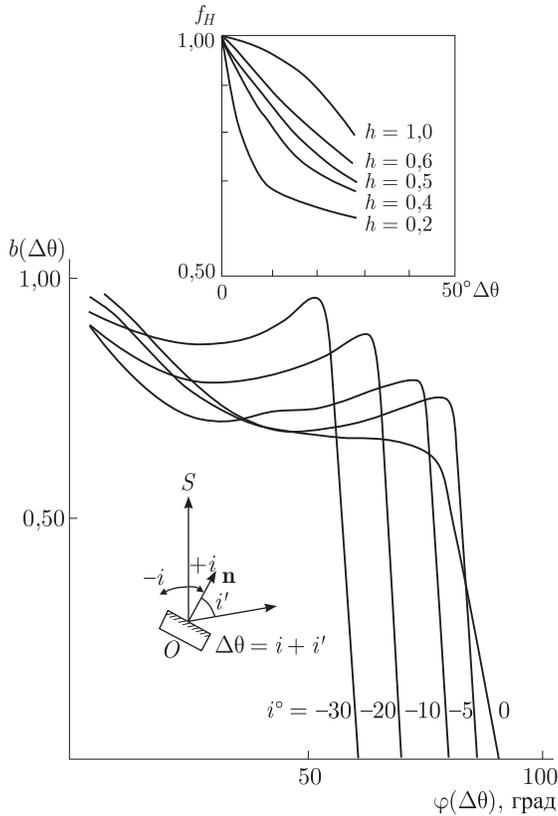


Рис. 4.9. Изменение яркости образца стеклоткани в функции угла $\Delta\theta$ для различных углов падения i , нормированное на единицу площади при $i = i' = 0$ (i' — угол рассеяния). На врезке фазовые кривые модели лунного грунта для различных параметров упаковки h

оппозиции при диффузном рассеянии. Это, главным образом, микро- и макронеоднородности рассеивающей поверхности.

На рис. 4.8 приведены фазовые кривые зеркальной цилиндрической модели ИКО (6, 7), цилиндрической модели с поверхностью из стеклоткани, а также цилиндрических моделей с поверхностями, покрытыми CaCO_3 (4) и протравленными (5). Для сравнения приведена фазовая кривая диффузного ламбертовского цилиндра и кривые, рассчитанные по функции Хапке (4.26) для различных параметров упаковки h .

Используя значения наклонов фазовых кривых перечисленных моделей (табл. 4.3), можно в принципе выделить такие

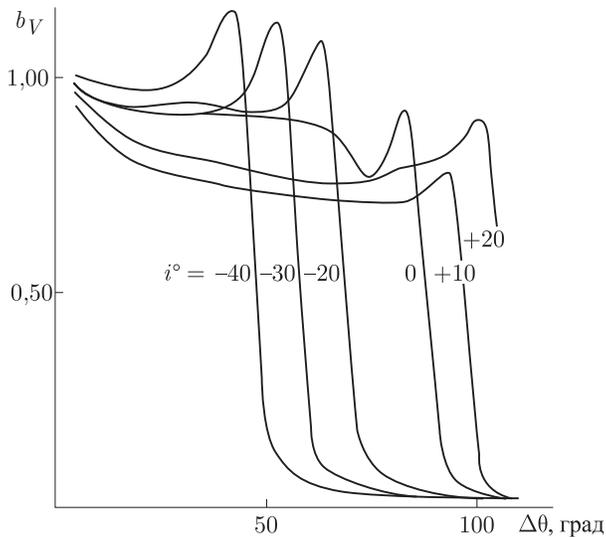


Рис. 4.10. Изменение яркости образца армидной металлизированной ткани в функции угла $\Delta\theta$ для различных углов падения i , нормированное на единичную площадь при $i = i' = 0$

поверхности, рассеяние которыми в определённых диапазонах фазовых углов близко к ламбертовскому.

Ещё в работах (*Emmons, etc., 1967; Lanczi, 1967*) было показано, что наиболее удовлетворяющее ламбертовскому рассеяние может быть получено для поверхности, покрытой (напылённой или осаждённой электролитически) окисью магния MgO . В наших экспериментах такая поверхность применялась, как было указано выше, в качестве стандартного экрана. Из исследуемых ближе всего по наклонам к ламбертовским оказались фазовые кривые диффузной составляющей зеркальной цилиндрической модели.

В работе (*Куприянов, Муртазов и др., 1994*) нами в приближении геометрической оптики рассмотрено рассеяние света случайной шероховатой изотропной поверхностью в функции углов падения и рассеяния, спектрального альбедо рассеяния, показателя преломления материала покрытия. Коэффициент яркости шероховатой поверхности рассматривался с учётом затенения света неровностями поверхности следующим образом: характерный радиус кривизны неровностей считался много больше длины волны падающего света. Шероховатости представлены изотропной стационарной случайной функцией поверхностных координат с одинаковой в каждой точке плотностью вероятно-

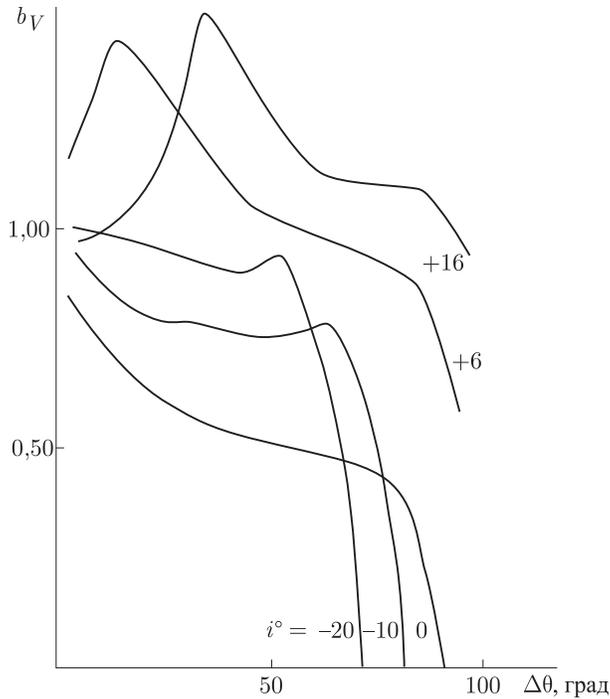


Рис. 4.11. Изменение яркости образца стеклотекстолита в функции угла $\Delta\theta$ для различных углов падения i , нормированное на единичную площадь при $i = i' = 0$

сти их распределения. Затенение определялось функцией, полученной в работе (Irvine, 1966). На основании предложенной теоретической модели проведена оценка параметров образца материала D-16 и образца белого шероховатого диффузного покрытия в сравнении с экспериментальными индикатрисами методом нелинейного регрессионного анализа. Минимум глобальной невязки между теоретическими и экспериментальными данными находился методом наименьших квадратов. Получено достаточно хорошее совпадение теоретической модели с экспериментом.

Поскольку одним из наиболее распространённых покрытий поверхностей техногенного мусора является материал Д-16 с внешним слоем из белой эмали ЭП-140, автором на основании проведённых экспериментов были построены пространственные индикатрисы рассеяния этого образца. Процесс измерения и обработки результатов проводился в несколько модернизированной системе координат. В ней азимутом A задавалось положение плоскости SON и в ней измерялся фазовый угол φ . Остальные

Таблица 4.4. Средние значения наклонов фазовых кривых техногенных поверхностей в сравнении с идеальными рассеивателями и естественными поверхностями

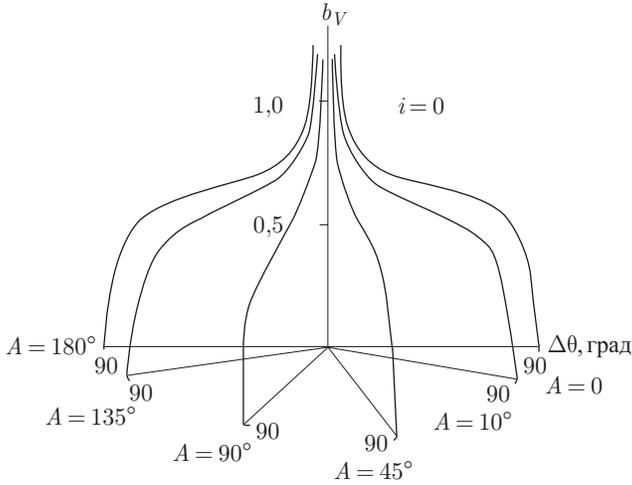
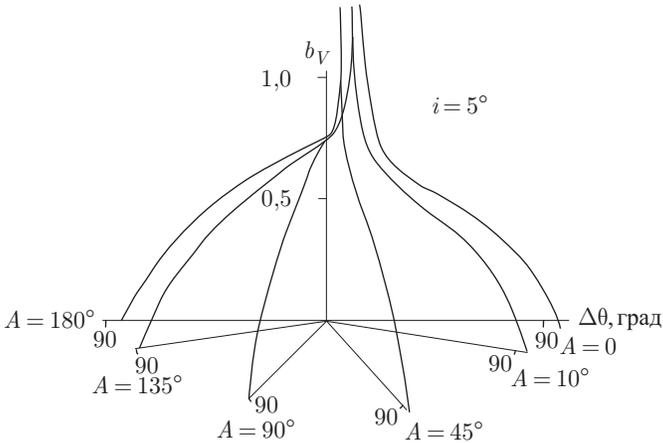
№	Поверхность	Наклон ($\Delta m/\text{град}$)
1	Ламбертовский цилиндр (теор.)	0,013
2	Ламбертовская плоскость (теор.)	0,014
3	Поверхности Луны и астероидов	0,02
4	Среднее для цилиндрических моделей, покрытых стеклотканью	0,007
5	Цилиндрическая модель, покрытая CaCO_3	0,015
6	Цилиндрическая модель с протравленной диффузной поверхностью	0,026
7	Плоский образец стеклоткани	0,013
8	Диффузная составляющая зеркальной цилиндрической модели	0,013
9	Плоский образец стеклотекстолита	0,013
10	Ткани без стекловолокна	0,013
11	Диффузная составляющая плоской СБ и майлара	0,013

координаты: разность долгот источника и приёмника излучения установки $\Delta\theta = 0$, спутникоцентрическая широта источника $\phi_S = 90^\circ$, фазовый угол $\varphi = 90 - \phi_N$, угол падения излучения на образец $i = (\mathbf{S}, \mathbf{n})$, где \mathbf{n} — нормаль к поверхности образца. Полученная пространственная индикатриса рассеяния материала D-16 в области V для углов падения $0, 5^\circ, 20^\circ$ проиллюстрирована на рис. 4.12–4.14. Обращает на себя внимание тот факт, что диффузная составляющая рассеяния довольно близка к ламбертовскому — величина b_v весьма мало меняется с φ при любых A .

Как было показано выше, спектральная яркость b_λ является величиной, определяемой как углами падения i и рассеяния i' излучения, углом $\Delta\theta$ между их плоскостями, так и физическими параметрами F_λ , связанными с особенностями строения рассеивающей поверхности

$$b_\lambda = b_\lambda f(F_\lambda, i, i', \Delta\theta). \quad (4.12)$$

Применительно к исследуемой нами задаче b_λ можно считать аналогом спектрального геометрического альбедо, которое определяется как отношение спектральной яркости поверхности при

Рис. 4.12. Пространственная индикатриса рассеяния образца № 2 для $i=0$ Рис. 4.13. Пространственная индикатриса рассеяния образца № 2 для $i = 5^\circ$

$i = i' = 0$ к спектральной яркости абсолютно белой ортотропной поверхности для тех же условий.

Результаты впервые проведённых автором экспериментов по получению спектров рассеяния образцов покрытий были представлены в работе (Муртазов, 1989). Аналогичные спектры получены затем авторами (Банников и др., 1994).

Измерения спектров проводились как для зеркальной, так и для диффузной компонент в видимом диапазоне длин волн.

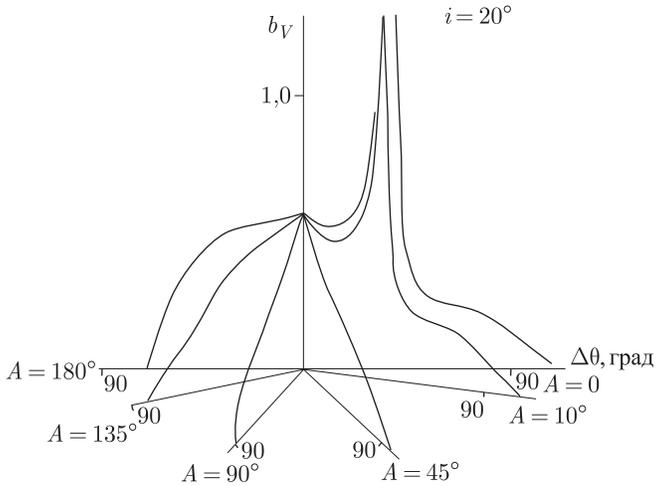


Рис. 4.14. Пространственная индикатриса рассеяния образца № 2 для $i = 20^\circ$

Первым опубликованным в печати спектром ИКО явился спектр объекта на геостационарной орбите, наблюдавшегося в период зеркальной вспышки. Наличие значительного избытка излучения в области 400–420 нм дало авторам (Багров, Смирнов, 1984) основание предположить, что он обусловлен отражением света от кремниевых СБ. Действительно, спектр отражения кремниевого зеркала (Аллен, 1977) имеет такой избыток. Проведённые нами измерения спектрального состава излучения, отражённого от элемента СБ, — показали наличие избытка в синей области и для диффузной, и для зеркальной (рис. 4.15 б) составляющих (Курьшев, Муртазов, 1990). Результаты измерения профиля зеркальной вспышки от этого образца для видимого углового диаметра объектива осветительного устройства $70'$ (рис. 4.15 а) показали, что он достаточно близок к идеальному.

Альbedo диффузного рассеяния образца солнечной панели, определявшееся численным интегрированием спектральной кривой b_λ , составило величину $a = 0,085 \pm 0,017$, коэффициент зеркального отражения $r = 0,100 \pm 0,023$.

Отношение зеркального и диффузного потоков для образца солнечной панели составило $1,75 \cdot 10^5$. Это близко к амплитуде фазовой функции зеркального отражения. Оно показывает, что вклад диффузного излучения СБ в общий блеск техногенных осколков весьма незначителен.

Обнаружение фрагментов СБ в ОКП, таким образом, возможно при наличии зеркальной вспышки с избытком излучения

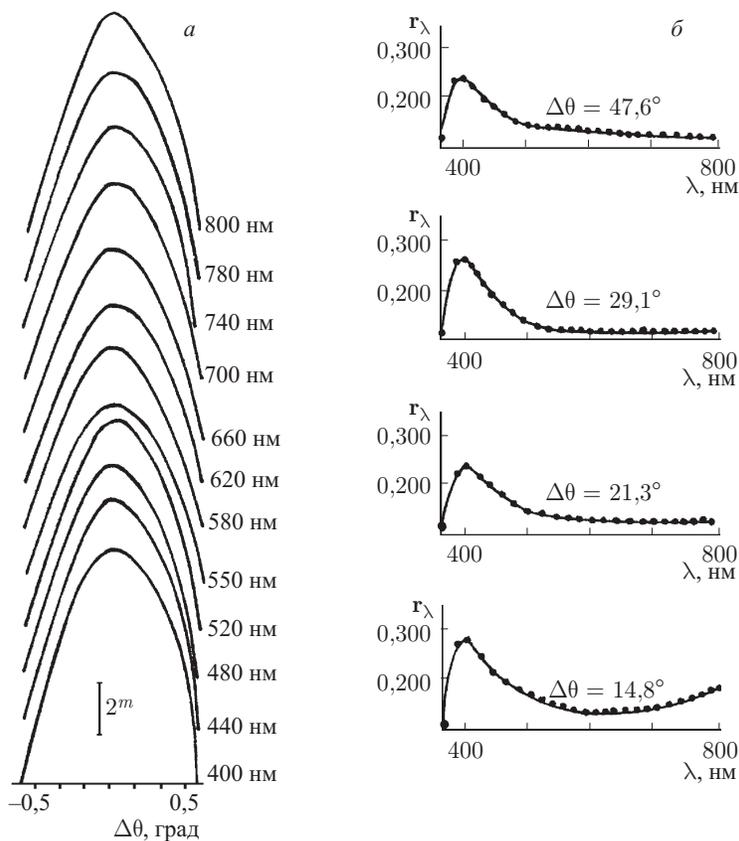


Рис. 4.15. Спектральный профиль (а) и спектры (б) зеркальной составляющей отражения света элементом солнечной панели

в синей области спектра. Единственно заметный вклад может внести диффузная составляющая излучения, рассеянная обратной стороной СБ (Мурина, Нежданова, 1995).

Дальнейшие исследования показали, что именно наличие «синей» зеркальной вспышки является критерием идентификации (распознавания) элементов СБ или их осколков в околоземном пространстве.

Следует отметить, что ранее (Багров, Смирнов М.А., 1983, 1987) сообщалось об обнаружении в спектрах зеркальных вспышек от геостационарных ИСЗ некоторых особенностей, полезных для идентификации. Однако, в наших экспериментах они обнаружены не были, и дальнейшими наблюдениями не подтверждались.

Наиболее часто встречающееся покрытие корпуса ИКО, РН и поверхностей техногенного мусора — белая краска типа ЭП (Россия) и TiO (США).

Интегральные фотометрические параметры таких покрытий уже обсуждалось выше.

Спектр краски ЭП-140 имеет характерный завал в районе 400 нм сохраняющийся при переходе от зеркальной к диффузной составляющей (рис. 4.16, 4.18).

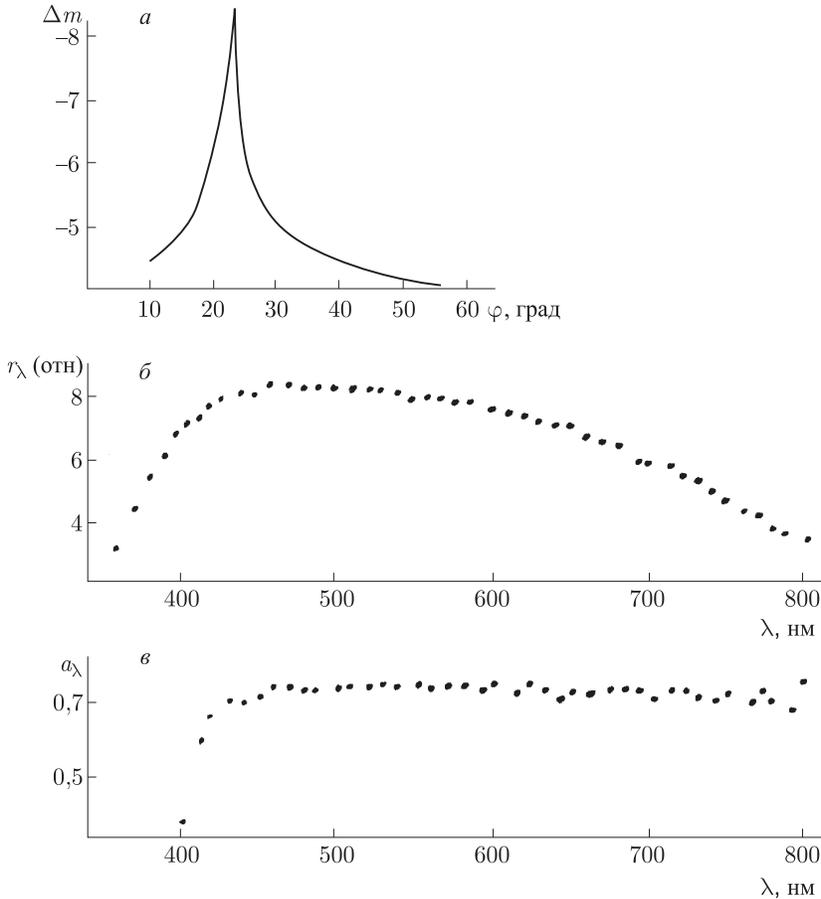


Рис. 4.16. Кривая блеска (а) и спектры плоского образца, покрытого белой эмалью в максимуме вспышки (б) и при диффузном рассеянии (в)

Спектральная кривая образца белой краски во время зеркальной вспышки ($\Delta\theta = 24^\circ$, рис. 4.16.б) имеет довольно гладкий

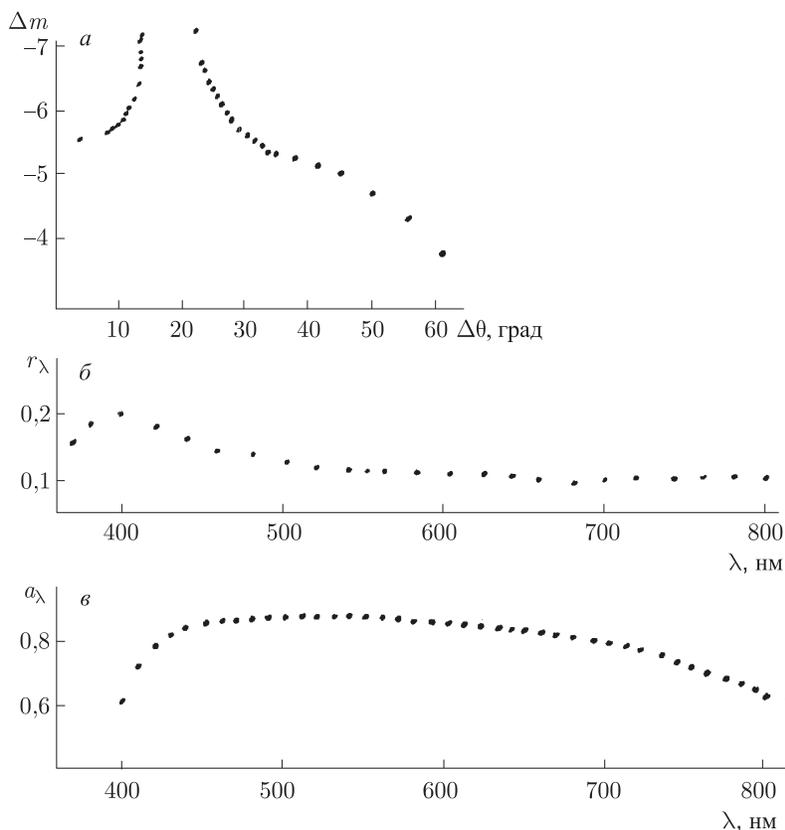


Рис. 4.17. Кривая блеска (а) цилиндрической модели ИСЗ, покрытой белой краской TiO, с плоскими СБ, а также её спектры во время максимума вспышки (б) и вне вспышки (в)

вид: широкий максимум в области 450–600 нм и плавные завалы в синей и красной областях. При переходе к диффузной составляющей (спектр для $\Delta\theta = 60^\circ$, рис. 4.16. в) завал спектра в районе 400–420 нм становится более крутым, в красной части b_λ практически перестаёт зависеть от длины волны.

Подобные спектру образца ЭП-140 (или краски TiO) кривые получены при наблюдениях (Багров, Смирнов М.А, 1987) вращающегося спутника: в период зеркальной вспышки с острым максимумом в интегральном свете спектры объекта не имели избытка в синей области. Более подробное исследование спектральной кривой этого ИСЗ показало, что её вид аналогичен полученному автором настоящей работы для образца белой эмали. То есть, в данном случае вспышка была «белой». Кроме того, в этой же

работе приведён спектр геостационарного спутника «Арабсат», имеющий те же особенности, что и спектр исследованного образца.

Таким образом, наличие «белой» вспышки шириной $\approx 10^\circ$ или «белая» составляющая диффузного излучения фрагмента

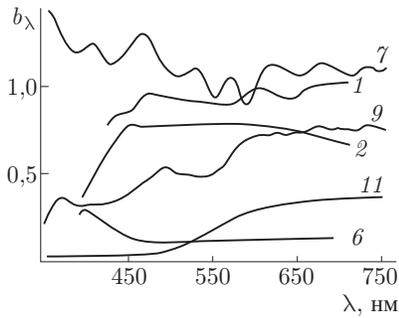


Рис. 4.18. Спектральные яркости b_λ некоторых образцов материалов покрытий ИСЗ и техногенного космического мусора. 1 — ткань стеклянная металлизированная; 2 — эмаль ЭП-140; 6 — поверхность солнечной панели; 7 — майлар; 9, 11 — коричневые ткани с различным содержанием стеклянных нитей

наблюдений геостационарного спутника из пункта с географической широтой $\varphi = 40^\circ$ ($\phi_N = 6,3^\circ$) и долготой, более восточной, чем долгота точки стояния объекта в периоды, близкие к равноденствиям ($\delta = \phi_S = -5^\circ$).

Кривая блеска этой модели имеет особенности, весьма характерные для кривых блеска геостационарных спутников: асимметрию относительно центра вспышки, связанную с эффектами затенения и ориентацией модели, близкую к ламбертовской диффузную составляющую блеска после вспышки.

В этом случае показано, что вид кривой блеска геостационарного спутника и его спектры для различных частей кривой блеска достаточно надёжно могут определить материал покрытий поверхностей элементов его конструкции.

Соответственно, такой же вид будут иметь спектры фрагментов техногенного космического мусора, образовавшиеся после распада спутника.

Спектр вспышки (рис. 4.17 б) практически является спектром кремниевых СБ, поскольку вклад диффузной составляющей

мусора может служить критерием идентификации поверхности, покрытой красками ЭП-140 и TiO.

Резкое изменение вида спектра при переходе от зеркальной к диффузной составляющей для многокомпонентного объекта представлено на рис. 4.17 (Курьшев, Муртазов, 1990) Здесь показана интегральная кривая блеска (а) цилиндрической модели ИСЗ с плоскими кремниевыми СБ. Поверхность цилиндра была покрыта белыми титановыми белилами с чисто диффузным характером рассеяния. При проведении экспериментов были смоделированы условия

здесь весьма мал. Спектр диффузной составляющей является практически спектром белой краски TiO (здесь весьма мал вклад диффузной составляющей излучения СБ).

Если обратиться к спектрам образцов стеклотканей, то они выглядят значительно разнообразней (например, спектральные кривые образцов 1, 7, 9 на рис. 4.18). Часто на них наблюдается чередование максимумов и минимумов.

Такой вид кривых спектральной яркости стеклотканей, имея в виду особенности рассеяния ими света, несомненно, обусловлен механизмом процесса распространения света внутри нитей стекловолокна, а также структурой самих стеклотканей. Можно добавить, что при изменении угла рассеяния i' вид спектральных кривых несколько изменяется. Это также свидетельствует о наличии процессов перераспределения излучения в нитях стекловолокна.

Таким образом, в случае стеклотканей достаточно трудно выработать какой-либо критерий их идентификации только по спектральным кривым яркости.

По результатам проведённых фотометрических и спектральных экспериментов были определены показатели, характеризующие оптические свойства покрытий ИСЗ и фрагментов космического мусора (Муртазов, 1994, 2000), дающие возможность их использования при решении как прямой, так и, в какой-то мере, обратной задачи спектрофотометрии ИСЗ (табл. 4.5).

Соотношение между количеством света, отражённым поверхностью образца зеркально, и рассеянным диффузно, рассчитывалось следующим образом. Во-первых, к зеркальной составляющей были отнесены все случаи как зеркального отражения, так и диффузно-направленного рассеяния, избытки излучения при обратном рассеянии, эффекты бокового рассеяния. Далее рассчитывалось соотношение

$$\frac{\int_{\theta} (f_{\text{sp}} - f_{\text{dif}}) d\theta}{\int_{\theta} f_{\text{dif}} d\theta}, \quad (4.13)$$

где f — значения индикатрисы соответственно для зеркальной и диффузной компонент, а интегрирование велось в диапазоне углов $\Delta\theta$, в котором наблюдалось зеркальное или приравненное к нему отражение. Полученные таким образом результаты (табл. 4.4) в какой-то мере характеризуют отражательную способность исследовавшихся материалов.

По результатам спектральных измерений были рассчитаны показатели цвета исследовавшихся материалов в системе Джонсона $UBVR$. Расчёт производился в виде, например,

$$U-B = 2,5 \lg \frac{\int_B E_\lambda^0 B_\lambda d\lambda}{\int_V E_\lambda^0 B_\lambda d\lambda}, \quad (4.14)$$

где E_λ^0 и B_λ — спектральная освещённость от Солнца на расстоянии 1 а. е. и нормированная яркость покрытия в соответствующих полосах системы.

Кроме исследованных автором материалов, в общую классификацию покрытий следует добавить ещё металлические покрытия. Основными металлическими покрытиями техногенных объектов в ОКП, служащими в дальнейшем при распаде объектов материалами искусственного космического мусора, являются алюминий, сталь, титан. Их спектральные коэффициенты отражения довольно мало зависят от длины волны в видимой области спектра (Аллен, 1977; Муртазов, 2000). Спектральные коэффициенты зеркальной составляющей отражения достаточно высоки, например, около 0,5 для стали, 0,8–0,9 для алюминия и титана вблизи 400 нм и 0,6 (сталь), 0,8–0,9 (алюминий, титан) вблизи 700 нм и практически не зависят от длины волны в видимой области спектра. Таким образом, показатели цвета этих материалов безотносительно к спектру источника света близки к нулю и почти равны солнечным при определении из реальных наблюдений.

Анализ табл. 4.5 показывает, что оптические свойства материалов покрытий ИСЗ и их техногенных отходов достаточно разнообразны. Однако, двумерная диаграмма «альbedo–показатель цвета» (см. рис. 2.6) выявляет наличие достаточно хорошо выраженных областей, которые занимают на ней те или иные материалы. Здесь, с учётом данных по различным тканям автору удалось построить общую классификацию материалов покрытий ИСЗ по их оптическим свойствам (табл. 4.6). Удалось выделить шесть классов покрытий, охватывающих достаточно широкую область как значений альbedo, так и показателя цвета ($B-V$), величину которого чаще всего наиболее просто получить по результатам наблюдений.

Таким образом, продемонстрирована возможность применения результатов определения спектральных свойств космических

Таблица 4.5. Результаты определения оптических характеристик материалов покрытий поверхностей техногенного космического мусора

№	Вид материала	Отраж. способн. зерк./диф.	Зеркальность	Показатели цвета, m		
				U-B	B-V	V-R
1	Стеклоткань ТСОН-СОТ М	$0,75 \pm 0,02$	0,02	—	-0,03	0
2	Белая эмаль ЭП-140	$0,77 \pm 0,07$ $0,76 \pm 0,04$	3,42	—	0,19	0,2
3	Ткань армидная металлизированная	$0,25 \pm 0,03$	0,17	—	1,25	-1,2
4	Материал ЭФ-36-301	$0,33 \pm 0,03$	0,21	—	-0,06	0
5	Стеклотекстолит Т-10	$0,39 \pm 0,04$	0,09	—	0,82	0,7
6	Элемент СБ	$0,085 \pm 0,017$ $0,100 \pm 0,023$	$1,75 \cdot 10^5$	—	-0,37 -0,42	—
7	Стеклоткань	$0,76 \pm 0,03$	0,14	0,38	0,03	0,18
8	Ткань цветная	$0,18 \pm 0,01$	—	0,23	-0,03	0,40
9	—	$0,55 \pm 0,02$	—	1,04	0,19	0,53
10	—	$0,25 \pm 0,02$	—	0,94	1,06	0,92
11	—	$0,18 \pm 0,01$	—	2,58	1,16	0,84
12	Майлар	$0,80 \pm 0,08$ $0,15 \pm 0,03$	$10^2 \div 10^3$	0,02	0,02	0,02

материалов в качестве ядер интегральных уравнений, используемых для решения прямой задачи фотометрии ИКО.

В итоге независимо друг от друга авторами (*Багров, Смирнов М.А.*, 1987) (для реальных объектов) и автором настоящей работы (для физических моделей — *Курьшев, Муртазов*, 1989) было сформулировано понятие поля рассеяния ИКО, которое формируется полями рассеяния света отдельными элементами конструкции спутников.

Совместный анализ таких полей позволил впервые провести распознавание и идентификацию элементов конструкций ИКО.

Т а б л и ц а 4.6. Классификация материалов покрытий техногенного космического мусора по оптическим свойствам

№	Вид материала		Альбедо	Показатели цвета, m		
				U–B	B–V	V–R
1.	Белые (серые) покрытия	диф.	0,2÷0,8	0÷0,4	–0,05÷0,2	0÷0,4
2.	Чёрные покрытия (графито-эпоксидный состав, ткани)	диф.	0,01÷0,05	0,1÷0,2	–0,05÷0,05	0,1÷0,2
3.	Жёлто–зелёные покрытия	диф.	0,1÷0,5	0,8÷2,0	0,2÷0,7	0,5÷1,0
4.	Красно–коричневые покрытия	диф.	0,1÷0,3	1,0	0,5÷1,2	0,8÷1,5
5.	СБ	зерк.	0,03÷0,100	—	–0,3÷ – 0,5	0
6.	Металлические покрытия	зерк.	0,5÷0,9	0,0÷0,2	0,0÷0,4	0,0÷0,2

б) Критерии идентификации естественных и техногенных поверхностей по результатам оптического мониторинга.

В связи с наличием данных об оптических свойствах поверхностей техногенного мусора в ОКП открывается возможность разделения фракций техногенного и естественного мусора (межпланетной пыли, осколков астероидов, метеорного вещества) по результатам сравнительного анализа многоцветных фотометрических наблюдений.

В настоящее время всё большее число фотометрических цветных наблюдений проводятся с использованием ПЗС-приёмников, что значительно повышает производительность и скорость обработки информации, поступающей от этого вида оптического мониторинга ОКП. Основная масса наблюдений производится

в полосах В ($\lambda_m = 440$ нм), V ($\lambda_m = 550$ нм) и R ($\lambda_m = 720$ нм) многоцветной фотометрической системы.

Получаемые из цветовой фотометрии величины В–V и V–R определяют цвет поверхности астрономического тела. Автор в ходе своих экспериментов по физическому моделированию оптических характеристик астрономических объектов получил цвета основных поверхностей искусственных космических объектов. Следует ожидать, что цвета поверхностей техногенного мусора, образующегося из поверхностей ИКО, будут такими же. Табл. 4.5 настоящей работы показывает, что цвета поверхностей техногенных отходов в ОКП весьма разнообразны — от белого до красного и коричневого.

Цвета естественных небесных тел, из которых образуется мусор, практически все красноватые и буро-серые (*Герелс, 1974; Лупишко, Бельская, 1991*). Так, средний медианный показатель цвета Луны составляет В–V = 1,2 (*Аллен, 1977*). Поверхности большинства астероидов и метеороидов ещё более красные.

Таким образом, наличие данных наблюдений показателей цвета не даёт возможности без дополнительной информации отличать поверхности частиц техногенного и естественного космического мусора друг от друга.

Видимая топоцентрическая звёздная величина $m_{\text{КО}}(\varphi)$ безатмосферного объекта в ОКП может быть представлена в виде линейной зависимости от фазового угла $\varphi_{\text{КО}}$ в области его изменения от 5° – 7° (для исключения эффекта оппозиции) (*Герелс, 1974; Мартынов, 1971*):

$$m_{\text{КО}}(\varphi) = m_{\text{КО}}(0) + \alpha\varphi_{\text{КО}} \quad (4.15)$$

где α — коэффициент, определяющий наклон фазовой функции.

Значения α ($\Delta m/\text{град}$), определённые автором для поверхностей частиц техногенного мусора, приведены в табл. 4.4. Эти данные показывают, что поверхности техногенных тел в ОКП имеют ламбертовский характер рассеяния излучения, и значение наклона их фазовых функций близко к $\alpha = 0,013$ зв. вел./град.

Рассеяние света поверхностями естественных безатмосферных астрономических тел далеко не идеально. Здесь сказываются взаимные затенения частиц поверхности друг другом, трубчатая структура реголита, покрывающего поверхности и т. д. Таким образом, наклоны фазовых кривых безатмосферных астрономических тел и поверхностей естественного мусора заметно больше, чем искусственного, и превышают, в основном, величину $\alpha = 0,02$ зв. вел./град. (*Герелс, 1974; Колёсник, Григоревский, 1979; Buratti, Veverka, 1985; Harke, 1963*).

Автором ранее были проведены эксперименты, показавшие, что тела, покрытые частицами с размерами, близкими к размерам частиц лунного реголита, даже при значительных альбедах имеют весьма значительные, иногда превышающие наклоны поверхностей Луны и астероидов, наклоны фазовых кривых (Муртазов, 1983).

Таким образом, **критерии различия** техногенных и естественных поверхностей в ОКП можно сформулировать следующим образом: при близких по значению показателей цвета В–V, V–R наблюдаемых в ОКП объектов наклон фазовых функций поверхностей естественных объектов как минимум в два раза больше наклона фазовых функций поверхностей техногенных объектов (Murtazov, 2003б).

Таблица 4.7. Оптические параметры идентификации техногенных поверхностей в ОКП в сравнении с параметрами естественных поверхностей

Поверхность (вид рассеяния)	Альbedo	Показатель цвета В–V	Наклон фазовой кривой	Амплитуда вспышки
СБ (зерк.)	0,10	$-0,3 \div -0,5$	0,013	до 10^5
Белая эмаль (зерк.)	$\approx 0,80$	$-0,05 \div 0,2$	0,013	$\approx 10-30$
Ткани без стекловолокна (диф)	$0,15 \div 0,25$	$0,2 \div 1,2$	0,013	—
Стекловолокно (диф.)	$0,25 \div 0,75$	$0 \div 1,2$	$0,010 \div 0,012$	—
Майлар (зерк.)	0,80	≈ 0	0,013	$\approx 10^2-10^3$
Астероиды (диф.)	$0,03 \div 0,15$	$>1,2$	$>0,02$	—

в) Определение материального состава естественных и техногенных отходов в околоземном космическом пространстве по данным оптического мониторинга. Анализ результатов экспериментов автора показал, что разработанный им метод физического моделирования даёт возможность решения прямой задачи спектрофотометрии объектов в ОКП — получение кривых блеска объектов в ОКП и вообще в космосе по их известным формам и оптическим свойствам поверхностей. Однако, как известно, для решения задач идентификации объектов, элементов их конструкций (последующей техногенной составляющей космического мусора) наличия только одной кривой блеска явно недостаточно. Полную информацию об отражающих излучение элементах конструкции космического объекта несёт его поле рас-

сеяния. Фактически поле рассеяния составляют пространственные индикатрисы рассеяния, полученные для углов облучения и рассеяния света объектом во всём интервале их изменения. Реально для наблюдающихся искусственных космических объектов возможно получение данных об их полях рассеяния в виде кривых блеска при различных склонениях Солнца δ_{\odot} . Тогда каждая фазовая функция $I(\varphi)$ при фиксированном δ_{\odot} будет являться сечением его поля рассеяния; ограничением является предельное значение склонения Солнца $|\delta_{\odot}| < 23^{\circ} 27'$.

В литературе были опубликованы результаты телевизионной фотометрии геостационарного спутника (ГИСЗ), полученные в разное время (то есть для разных склонений Солнца) на одном инструменте — МТМ-500 Крымской астрофизической обсерватории. Они показали, что вид кривых блеска этого объекта существенно зависит от величины склонения Солнца. В этом случае конструкция ГИСЗ должна, видимо, иметь достаточно крупные элементы, рассеяние излучения которыми заметно на кривых блеска. В работе (Багров, Смирнов, 1987) рассмотрено поле рассеяния ГИСЗ, полученное из нескольких кривых блеска для различных склонений Солнца. Авторам удалось установить конструктивный состав и отождествить наблюдавшийся объект с ГИСЗ «Интелсат-5».

Независимо от этих наблюдений автором настоящей работы были проведены эксперименты по получению поля рассеяния модели ГИСЗ «Интелсат-5» (Курьшев, Муртазов, 1989), показавшие, что полученные кривые блеска и изменение их вида с широтой ϕ_S источника света, соответствующей его склонению, полностью определяются конструкцией модели и законами рассеяния света элементами её конструкции.

Метод физического моделирования позволил в данном случае получить не только набор кривых блеска, характеризующих поле рассеяния модели, близкой по конструкции к ГИСЗ «Интелсат-5», но и однозначно решить прямую задачу фотометрии ИСЗ — получение кривой блеска модели объекта заданной конструкции и ориентации, при заданных условиях видимости, на заданную календарную дату и время наблюдений. Кривые блеска предложенной модели имеют в данном случае те же характерные особенности, что и кривые блеска реального ГИСЗ «Интелсат-5». Различие состоит в различном расположении максимумов блеска от сферических антенн, определяющееся различным характером рассеяния ими света и различной ориентации для модели и объекта.

Таким образом, моделирование ожидаемых кривых блеска объектов различной конструкции позволило создать соответствующий каталог, весьма полезный при организации оптического мониторинга ОКП (Белошенков, Куприянов, Муртазов, 1994).

Далее результаты физического моделирования оптических характеристик ГИСЗ и фрагментов их конструкций, попадающих в итоге в искусственный космический мусор, были использованы при идентификации ГИСЗ по данным их фотометрии.

Основными источниками данных фотометрии ГИСЗ явились результаты фотометрических наблюдений ГИСЗ, полученные на TV-комплексе телескопа МТМ-500 Крымской астрофизической обсерватории под руководством доктора физико-математических наук В. В. Прокофьевой.

В апреле 1986 г. проведены телевизионные фотометрические (в полосах В и V) наблюдения ГИСЗ, по координатной информации идентифицированного как ГИСЗ «Горизонт» (Носова, 1990).

В соответствии с общей конструкцией таких ГИСЗ автором диссертации решена прямая задача его фотометрии: получены кривые блеска физической модели ГИСЗ «Горизонт» (цилиндрический корпус с плоскими выносными СБ и сферической антенной на торце цилиндра, обращённой к наблюдателю), рис. 4.19.

Проведение экспериментов по физическому моделированию кривых блеска такой модели для $\phi_S = 6^\circ - 8^\circ$ (что соответствует склонению Солнца на период наблюдений 7–10 апреля) и $\phi_S \approx 0$ (наблюдения 20–21 сентября) дало результаты, наиболее близкие к наблюдаемым. На рис. 4.19 эти реализации представлены в сравнении с результатами самих наблюдений. Здесь также приведены рассчитанные по (4.16) коэффициенты парной корреляции R_c наблюдаемых и смоделированных кривых блеска.

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right)}{\left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right]^{0,5}} \quad (4.16)$$

x_i и y_i — значения блеска расчётной и физической моделей ГИСЗ.

Рассмотрим эти кривые блеска. Положение небольшого избытка излучения на кривой блеска при $\Delta\theta = 25^\circ - 28^\circ$ в ночь 9–10.04.86 близко к максимуму рассеяния излучения диффузной вогнутой антенной модели для ориентации её оси на 14° к востоку от направления с объекта на меридиан пункта наблюдений. Наилучшая корреляция кривых получена для $\phi_S = 8^\circ$, что как

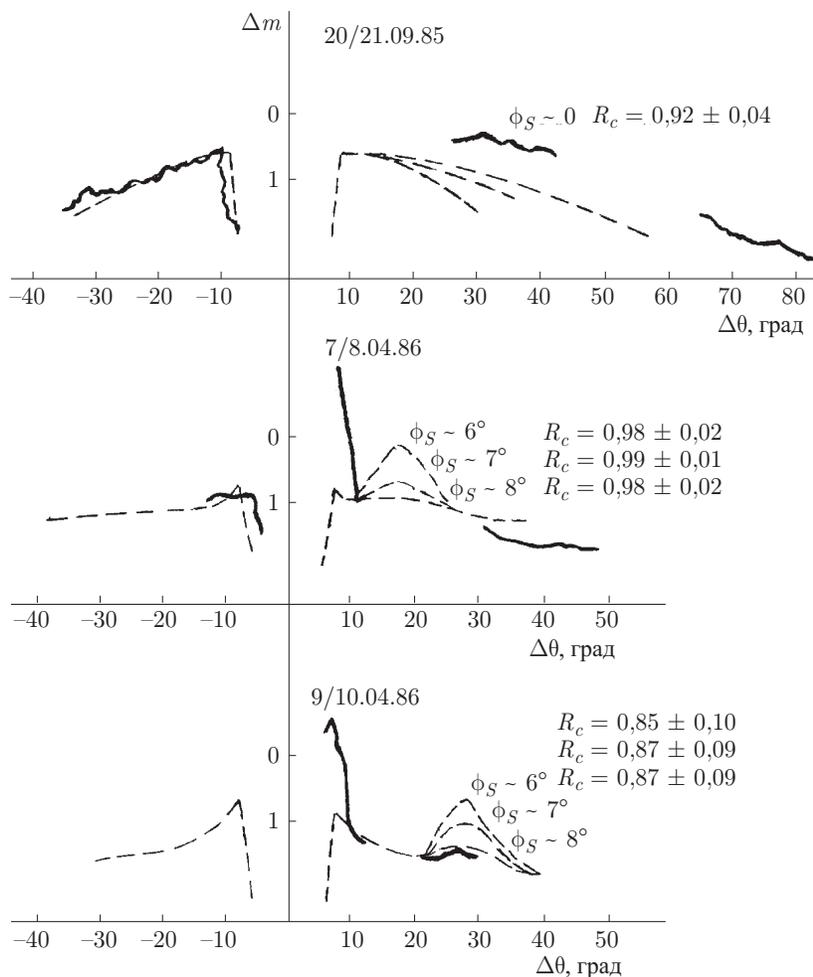


Рис. 4.19. Кривая блеска ГИСЗ «Горизонт» (сплошная линия) в сравнении с кривыми блеска физической модели (штрих) широт осветительного устройства, соответствующих склонению Солнца в периоды наблюдений. R_c — коэффициенты парной корреляции

раз и соответствует склонению Солнца в ту ночь. Максимум на кривой блеска 7/8.04.86 ($\delta = 7^\circ$) лучше коррелирует с кривой для $\phi_S = 7^\circ$ и ориентацией оси антенны на $8^\circ - 10^\circ$ к востоку от меридиана наблюдателя.

Необходимо отметить, что избытки блеска попадают при таких ϕ_S в объектив фотометра только при направлении оси

антенны на $6^\circ-8^\circ$ к северу от экватора. Это в действительности соответствует направлению в северные широты Земли $40^\circ-60^\circ$.

Кривая блеска ГИСЗ до истинной полуночи 20/21.09.86 ($\Delta\theta < 0$) весьма близка и хорошо коррелирует с ламбертовской расчётной и смоделированной кривыми. После полуночи ($\Delta\theta > 0$) наблюденная кривая проходит на $\approx 0,5^m$ выше смоделированной, хотя достаточно коррелирует с ней ($R_c = 0,92 \pm 0,04$). Вполне возможно, что западная часть корпуса ГИСЗ меньше в $\approx 1,6$ раза по размеру восточной (или на восточной находятся какие-то дополнительные элементы конструкции), хотя закон рассеяния света от неё не изменился.

Характерными чертами экспериментальных кривых блеска является увеличение блеска физической модели перед входом в тень и выходом из неё, когда в приёмное устройство частично попадает зеркальный поток от СБ. Такой же эффект имеется и на наблюденных кривых блеска ГИСЗ. Уменьшение значения показателя цвета $B-V$ во время такого резкого повышения блеска до $-0,2^m$ показывает, что она обусловлена явлением отражения света от кремниевых СБ.

Сравнение результатов наблюдений и физического моделирования фотометрических свойств ГИСЗ показывает, что они достаточно хорошо коррелируют между собой для выбранного типа модели, её ориентации и положения Солнца и наблюдателя в указанные периоды наблюдений. Ориентация модели не противоречит при этом ориентации ГИСЗ «Горизонт».

Используя смоделированную в этих экспериментах интерпретацию, автор Носова, 1990) получила некоторые конструктивные характеристики ГИСЗ «Горизонт» и элементов его конструкции:

- вектор нормали солнечных панелей объекта составляет с экватором угол $6,5^\circ \pm 1,5^\circ$;
- ось цилиндрического корпуса и антенны ГИСЗ «Горизонт» ориентированы на $6,5^\circ$ к северу и на 13° ($9-10.04.86$) к востоку от линии спутник — наблюдатель;
- эффективная площадь цилиндра $a_d S = 2,5-3,5 \text{ м}^2$, где a_d — альбеда диффузного рассеяния;
- светосила антенны порядка $1/4,5-1/5,0$.

Таким образом, при анализе фазовых зависимостей блеска ГИСЗ с привлечением результатов физического моделирования его фотометрических характеристик выявлены основные отражающие элементы его конструкции, определена их ориентация, сделана оценка эффективной отражательной площади и параметров антенны. Анализ подтвердил, что полученные при его осуществлении данные характеризуют ГИСЗ «Горизонт».

Для одного из ГИСЗ, наблюдавшегося в КраО в 1985–86 гг., получены кривые блеска в областях В, V, R (*Муртазов, Носова, Прокофьева, 1991а,б*). Характерными деталями этих кривых блеска явились во всех полосах вспышки с подъёмом блеска до $\Delta m \approx 2^m$, провалы до $1,5^m$. По расчётам обнаружилось совпадение фазовых кривых этого ГИСЗ, полученных с интервалом около месяца, с теоретическими фазовыми зависимостями для цилиндра. Показатель цвета В–V = $0,8^m$ для эмали ЭП-140, полученный в экспериментах по физическому моделированию, совпал с В–V вспышек. Ширина вспышек ($\Delta\theta = 10^\circ$) также совпала с полученной в экспериментах по физическому моделированию для образца № 2. Рассмотрение механизма, ответственного за появление вспышек, с учётом постоянства цветовых характеристик, позволило сделать заключение о том, что как при зеркальном отражении, так и при диффузном рассеянии наблюдалось излучение, рассеянное одной и той же поверхностью. Единственное положение оси цилиндра, которое может дать вспышку подобной формы, должно быть положение, близкое к линии пересечения картинной плоскости и плоскости земного экватора.

11.11.85 г. в течение ≈ 20 мин наблюдались две вспышки, что можно интерпретировать как отражение от двух поверхностей, расположенных под углом $2,4^\circ \pm 0,5^\circ$ друг к другу в спутникоцентрической системе координат. Световой поток от второй вспышки оказался слабее первой и цвет её — более синим.

Оценка размера поверхности спутника, от которой наблюдалась «белая» вспышка, была проведена по её яркости и углу расхождения рассеянного ею излучения

$$r_{sp}Dl = 2,7 \text{ м}^2, \quad (4.17)$$

где D и l — диаметр и длина цилиндра.

Уменьшение блеска в четыре раза, наблюдавшееся в ноябре 1985 г., свидетельствует о затенении элементами конструкции ГИСЗ друг друга. Тень попадает практически на всю яркую часть корпуса. Это свидетельствует о том, что размеры яркой и затенённой части близки. Выделив световой поток от затеняющей части, можно оценить эффективную площадь

$$a_dDl = 1,8 \text{ м}^2 \quad (4.18)$$

а из (4.17) $a_d/r_{sp} = 0,7$ и, считая $r_{sp} = 1$, получаем оценку площади затмевающей части

$$Dl = (2,7 \pm 0,9) \text{ м}^2.$$

Площадь затеняющей части также $(2,7 \pm 0,9) \text{ м}^2$.

Предполагая, что это антенна, её радиус оценивается как

$$r = (1,8 \pm 0,3) \text{ м}.$$

Таким образом, удалось качественно показать, что корпус ГИСЗ представляет собой цилиндр площадью $\approx 3 \text{ м}^2$, покрытый белой эмалью. Возможно наличие второго цилиндра или корпуса меньшего диаметра с углом между нормальными к основному $2,5^\circ$. ГИСЗ имеет выносную конструкцию (возможно, антенну) на расстоянии 9 м от цилиндра и площадью также около 3 м^2 . Такая конструкция ГИСЗ была подтверждена организацией-изготовителем.

На основании наблюдений значительных и быстрых колебаний блеска этого объекта, а также его показателей цвета 13/14.06.86 г. было сделано предположение, что ГИСЗ изменяет свою ориентацию, тогда как его СБ ориентируются автономно от объекта.

Сложная картина изменения блеска и цвета ГИСЗ анализировалась с помощью метода, аналогичного методу построения синтетических спектров.

Использовалась идея создания модели ГИСЗ, состоящей из трёх поверхностей, имеющих различные цветовые характеристики: 1 — белая, 2 — красная, 3 — синяя.

Тогда для каждой оценки блеска ГИСЗ

$$\Phi_{ik} = a\Phi_{1ik} + b\Phi_{2ik} + c\Phi_{3ik}, \quad (4.19)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ — число наблюдений, k — цветовая полоса, Φ_{ik} — поток от ГИСЗ в k -й полосе, Φ_{1ik} , Φ_{2ik} , Φ_{3ik} — потоки от поверхностей 1, 2, 3 в k -полосе.

Уравнения записывались для нескольких близких по времени i -х оценок блеска и решались с помощью вариаций коэффициентов a, b, c . Данная процедура проводилась до получения минимальной разности между правой и левой частью уравнения (4.36), а также повторялась для разных участков кривой блеска ГИСЗ.

Подобный метод позволил показать, что выбор цвета поверхностей 1, 2, 3 хорошо удовлетворяет результатам наблюдений для следующих оптических классов материалов покрытий (п. 4.1.б): поверхность № 1 (белая) — классы покрытий 1,6; поверхность № 2 (красная) — класс покрытий 4; поверхность № 3 (синяя) — класс покрытий 5.

На рис. 4.20 представлены результаты наблюдений ГИСЗ в полосах В, V, R (точность $0,03^m$) совместно с эксперимен-

тальными спектрами диффузного рассеяния образцов материалов покрытий ГИСЗ из таких классов, а также спектром Солнца. Здесь результаты наблюдений в полосах системы Джонсона пересчитаны в энергетические величины и нормированы к серединам полос. Оценены также энергетические потоки от поверхностей полученных оптических классов для характерных размеров ГИСЗ (Муртазов, Носова, Прокофьева, 1991б) в системе V.

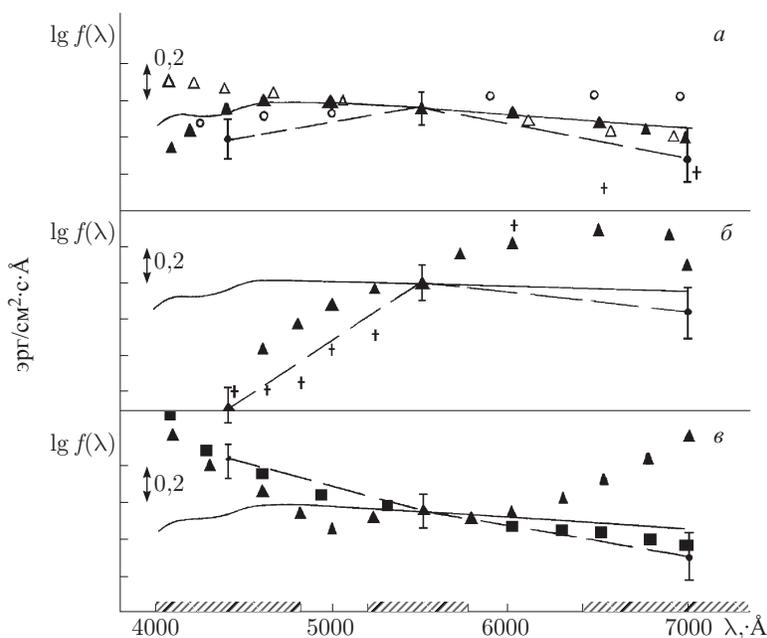


Рис. 4.20. Результаты BVR-фотометрии ГИСЗ в сравнении со спектрами материалов покрытий ГИСЗ и поверхностями космического мусора: а) Δ — белая стеклоткань, \blacktriangle — эмаль, \circ — металл; б) \blacktriangle — армидная стеклоткань, \dagger — коричневая ткань; в) \blacksquare — СБ, \blacktriangle — синяя металлическая поверхность. Сплошная линия — спектр Солнца

Далее из каждого класса были выбраны отдельные материалы покрытий, для которых и проводилась вероятностная оценка соответствия наблюдениям.

Поверхность 1: класс 1 — белая краска, белая стеклоткань, класс 6 — металл.

Поверхность 2: класс 4 — армидная металлизированная стеклоткань, коричневая ткань.

Поверхность 3: класс 5 — кремниевые солнечные панели.

Для спектров этих покрытий и полученных результатов В, V, R — фотометрии рассчитывались парные коэффициенты корреляции R_c и критерий χ^2 .

Были найдены также веса P_i спектров покрытий относительно значений блеска, полученных из наблюдений

$$X = P_1 X_1 + P_2 X_2 + \dots + P_N X_N, \quad (4.20)$$

$$\sum_i^N P_i = 1,$$

где X — измеренное значение блеска, X_i значения блеска, рассчитанные для покрытий, P_i — их веса.

Затем по значениям P_i рассчитана информационная энтропия для каждого покрытия относительно наблюдений

$$H = - \sum_i^N P_i \log_2 P_i. \quad (4.21)$$

Поскольку энтропия H характеризует неопределённость состояния системы, в нашем случае наиболее вероятно наличию какого-либо материала покрытия наблюдаемой поверхности соответствует наименьшее её значение.

Таким образом, для материалов покрытий поверхностей ГИСЗ имеем:

Поверхность 1.

1. Белая краска ЭП-140

$$R_c = 0,73 \pm 0,15, \quad \chi^2 (P > 0,30) = 8,48, \quad H = 3,89 \text{ бит.}$$

1. Белая стеклоткань

$$R = 0,25 \pm 0,03, \quad \chi^2 (P > 0,005) = 20,2, \quad H = 4,21 \text{ бит.}$$

6. Металл

$$R_c = -0,01 \pm 0,38, \quad \chi^2 (P > 0,02) = 14,3, \quad H = 4,81 \text{ бит.}$$

Поверхность 2.

4. Армидная металлизированная стеклоткань

$$R_c = 0,82 \pm 0,11, \quad \chi^2 (P > 0,05) = 16,05, \quad H = 3,72 \text{ бит.}$$

4. Коричневая ткань

$$R_c = 0,73 \pm 0,15, \quad \chi^2 (P < 0,001) = 34,54, \quad H = 3,88 \text{ бит.}$$

Поверхность 3.

5. Солнечные панели

$$R_c = 0,98 \pm 0,01, \quad \chi^2 (P > 0,90) = 3,12, \quad H = 3,52 \text{ бит.}$$

Таким образом, приведённые результаты позволяют сделать вывод о том, что (Муртазов, Носова, Прокофьева, 1991б):

- поверхность 1 ГИСЗ 7421 покрыта белой краской ЭП-140;
- поверхность 2 ГИСЗ 7421 покрыта армидной металлизированной стеклотканью;
- поверхность 3 ГИСЗ 7421 — кремниевые солнечные панели.

Наличие таких материалов покрытий элементов конструкции ГИСЗ 7421 подтверждено организацией-изготовителем.

Результаты, полученные автором, использованы при разработке аппаратуры дистанционной диагностики характеристик и технического состояния КА. Аппаратно-программный комплекс отражательно-излучательных характеристик КА включает в себя основные модули имитационного моделирования: построение оптико-геометрической и теплофизической моделей КА; моделирование длительного воздействия факторов ОКП на деградацию оптических характеристик их покрытий; моделирование фотометрических и тепловых портретов и т. д. (Анфимов, Васильев и др., 2001).

Методы расчёта изменения оптических характеристик внешних покрытий (интегральных Δa и спектральных b_λ) основаны на использовании имитационного моделирования повреждения покрытий различными видами излучений в ОКП по результатам экспериментальных исследований.

Таблица 4.8. Изменение альbedo покрытий техногенных поверхностей в ОКП

№	Тип покрытия	Альbedo a	Условия эксплуатации	Оценка Δa
1	АК-573	0,24	350 км, 12 лет	0,13
	АК-573	0,24	1000 км, 5–7 лет	0,21
	АК-573	0,24	геостац. орбита, 7 лет	0,60
2	АК-512 бел.	0,25	геостац. орбита, 7 лет	0,40
3	КО-5191	0,20	1000 км, 5–7 лет	0,27
4	ТСОН-СОТ «бц»	0,21	1000 км, 7 лет	0,33
5	ТСОН-СОТ «бц»	0,21	геостац. орбита, 7 лет	0,40
6	ОСО-С	0,13	геостац. орбита, 7 лет	0,25
7	ПЭТФ/А1	0,20	1000 км, 5–7 лет	0,12

Весьма показательным является определение формы, элементов конструкции и ориентации космических объектов по совместному анализу результатов фотометрических наблюдений и физического моделирования. В 1996–97 гг. на станции «Космотэн» Специальной астрофизической обсерватории РАН получен обширный массив результатов фотометрических наблюдений американского секретного спутника Ferret-D, никаких сведений о форме, размерах и ориентации которого не имелось (Выгон, Багров, Грошёв, 1998). Каждая полученная кривая блеска содержала 3–5 тыс. значений яркости. Одновременно проводились координатные наблюдения для привязки некоординатных измерений к точкам на траектории.

Все кривые блеска спутника Ferret-D представляют собой суперпозицию гладкой функции и высокочастотной составляющей, на которые в некоторых случаях налагаются узкие участки очень быстрого увеличения яркости (рис. 4.21).

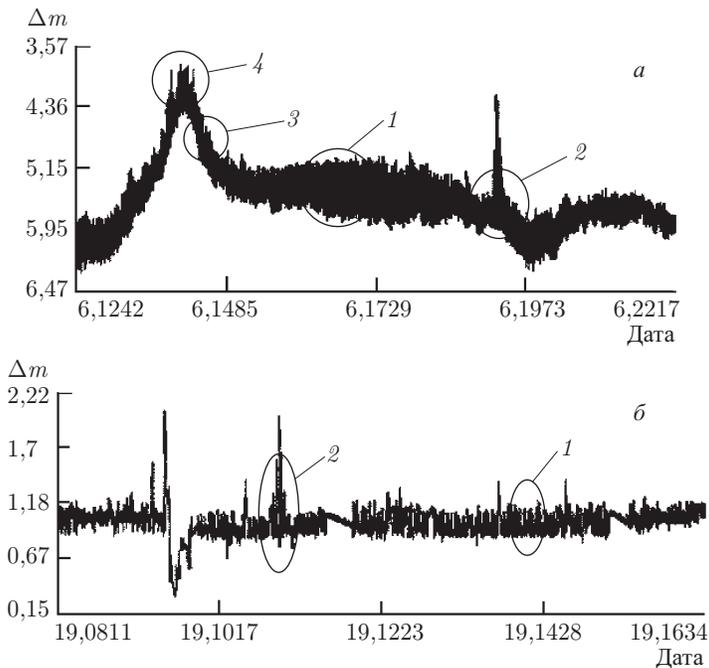


Рис. 4.21. Кривая блеска (Δm) ИСЗ Ferret-D во время утреннего (а) и вечернего (б) проходов в пункте наблюдений

Анализ кривых на этих рисунках позволил сделать ряд выводов.

Во-первых, однозначно определен основной период вращения ИСЗ.

Во-вторых, из существования постоянной структуры изменения яркости на протяжении одного периода, состоящей из шести ярко выраженных и равноотстоящих друг от друга отдельных пиков, следует наличие в форме спутника симметрий вращения вплоть до шестого порядка.

В-третьих, отдельные пики на кривой блеска, соответствующие различным участкам вращающейся отражающей поверхности, имеют, в общем случае, различные форму и амплитуду, изменяющиеся с ракурсом, причём один из них сохраняет высокую амплитуду в широком диапазоне углов наблюдения. Форма индивидуальных пиков яркости на рис. 4.22, вызванных отражением от отдельных граней корпуса, а также слабая зависимость их амплитуды от фазового угла указывают на диффузный характер рассеяния на материале корпуса.

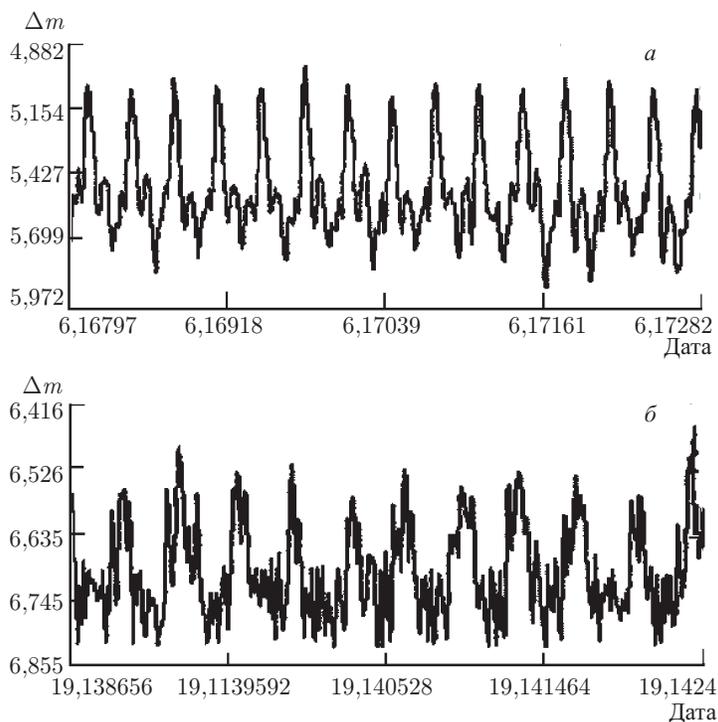


Рис. 4.22. Участок 1 на утренней (а) и вечерней (б) кривых блеска

Однако, при некоторых фазовых углах яркость бликов от боковых граней ИСЗ резко возрастает при сохранении минимальной (между бликами) общей яркости (рис. 4.23). Скорость нарастания амплитуды пиков и краткая их продолжительность

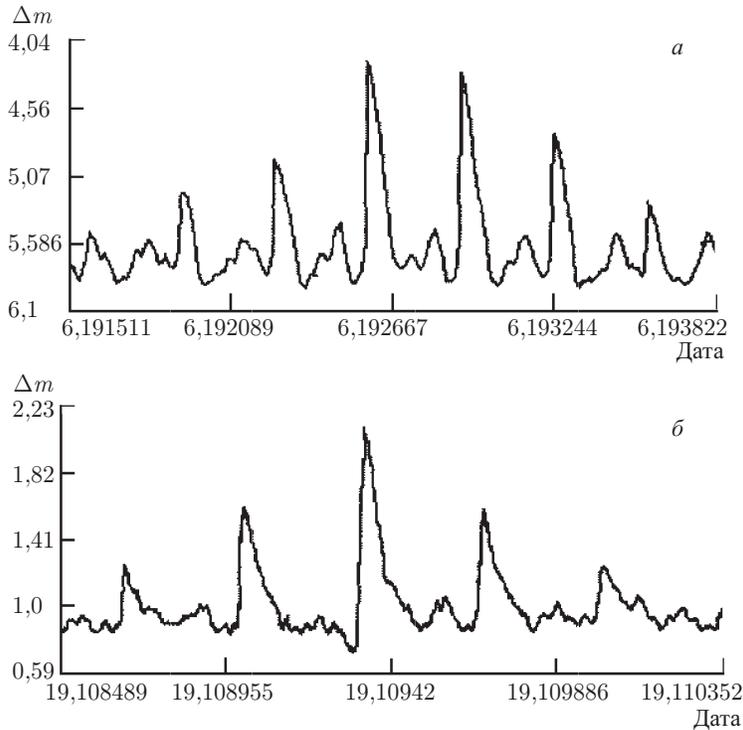


Рис. 4.23. Зеркальное отражение от боковых граней ИСЗ Ferret-D: участки 2 на утренней (а) и вечерней (б) кривых блеска из рис. 4.21

свидетельствуют о зеркальном характере отражений. Совпадение по положению на кривых блеска зеркальных бликов и диффузных максимумов позволяют предположить, что материал корпуса ИСЗ рассеивает свет в основном зеркально, но с присутствием диффузной компоненты.

Общий предварительный качественный вывод: боковая поверхность наблюдавшегося объекта представляет собой шестигранник, на по крайней мере 5 гранях которого расположены некоторые функциональные элементы. Грани покрыты панелями солнечных батарей, шестая грань имеет отличные от других граней отражательные характеристики.

Проведённые автором эксперименты по физическому моделированию показали, что предположение о форме ИСЗ оказались правильными. Зеркальная составляющая пиков, имеющая амплитуду в 3–4 больше диффузной, появляется в модельных экспериментах при ориентации модели, соответствующей ориентации ИСЗ Ferret-D, определённой из наблюдений. Такое соотношение характерно для материала элементов СБ при общем значении альбедо 0,1–0,18 и ширине зеркально отражённого пучка $\approx 4^\circ$ (Крейнин, Григорьева, 1979; Курышев, Муртазов, 1990; Мурина, Нежданова, 1995).

В дальнейшем авторами (Выгон, Багров, Грошёв, 1998) были определены остальные параметры формы ИСЗ Ferret-D и выявлено его назначение.

Проведённая работа показала, что совместный анализ результатов физического моделирования и огромного массива фазовых кривых, полученных различными наблюдателями для различных объектов, позволяет проводить их идентификацию при проведении оптического мониторинга ОКП.

Ещё более широкими возможностями метод физического моделирования обладает при наличии спектров объектов, наблюдаемых в ОКП. В этом случае удаётся получить данные о материалах поверхностей объектов.

Для выяснения причин неработоспособности геостационарного спутника «Ямал-1» на станции «Космотэн» проводились фотометрические и спектральные его наблюдения, поскольку в отсутствие телеметрической информации только они являются источником данных об объекте (Багров и др., 2000). На рис. 4.24 представлена кривая блеска этого объекта в одну из наблюдательных ночей.

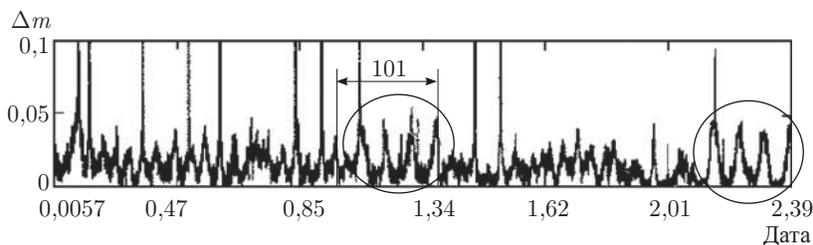


Рис. 4.24. Нормированная кривая блеска ИСЗ «Ямал» во время одного из прохождений в пункте наблюдения

Для интерпретации изменений блеска авторами была создана математическая модель фотометрического сигнала, учитывающая условия видимости и конструкцию спутника:

- реальные координаты объекта, Солнца и пункта наблюдений на все моменты регистрации информации;
- наличие диффузно отражающих боковых граней в комбинации с вариантами сложенных и раскрытых параболоидов радиоантенн с покрытиями ЭВТИ;

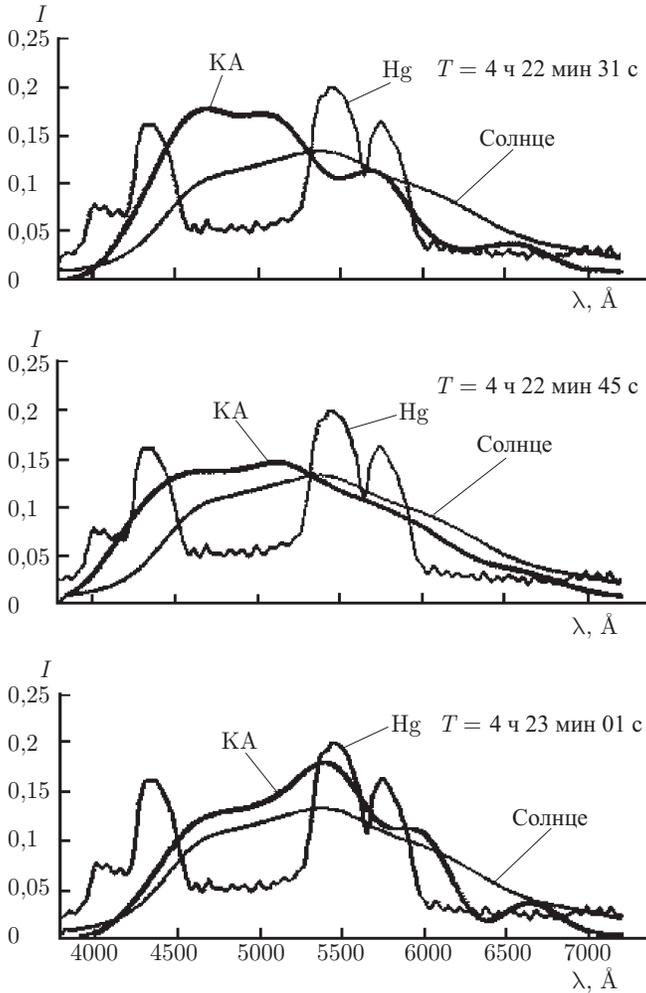


Рис. 4.25. Спектры ГИСЗ «Ямал» во время некоторых ярких вспышек в сравнении со спектром Солнца и калибровочной ртутной лампы

- наличие зеркально отражающих участков терморегулирующих покрытий K208Ср;
- наличие зеркально отражающих участков углепластиковых покрытий активных поверхностей радиоантенн;
- наличие зеркально отражающих плоских квадратов внешних поверхностей сложенных СБ.

В модели использовались все полученные данные по спектральным коэффициентам отражения материалов рассеивающих поверхностей.

Кроме фотометрических данных авторам удалось получить спектры геостационарного спутника «Ямал» в нескольких отдельных ярких вспышках (рис. 4.25).

Совместный анализ наблюденных фотометрических, спектральных кривых и смоделированных кривых блеска дал возможность определить периоды вращения спутника «Ямал», ориентацию осей вращения. Вид спектра однозначно соответствовал виду спектров покрытий, полученных автором ранее (Муртазов, 1990). Амплитуда зеркальной вспышки от панели СБ оказалась существенно меньше, чем должна была бы дать полностью раскрытая батарея. Из этого был сделан вывод, что панели СБ находились в стартовом (нераскрытом) состоянии, причём внешняя створка была расположена рабочей поверхностью наружу. Таким образом, была выяснена причина неработоспособности геостационарного спутника «Ямал».

Глава 5

ОХРАНА И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА КАК НОВОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НИШИ ЗЕМНОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ

5.1. Развитие методов и средств охраны и рационального использования околоземного космического пространства в процессе его освоения

В конце II тысячелетия человечество, похоже, окончательно выбрало для себя стратегию освоения ОКП и экспансии в Солнечную систему.

Здесь следует отметить, что если Солнечная система будет находиться в стадии только более-менее активных исследований со стороны земной цивилизации ещё достаточно долго, то резкий прорыв в технологическом освоении ОКП произойдёт, видимо, уже в наступившем XXI веке.

Характерной особенностью земной цивилизации в современную эпоху является её экстенсивное развитие по экспоненте (некоторые авторы считают, что развитие идёт даже быстрее экспоненциального) (*Гиндилис, 1997; Горшков, 1995; Лесков, 1996, 1997*). При современных темпах роста народонаселения, энергопотребления и промышленной переработки земного вещества весьма быстро достигаются пределы развития, за которыми дальнейший рост становится невозможным. Более строгие модели (*Моисеев, 1988, 1996; Шкловский, 1987*) показывают, что при сохранении современных тенденций развития уже до середины XXI века наступит критическая ситуация, вызванная истощением ресурсов, падением промышленного производства, резким сокращением пищи на душу населения при одновременном резком усилении загрязнения окружающей среды.

При этом человечество в своём диапазоне обитания, в своей экологической нише является бесконкурентным монополистом. Человечество как вид потребляет ничего взамен не отдавая, вследствие чего не находится в равновесии с окружающей его

природой. Из-за этого оно неизбежно переживает экологические кризисы, то есть можно считать, что нынешний кризис закономерен (Черняев, 1999).

Параметры современного экологического кризиса представлены в табл. 5.1 (Лосев, 2001), хотя автор по некоторым позициям (например, причинам истощения озонового слоя и тенденций их изменения) имеет другое мнение.

Выходов для человеческого вида два:

1) деградация вида, прекращение его развития, утрата позиций монопольного положения. Весьма вероятно — полное исчезновение.

2) расширение экологической ниши, соответствующее изменение образа получения и переработки энергии, приспособление к новым условиям, сохранение возможностей развития и монопольного положения в новой нише.

Таблица 5.1. Изменения окружающей среды в конце XX века и тенденции на первую четверть XXI века

Характеристика	Тенденция в 1972–1995 гг.	Сценарий 2030 г.
Сокращение площади естественных экосистем	Сокращение со скоростью 0,5–1% на суше, к началу 90-х гг. их сохранилось ок. 37%	Сохранение тенденции, приближение к почти полной ликвидации на суше
Потребление чистой первичной биопродукции человеком	Рост потребления: 40% на суше, 25% — глобальный	Рост потребления: 80–85% на суше, 50–60% — глобальный
Изменение содержания парниковых газов в атмосфере	Рост концентрации от десятых до целых процентов ежегодно	Рост концентрации, ускорение роста концентрации углекислого газа и метана за счёт ускорения разрушения биоты
Истощение озонового слоя	Истощение на 1–2% в год озонового слоя, рост площади озоновых дыр	Сохранение тенденции даже при прекращении выбросов хлорфторуглеродов
Сокращение площади лесов, особенно тропических	Сокращение со скоростью 13 млн га в год, лесовосстановление относится к сведению как 1:10	Сохранение тенденции. В тропиках 9–11 млн кв. км, сокращение площади лесов умеренного пояса
Опустынивание	Расширение площади засушливых земель, составляющих 40% суши, рост техногенного опустынивания, токсичных пустынь	Сохранение тенденции, возможен рост темпов за счёт уменьшения влагооборота на суше в результате вырубки лесов и накопления загрязнителей в почвах

Продолжение табл. 5.1

Характеристика	Тенденция в 1972–1995 гг.	Сценарий 2030 г.
Деградация земель	Рост эрозии (24 млрд т ежегодно), снижение плодородия, накопление загрязнителей, засоление	Сохранение тенденции, рост эрозии и загрязнения, сокращение сельскохозяйственных земель на душу населения
Повышение уровня океана	Подъём уровня на 1–2 мм/год	Сохранение тенденции, возможно ускорение подъёма уровня до 7 мм/год
Стихийные бедствия, техногенные аварии	Рост числа на 5–7%, рост ущерба на 5–10%, рост количества жертв на 6–12% в год	Сохранение и усиление тенденций
Исчезновение биологических видов	Скорость исчезновения в 100–1000 раз выше, чем когда-либо наблюдали на Земле	Усиление тенденции по мере разрушения биосферы
Качественное истощение вод суши	Рост объёма сточных вод, точечных и площадных источников загрязнения, числа поллютантов и их концентрации	Сохранение и нарастание тенденций, 2 из 3 человек будут испытывать недостаток воды
Накопление поллютантов в средах и организмах, миграции в тропических цепочках	Рост массы и числа поллютантов, накопленных в средах и организмах, рост радиоактивности среды, «химические бомбы»	Сохранение тенденций и возможное их усиление
Ухудшение качества жизни, рост числа заболеваний, связанных с разрушением экологической ниши человека и загрязнением окружающей среды, в том числе генетических, появление новых болезней	Рост бедности, нехватка продовольствия, высокая детская смертность, высокий уровень заболеваемости, необеспечиваемость чистой питьевой водой в развивающихся странах, рост числа генетических заболеваний, рост аварийности, рост потребления лекарств, рост аллергических заболеваний в развитых странах, пандемия СПИД, понижение иммунного статуса	Сохранение тенденций, рост нехватки продовольствия, рост числа заболеваний, связанных с экологическими нарушениями, в том числе генетических, расширение территории инфекционных заболеваний, появление новых болезней

Продолжение табл. 5.1

Характеристика	Тенденция в 1972–1995 гг.	Сценарий 2030 г.
Глобальное распространение супертоксикантов через трофические системы	Нарушение эндокринной системы человека, ухудшающее систему воспроизводства, работу мозга и других жизненно важных органов человека	Нарастание тенденции, распространение заболеваний, связанных с эндокринной системой, рост числа бездетных пар
Искусственная интродукция и случайная инвазия чужеродных видов в экосистемы	Нарушение экосистем, перенос вредителей и болезней растений, животных и человека, сокращение биоразнообразия	Нарастание процесса инвазии
Изменения в Мировом океане: разрушение рифов, сокращение мангровых экосистем, истощение запаса рыбы в результате интенсивного лова, сокращение стада китов, загрязнение внутренних морей и прибрежных вод, «красные приливы»	Быстрые изменения всех характеристик	Нарастание изменений

Научным сообществом обсуждаются и другие возможные пути развития человечества. Крайние точки зрения сводятся к идеям «автотрофности» и «назад к природе».

Первая сводится к созданию целиком искусственной, независимой от состояния биосферы, цивилизации (сторонником чего был К.Э. Циолковский). При этом часть авторов представляет себе будущее человечества в этом случае возможным только при отказе от использования современной невозполнимой энергетики, использующей сжигание углеводородов, и поиске новых экологически чистых источников энергии, например, энергии Солнца. Это отражено в проектах искусственных автотрофных сфер обитания, независимых от биосферы: например — проект сферы Дайсона около Солнца, а также осуществлённый в 1991–93 гг. проект замкнутой экологической системы «Биосфера-2».

Обращение человечества назад к природе, видимо, в настоящий момент уже невозможно: для того, чтобы жить в динамическом равновесии с природой, необходимо поддерживать численность населения Земли на уровне порядка 500 млн человек,

либо сократить потребности каждого жителя в развитых странах более чем на порядок, что в обоих случаях нереально.

Таким образом, освоение околоземного космического пространства, видимо, является на сегодняшний день основным способом выживания человека как вида, связанным с расширением его экологической ниши и занятия в ней монопольного положения.

Здесь следует отметить, что именно с выходом в околоземное пространство (и далее в Космос) часто связывается надежда на дальнейшее длительное экспоненциальное развитие цивилизации. Однако, экспоненциальный рост, будучи ничем не ограниченным, даже при весьма умеренных темпах очень быстро приведёт к исчерпанию ресурсов Метагалактики (*Гиндилис*, 1997; *Шкловский*, 1987). Длительный экспоненциальный рост невозможен и по ряду других причин. Чтобы обеспечить постоянно увеличивающийся прирост массы и энергии из окружающего пространства, цивилизация должна осуществлять экспансию с постоянно возрастающей скоростью. Когда эта скорость достигнет скорости света, экспоненциальный рост прекратится и цивилизация сможет наращивать ресурсы не быстрее, чем по закону t^3 , а затем и t^2 (здесь t — время). Но и это будет по-прежнему экстенсивное развитие. В этом случае время освоения Галактики составит всего лишь 10^6 лет, а накопленный человечеством опыт не может отрицать принципиальную невозможность такого процесса (*Шкловский*, 1987).

Большинство авторов всё-таки считает, что такое экстенсивное развитие цивилизации должно рассматриваться лишь как временный этап. По окончании его цивилизация должна перейти к устойчивому интенсивному развитию, находясь в характерном для сложных систем состоянии гомеостатического равновесия с тонкой регуляцией основных жизненных процессов, поддержанию жизненно важных параметров в заданных пределах (*Гиндилис*, 1997; *Горшков*, 1995; *Урсул*, 1996).

Можно сделать следующие выводы (*Школенко*, 1997):

— без обращения к космосу человечество рано или поздно остановится у пределов, установленных конечными пространственными и ресурсными параметрами Земли. Без их преодоления общество обречено на деградацию;

— крайняя ориентация на выход в космическое пространство также чревата гибелью, так как наша белковая жизнь может существовать в весьма узком диапазоне физических параметров окружающей среды;

— таким образом, необходимо осуществление геоцентрического развития космонавтики при освобождении Земли от предпосылок экологического кризиса. То есть при расширении экологической ниши человечества требуется разумное соединения «космизма» с экологизмом.

При этом нужно учесть, что одновременно должно быть сформировано общество, которое сможет обеспечить условие коэволюции человека и биосферы, способного создать на Земле ноосферу (Моисеев, 1988, 1996; Черняев, 1999 и т.д.).

Все эти рассуждения, а также анализ причин современного экологического кризиса заставляют наряду с выработкой принципов интенсивного освоения ОКП выдвинуть ряд критериев, следование которым не даст возможность создать подобный кризис и в нём.

Выше, в п. 2.3 настоящей работы приведены результаты прогноза числа искусственных объектов в ОКП на период до 2003 г. (Назаренко, Чернявский, 1995), согласно которому количество как самих объектов, так и их осколков будет монотонно нарастать. Следует отметить, что этот прогноз полностью оправдался. Здесь же выполнен прогноз числа искусственных объектов в ОКП на период до 2023 г. в зависимости от вариантов технической политики человечества в отношении запуска космических объектов (рис. 5.1). Здесь техническая политика характеризуется отношением K числа ежегодно образующихся объектов к средней оценке за предшествующие годы.

В работе рассмотрено 4 варианта технической политики:

1) $K = 1,0$ — соответствует тенденции образования новых объектов (480 объектов в год), характерной для конца 80-х гг. прошлого столетия;

2) $K = 0,8$ — соответствует тенденции середины 90-х гг., когда в силу ряда причин число запусков искусственных космических объектов уменьшилось;

3) $K = 0,4$ — оценка может быть реализована при уменьшении числа отделяемых технологических фрагментов, возвращении ракет и сокращения взрывов;

4) $K = 0,1$ — достигается при полном исключении взрывов и резком сокращении числа запусков.

Данные, приведённые на рис. 5.1, показывают, что для всех вариантов технической политики освоения ОКП (кроме $K = 0,4$) число каталогизированных объектов в космосе будет расти. Отсюда следует, что для прекращения дальнейшего роста числа объектов, грозящих человечеству большими неприятностями, необходимо уменьшить интенсивность образования новых объ-

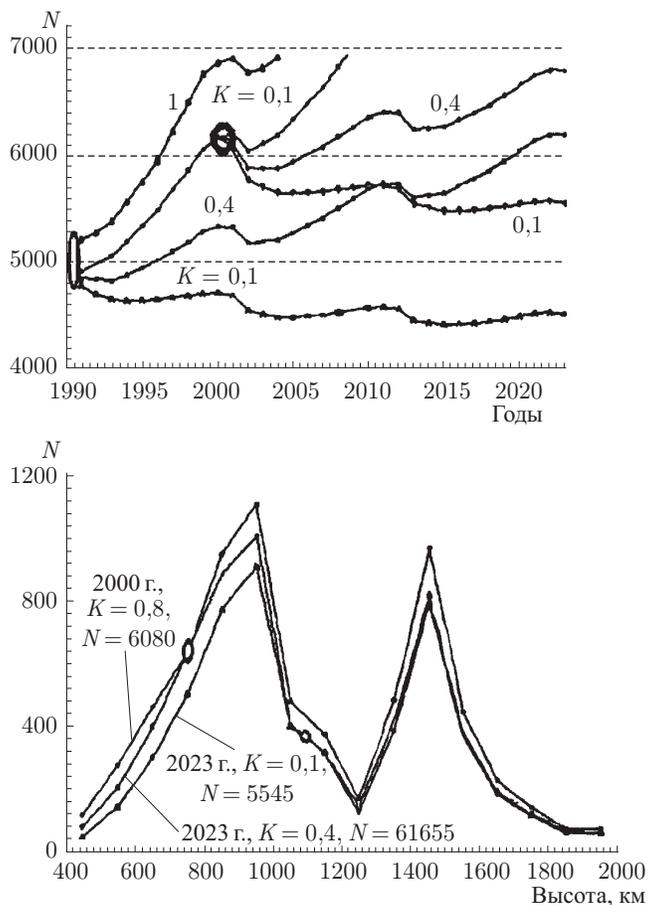


Рис. 5.1. Прогноз числа объектов в ОКП при различных вариантах технической политики освоения ОКП

ектов на порядок. На рисунке кружочками отмечены значения высот, на которых прогнозная и исходная плотность объектов остаются постоянными. Видно, что уменьшение интенсивности образования новых объектов приводит к уменьшению их числа только на малых высотах. На высотах, больших 1000 км их число будет расти. Этот результат имеет принципиальное значение. Он свидетельствует о том, что для уменьшения тенденции роста числа техногенных объектов на высотах, больших 1000 км, необходимы дополнительные меры — полное исключение образования фрагментов и возвращение отслуживших срок космических аппаратов на Землю.

Кроме того, такими же (если не более быстрыми) темпами растёт загрязнение ОКП как другими продуктами космической деятельности (отработанное топливо и окись алюминия, загрязнение ОКП собственной атмосферой больших КА и особенно орбитальных космических станций, электромагнитное излучение КА и т. д.), так и собственно продуктами деятельности цивилизации (электромагнитные излучения широкого диапазона частот, отходы техногенных катастроф).

В настоящее время охрану ОКП можно определить как систему международных мероприятий (научно-технологических, правовых, экономических, просветительных) по предотвращению попадания в ОКП техногенных загрязнений (как в виде излучений различной частоты, так и разнообразного мусора), изменяющих свойства ОКП таким образом, что его воздействие на биосферу после этого наносит последней необратимый вред (*Murtazov, 2003*).

В связи с этим Международное сообщество уже начало выработать соглашения, направленные на охрану ОКП как глобального компонента окружающей среды. Так, один из пунктов Венской декларации по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях (ЮНИСПЕЙС-III) гласит: а) расширение научных знаний о ближнем и дальнем космосе путём развития сотрудничества в таких областях, как астрономия, космическая биология и медицина, космическая физика, изучение объектов в ОКП и исследование других планет; б) улучшение охраны среды ближнего и дальнего космоса путём углубления исследований в области применения мер по уменьшению засорённости космического пространства и практического осуществления таких мер (*ООН, 1999*).

В рамках разработки методов охраны ОКП необходимо найти механизм воздействия солнечной активности на околоземное пространство и через него на биосферу с целью если не управлять, то прогнозировать последствия такого воздействия. К сожалению, природа физического механизма воздействия солнечной активности на биосферу до сих пор не выяснена, поскольку попадающее в нижнюю атмосферу видимое излучение, как и полное солнечное излучение, изменяется лишь на доли процента. Известно, что та часть солнечного излучения, которая способна влиять на геофизические процессы, поглощается в ОКП и не доходит до поверхности Земли, но эффект за счёт процессов турбулентности передаётся в нижнюю атмосферу (*Иванов-Холодный, 2000*).

В связи с этим в настоящее время проводится постоянный контроль «космической погоды», связанной с состоянием ОКП, Солнца, условиями в солнечном ветре. Её параметрами являются температура и концентрация компонент низкоэнергетической плазмы, магнитные и электрические поля и токи, спектральный состав электромагнитных излучений и энергетические спектры заряженных частиц различного происхождения (*Климов и др., 2000*).

Далее, к методам охраны ОКП следует отнести: работы по уменьшению воздействия электромагнитного излучения различных передатчиков, а также линий передачи электроэнергии на Земле; запрещение испытаний ядерных взрывов, предотвращение техногенных катастроф на Земле.

Весьма обширные работы по охране ОКП необходимы при эксплуатации космической техники. Это: уменьшение загрязнения ОКП и природной среды вредными продуктами сгорания ракетного топлива и его несгоревшими остатками, оптимизация объёма собственной атмосферы космических аппаратов; уменьшение количества образующегося мусора при запусках космической техники; предотвращение неуправляемого падения космических аппаратов и их обломков на Землю, аварий и столкновений объектов в ОКП.

Однако можно отметить, что в документе «Основные направления космической деятельности России в 2001–2010 гг.» (Постановление Правительства РФ № 280 от 30.03.2000 г.) весьма мало говорится об охране и рациональном использовании самой среды, в которой происходит эта деятельность — ОКП. Космическая деятельность России в этой и разрабатываемой на 10 лет программах концентрируется на следующих перспективных направлениях:

- концентрация усилий на конкурентоспособных на мировом и внутреннем рынках космических проектах;
- переход к малым КА различной размерности и целевого назначения;
- применение широкой международной интеграции, в т.ч. в фундаментальных космических исследованиях и пилотируемых полётах (имеется в виду МКС);
- модернизация космической техники и наземной инфраструктуры, обеспечение их соответствия повышенным экологическим требованиям.

Реальность XXI века требует новой стратегии космической деятельности в ОКП для реализации потенциала космонавтики в целях выживания и развития цивилизации путём достижения

баланса интереса человека, общества, государств, всего мирового сообщества. Автор работы (*Кричевский, 1999*), лётчик-космонавт России, считает, что для радикального улучшения экологических характеристик космической деятельности человечества необходимы:

- систематические исследования и осознание исторического опыта, реальной ситуации, унаследованных проблем и тенденций развития;
- усиление правового регулирования и контроля за космической деятельностью со стороны гражданского общества с активным использованием всех демократических институтов и международного сотрудничества, с учётом опыта применения социальных технологий в других сферах деятельности;
- разработка и реализация экологической политики через систему экологического управления в соответствии со стратегией и принципами устойчивого развития.

Здесь можно перечислить основные положения, разрабатываемые мировым сообществом в отношении техногенного мусора в околоземном пространстве. Компетентные авторы отмечают, что (*Рыхлова, 1998*): 1) на сегодня ни одна страна не готова начать публичную дискуссию по поводу засорённости космоса техногенными отходами, что связано, по-видимому, с отсутствием Международного юридического законодательства по околоземному пространству (об этом свидетельствуют, например, инциденты между Казахстаном и Россией по поводу взрывов ракет «Протон» при старте в Байконуре в 1999 г.); 2) ни одна из крупнейших космических держав не имеет полноценной возможности отслеживать все объекты на околоземных орбитах, распознавать их по источникам происхождения и назначению.

Несмотря на это, должна существовать возможность экспертной оценки состояния околоземного пространства на любой момент времени, для чего требуется решить ряд задач.

Это, во-первых, задача совершенствования и создания новых средств и методов обнаружения, наблюдения и распознавания малоразмерных и слабоконтрастных объектов в околоземном пространстве (современные позволяют регистрировать объекты более 1 см в диаметре на низких и более 1 м в диаметре на геостационарных орбитах) — в том числе и космического базирования.

Далее, создание и постоянное обновление банка данных о засорённости околоземного пространства и пространственном распределении компонентов естественных и техногенных осколков.

Особенно это касается фрагментов, образовавшихся в результате взрывов и разрушений на орбите.

Разработка эволюционных процессов засорения в общем виде: прогнозирование ситуации в результате проведения ранее объявленных космических программ; моделирование эволюции орбит нефункционирующих космических объектов, их отдельных фрагментов; моделирование процессов образования осколков в результате разрушений на орбите, процессов образования и динамики пылевой и газовой фракций; моделирование последствий запусков для верхней атмосферы и поверхности Земли и т. д.

Развитие техники уменьшения количества мусора при запусках и очищении околоземного пространства. Пока в этом направлении развивается технология защиты космических аппаратов от соударений с частицами естественного и техногенного происхождения (например, российский проект защиты международной космической станции путём установки на её поверхностях специальных экранов (*Мецержаков, 2000*)).

В настоящее время околоземное пространство эксплуатируют Китай, Россия, США, Япония, Европейское и Японское космические агентства. Сюда уже возможно отнести и Индию.

Российское авиационно-космическое агентство развивает концепцию модели «причина-следствие» (*Назаренко, Чернявский, 1995; Рыхлова, 1995, 1998; Хуторовский и др., 1995; 1998*) от источников появления мусора в околоземном пространстве, через проблемы его мониторинга, до моделей очистки и международной кооперации. Российская Межгосударственная корпорация «Вымпел» и Научно-исследовательский центр «Космос» проводят работы по каталогизации наблюдаемых искусственных объектов, их идентификации с каталогами США. Создан архив опасных сближений, позволяющий прогнозировать столкновения на орбитах (*Хуторовский и др., 1995; 1998*). Институт астрономии РАН проводит как теоретические разработки методов и средств обнаружения космического мусора, так и активные наблюдения его компонентов.

НАСА проводит долговременную национальную политику по отношению к космическому мусору, тесно сотрудничая со всеми заинтересованными в этом ведомствами, рис. 5.2.

Европейское космическое агентство создало базу по космическому мусору, в основе которой лежат ведущиеся в Англии с 1957 г. списки всех запусков космических аппаратов. Кроме того, для европейской астрономии традиционны исследования космической пыли.

Японское общество аэронавтики и космических исследований создало Рабочую группу по исследованиям технической и социальной сторон проблемы космического мусора.

За последнее десятилетие прошла серия дискуссий между космическими агентствами Европы, Японии, России и США. Можно отметить резолюцию 1080 ПАСЕ «Об обнаружении астероидов и комет, опасных для человечества» (1996), Международный симпозиум «Юниспейс-99» под эгидой ООН, на котором вопросы загрязнения околоземного космического пространства выделены в отдельную секцию, семинар по вопросам экологии космоса на сессии Международного сообщества в Давосе в 2000 г.

Комитет по космическому мусору в итоге обозначил 4 области совместной деятельности (Рыхлова, 1998):

- «измерения» — общая деятельность в сфере как функционирующих, так и разрабатываемых средств измерения для получения информации об объектах искусственного и естественного происхождения в околоземном космическом пространстве;
- «окружающая среда и база данных» — описание и моделирование метеорного и техногенного загрязнения околоземного космического пространства, накопление данных и доступ к ним;
- «испытания и защита» — разработка конструкций и технологий защиты космических аппаратов от метеоритов и осколков, методов их защиты;
- «снижение засорённости» — анализ всех мероприятий, проводимых с целью снижения или предотвращения создания космического мусора, или снижения создаваемой им опасности.

Специалисты ЦНИИмаш (Алавердов, и др., 2000б) к наиболее актуальным проблемам, связанным с космическим мусором, относят следующие:

- разработка моделей засорённости ОКП;
- создание методов и средств наблюдений за космическим мусором;
- исследование проблем радиоактивного космического мусора;
- оценка состояния ОКП и обеспечение защиты космических аппаратов от космического мусора;
- разработка методов и средств снижения засорённости ОКП;

- создание системы информационного обеспечения полётов космических объектов с целью обеспечения их безопасности;
- разработка нормативных документов и обеспечение безопасности космических полётов.

При этом в качестве первоочерёдных задач снижения засорённости ОКП они называют:

- пассивацию отработавших ступеней ракет-носителей и космических аппаратов, остающихся на орбите, повышение надёжности бортовых аккумуляторных батарей с целью предотвращения взрывов;
- сокращение сроков пассивного баллистического существования отработавших ракет-носителей на орбите, предотвращение их попадания на рабочие орбиты;
- снижение количества операционных элементов, остающихся в ОКП при выводе и эксплуатации КА.

Особое внимание уделяется безопасной эксплуатации геостационарной орбиты. Для исключения попадания разгонных блоков на рабочую орбиту предусматривается довыведение КА на геостационарные орбиты с помощью бортовых двигателей. Актуально проведение работ по управляемому уводу отработавших КА с геостационарной орбиты в область орбит захоронения (выше её более чем на 200 км), разработке технических средств перемещения крупногабаритного космического мусора с рабочей орбиты. Для избежания опасности столкновения вновь выводимых или функционирующих геостационарных КА с отработавшими Россией уже предпринимаются меры по управляемому уводу их с этой орбиты за счёт остатков топлива бортовой двигательной установки (ГИСЗ «Стационар», «Экран», «Горизонт»).

Загрязнение биосферы продуктами работы ракетных двигателей, остатками конструкций ракет к началу XXI века превратилось в весьма актуальную проблему, связанную не только с экологическими проблемами, но и с вопросами международного права. Так, например, площадь загрязнения Алтайского края остатками ракетного топлива превысила 250 км², общий вес упавшего после запусков ракет мусора — 2 тыс. тонн, широко распространён феномен «жёлтых детей» (Кричевский, 1999). В связи с этим летом 2001 г. начались работы по расчистке Алтайского края от обломков ракет, стартовавших с космодрома Байконур. Соответствующая договорённость достигнута между руководством республики и командованием Ракетных войск стратегического

назначения. Сообщается, что тонна собранных обломков будет стоить около \$600 (www.rambler.ru, 2001).

Следует отметить, что в России уже с 1996 г. при выведении КА отменён сброс двигательных установок систем обеспечения запуска с одновременной полной выработкой топлива, что исключает как загрязнение среды его остатками, так и предотвращает взрывы разгонных блоков. Длительный период, начиная с эксплуатации ОКС «Салют», после выполнения операций по доставке грузов на орбиту осуществляется управляемое затопление грузовых кораблей «Прогресс». Крупнейшая операция по спуску с орбиты орбитальной станции «Мир» массой 130 тонн проведена Россией весной 2001 г.

В настоящее время в качестве основных базовых ракет-носителей, входящих в российскую систему средств выведения космических аппаратов на орбиту, являются модернизируемые «Союз-2» и «Протон М». С целью снижения накопления на орбитах последних ступеней проводится отработка пассивной системы торможения («Союз-2»), применение которой сокращает в 5–6 раз время их баллистического существования и позволяет практически исключить накопление последних ступеней на орбите. При функционировании разгонного блока, которым оснащены ракеты «Протон» и «Зенит» (проект «Морской старт»), предусматривается дренирование остатков топлива, что резко снижает загрязнение верхней атмосферы и ионосферы. На вспомогательных двигательных установках модернизируемых российских разгонных блоков высокотоксичные компоненты топлива заменены на основные компоненты топлива двигательных установок (Алавердов и др., 2000б). Следует отметить, что Россия впервые создала активный разгонный блок «Байкал», который возвращается на стартовую позицию после осуществления своей миссии, практически не загрязняя ионосферу, в очень малой степени загрязняя биосферу и практически не оказывая влияния на ОКП.

Проводимые в России работы по снижению уровня техногенного загрязнения ОКП позволили подготовить в 1998. проект отраслевого стандарта «Общие требования к космическим средствам (КС) по ограничению техногенного засорения космического пространства» (Алавердов и др., 2000б).

Общая схема мероприятий по охране ОКП при осуществлении космической деятельности, разработанная автором (Муртазов, 2001д), представлена на рис. 5.3.

Проведение мониторинга природной среды, осуществление контроля за чрезвычайными ситуациями и ликвидацией их последствий
Глобальное и высокоточное координатно-временное обеспечение в любой точке Земли
Исследование природных ресурсов
Обеспечение глобальной связи и телевидения на всей территории России
Обеспечение отраслей экономики и Вооруженных Сил Российской Федерации космической гидрометеорологической информацией
Осуществление орбитальных пилотируемых полетов, отработка технологий производства в космосе новых материалов и высокочистых веществ
Проведение фундаментальных научных исследований в области астрофизики, планетологии, физики Солнца и солнечно-земных связей
Реализация международных соглашений по созданию Международной космической станции и исследованию планет
Создание научно-технического задела для разработки перспективной космической техники

Рис. 5.2. Приоритетные задачи развития российской космонавтики

5.2. Современные методы и средства предотвращения «космической опасности» для человечества

Кроме всего прочего, в настоящее время у человечества есть возможности начать исследования и разработки того аспекта проблемы космической опасности для Земли, к которому не удавалось ранее подойти ни с научной, ни с технологической точки зрения. Развитие астрономии и астрофизики, достижения ракетно-космического комплекса, средств навигации, связи, управления, наработки в области использования атомной энергии — весь этот комплекс достижений позволяет на совершенно реальном научном и технологическом уровне ставить, обсуждать и обосновывать возможности предотвращения катастрофических столкновений Земли с небесными телами (Боярчук, 1999; Алавердов и др., 2000а, б).

При этом первоочередной задачей является перевод этих событий из класса непредсказуемых в класс предсказуемых и предвычисляемых. Это может создать научно-техническую ба-

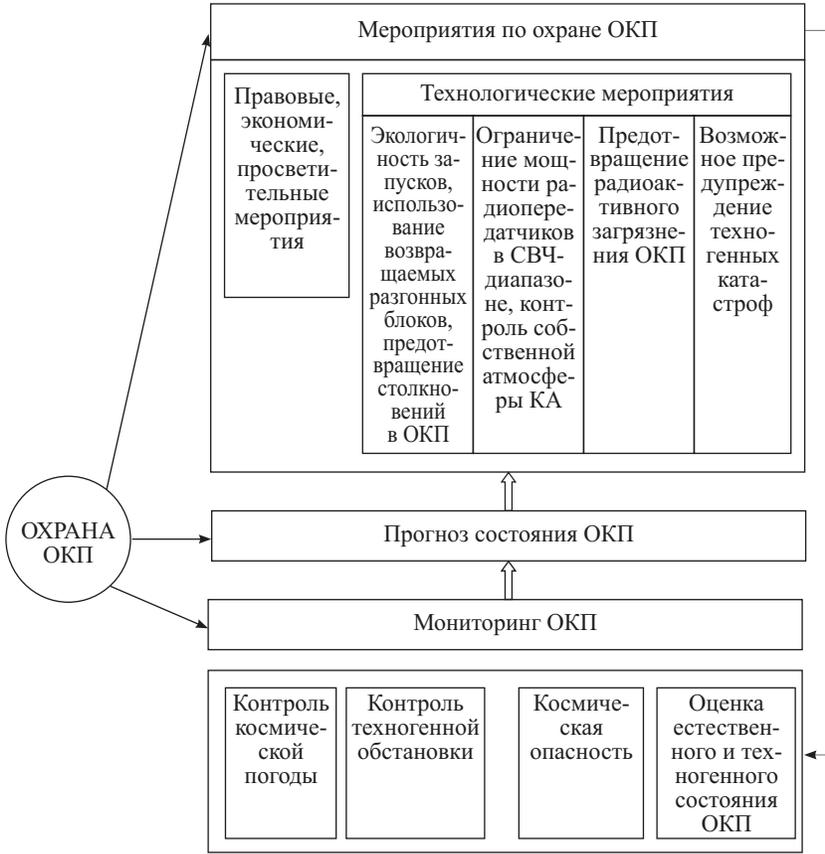


Рис. 5.3. Мероприятия по охране ОКП при осуществлении космической деятельности

зу для построения соответствующей системы противодействия. Естественно, что при этом надо осознать необходимость определённых научно-технических мероприятий — от организации мониторинга различных небесных тел, приближающихся к Земле (астероиды, кометы, метеороиды), до осуществления контроля за динамическим и физическим состоянием Солнечной системы в целом.

Таким образом, разработку и создание системы защиты Земли от опасных космических объектов можно считать закономерным этапом развития цивилизации. Основным назначением системы защиты Земли от небесных тел, которые обязательно упадут на Землю, является их заблаговременное обнаружение,

и в дальнейшем разрушение или отклонение от опасных траекторий.

В соответствии с этими задачами, система защиты Земли должна включать наземно-космическую службу обнаружения, наземный комплекс управления и космическую службу перехвата. Все эти службы должны обеспечить возможность обнаружения объектов, представляющих опасность, и определения траектории их движения, прогноз предполагаемого места падения на Землю и выдачу необходимой информации для службы перехвата. Наземный комплекс управления, обработав информацию, должен выдавать рекомендации для службы чрезвычайных ситуаций (Зайцев А.В., 2000).

Система защиты Земли должна обеспечивать перехват как тех небесных тел, падение которых на основании регулярных наблюдений можно спрогнозировать за многие месяцы или даже годы вперёд, так и тех, которые будут обнаружены за несколько суток или часов до столкновения с Землёй.

Большое внимание должно быть уделено созданию службы перехвата небесных тел относительно небольших размеров, полная каталогизация которых, а значит и прогнозирование, практически невозможны на современном уровне развития техники.

Ниже перечислены возможные методы очистки околоземного пространства (Горькавый, 1993).

1. Метод активного обнаружения и сбора обломков, то есть поиск крупных элементов техногенного или естественного происхождения и снятие их с орбиты (Рембеза, Хегай, 2000). Однако, он весьма дорог.

2. Метод активного обнаружения и дистанционной ликвидации, в котором обломки уничтожаются пучком какого-либо излучения или ракетами системы противоракетной обороны наземного или космического базирования.

3. Метод пассивного ожидания и дистанционной ликвидации. Под этот метод попадает, например, спутник с мощным магнитным полем, выведенный на орбиту с обратным вращением и возмущающий орбиты налетающих мелких металлических частиц так, что их перигеи оказываются в плотных слоях атмосферы.

4. Пассивные методы очистки, в которые входят все проекты, предусматривающие создание крупных мишеней, при столкновении с которыми уничтожаются частицы космического мусора. Однако, необходимый их эффективный радиус достаточно велик, да и они сами становятся серьёзным фактором загрязнения. Оценки, приведённые в главах 1 и 2 настоящей работы, показывают, что эффективный мусорщик должен обладать радиусом

действия в 100 км на низкой и до 3000 км на геостационарной орбите, что находится далеко за пределами современных технологий.

Предложено много различных вариантов системы защиты Земли от астероидно-кометной опасности. Большинство из них находятся на грани возможностей существующих технологий, а некоторые фантастичны. Выбор конкретной схемы отражения опасности зависит от размеров космического объекта, его состава и времени упреждения, начиная с момента обнаружения до столкновения с Землёй. Наиболее известны следующие принципы отражения космической опасности (Боярчук, 1999):

- уничтожение опасного космического объекта;
- отклонение его с орбиты соударения с Землёй;
- экранирование Земли от столкновения с опасным объектом;
- дистанционное воздействие на опасный объект для его отклонения, торможения и разрушения;
- использование неизвестных в настоящее время технологий.

Применение тех или иных методов противодействия космической опасности определяется в основном временем, которое имеется для проведения всей операции, то есть отрезком времени между принятием решения о противодействии и расчётным временем столкновения опасного объекта с Землёй. По этому критерию выделяются несколько временных этапов, различающиеся между собой выбором технических средств противодействия и характеристиками самого опасного объекта:

1) $t < 1$ часа. Это соответствует расстояниям от Земли в несколько десятков тысяч км при скоростях объекта 20 км/с и выше. На этом этапе наиболее целесообразным является воздействие на объект дистанционным методом с целью его полного уничтожения или фрагментации.

2) $1 \text{ час} < t < 1 \text{ сутки}$. На этом этапе также необходимы полное уничтожение или фрагментация объекта. Это может быть достигнуто как применением дистанционного метода, так и разрушением опасного объекта с помощью ядерного заряда, установленного на ракете-перехватчике. При малых размерах объекта возможно его разрушение и кинетическим ударом самой ракеты.

3) $1 \text{ сутки} < t < 40 \text{ суток}$. На этом этапе целесообразно использование ракетных средств противодействия для разрушения объекта. Ракеты-перехватчики могут располагаться как на поверхности Земли, так и на околоземной орбите.

4) 40 суток $< t < 1$ год. При таком времени упреждения возможно не только разрушение опасного объекта, но и его отклонение с траектории столкновения с Землёй одним из описанных выше методов.

5) $t > 1$ год. В этом случае возможно осуществление плавного, управляемого изменения орбиты опасного космического тела. Здесь наиболее предпочтительным является метод отклонения.

К настоящему времени рассмотрена структура системы защиты Земли на основе ракетных комплексов класса наземного базирования и средств космического базирования на основе ядерно-электрического энергодвигательного блока. В нескольких организациях России проведены расчёты технических характеристик следующих систем: радиолокатора наземного базирования для обнаружения опасного космического объекта на расстояниях порядка 1 а. е.; систем радиолокационных станций космического базирования; систем перехвата и отклонения опасного космического объекта ядерным взрывом (Семёнов и др., 2000).

Оценки энергии взрыва, необходимой для разрушения опасного объекта, приведены в ряде работ (Румынский, Сазонов, 2000). Согласно им, при взрыве, происшедшем на поверхности тела или внутри него, материал снаряда и часть материала опасного небесного тела частично или полностью испаряются и по последнему распространяется ударная волна. Полная энергия E_0 взрыва, необходимая для разрушения опасного объекта, определяется выражением (Ивашкин, Чернов, 2000; Румынский, Сазонов, 2000)

$$E_0\chi = 4\pi \frac{n+1}{n-1} \eta r_k^3 \rho_0 u_p^2, \quad (5.1)$$

где u_3 — характеризует скорость газа за фронтом волны, r_k — расстояние от эпицентра взрыва, на котором прекращается разрушение материала объекта, n — показатель политропы расширяющегося газа, ρ_0 — начальная плотность вещества опасного объекта, χ — множитель, характеризующий ту часть энергии, которая переходит в распространяющуюся внутри объекта ударную волну (для железных метеоритов принимался равным 0,30, каменных метеоритов 0,35, ядер комет — 0,4, η — множитель, зависящий от показателя политропы.

Энергия разрушения железных и каменных метеороидов может составлять до $\varepsilon_p = 10^5$ Дж/кг, что достаточно для мелкого дробления среды. Для кометных ледяных ядер эта величина по крайней мере в три раза меньше. Она и является порогом разрушения опасных космических объектов: энергия ударной волны, распространяющаяся в веществе опасного объекта, даже

на расстоянии r_k от эпицентра взрыва, равном эффективному диаметру объекта D_0 не должна быть меньше ε_p , то есть

$$E(r_k) = \varepsilon_p = \frac{u_p^2}{2}. \quad (5.2)$$

Величина энергии взрыва тогда определится как

$$E_0 = 4\pi \frac{n+1}{n-1} \frac{\eta}{\chi} \rho_0 u_p^2 D^3. \quad (5.3)$$

Это выражение относится к взрыву неподвижного объекта. В рассматриваемом случае следует учитывать также кинетическую энергию ракеты, переносящей заряд

$$E_1 = \frac{Mv^2}{2\chi}, \quad (5.4)$$

где v — скорость соударения ракеты полной массы M с опасным объектом.

Общая энергия, передаваемая опасному космическому объекту при ударе и взрыве, будет тогда являться суммой энергий этих процессов

$$E = E_0 + E_1. \quad (5.5)$$

Оценки, сделанные для величин скорости и энергии заряда, необходимые для разрушения опасных космических объектов (Румынский, Сазонов, 2000), показывают, что человечество в состоянии уничтожить небольшие тела, угрожающие Земле. Так, для того, чтобы разрушить железный метеорит диаметром 10 м, требуется ракета массой 6 т без заряда, соударяющаяся с ним со скоростью порядка 100 км/с. Для разрушения каменного метеорита эта скорость составляет 60 км/с, причём её достаточно для полного испарения ледяной мини-кометы диаметром 60 м.

Рассчитанные величины зарядов (как ядерных, так и обычных) достаточны для полного разрушения (испарения) опасных небесных объектов без образования фрагментов, хотя расчёты разных авторов достаточно разбросаны.

Резкого уменьшения астероидной опасности можно достичь, используя в качестве ударника элементы техногенного мусора, общая масса которого к 2010 г. может достичь в ОКП $\approx 10\text{--}12 \times 10^3$ т (Симонов, 2000). При складировании значительной части крупных отходов можно в течение 5–10 лет сосредоточить эшелоны масс по $\approx 10^3$ т на нескольких безопасных орбитах. Это более надёжный и контролируемый способ избежания катастрофического нарастания количества мелких отходов в ОКП, хотя и более дорогой. Следует учесть также возможность утилизации

отходов в будущем в качестве рабочего тела в космических двигателях, строительного материала и т. д. Существенный выигрыш ожидается при использовании техногенного мусора как ударника с целью уменьшения астероидно-кометной опасности, так как перевод со штатной на безопасную орбиту значительно более экономически выгоден, чем старт с Земли. Расчёты автора показывают, что при массе ударника до 10^3 т, скорости соударения 50–70 км/с можно разрушать астероиды размерами <3 км. Автор считает, что такой метод является экологически чистым и сравнительно экономичным, при реализации которого одновременно решаются проблемы устранения техногенного мусора в ОКП и разрушения сплошных каменных астероидов диаметрами до 3 км.

Однако, при достаточно больших размерах опасных астероидов и ядер комет, последние могут раздробиться на отдельные сравнительно крупные фрагменты, а действие образовавшихся осколков на Землю может оказаться более катастрофичным, чем действие первоначального неразрушенного объекта.

Весьма широко в современной литературе обсуждаются вопросы, связанные с долгосрочным воздействием на орбиты опасных в будущем объектов с изменением величины давления на них солнечного излучения, а также ротационными и сублимационными эффектами (*Боярчук, 1999; Поляхова, 2000; Сазонов, 2000*).

Использование силы светового давления на элементы орбит опасных астероидов является, помимо своей оригинальности, экологически чистым способом воздействия на небесное тело. Очевидно, что для астероидов эта сила мала вследствие низкого альbedo и значительных масс. Для её увеличения необходимо искусственным образом увеличить альbedo, после чего можно прогнозировать, что сила светового давления сможет оказать медленное корректирующее действие на небольшие астероиды (метеороиды) на временах порядка нескольких лет. Здесь уместны два конструктивных решения (*Поляхова, 2000*): 1) «ударное» увеличение парусности астероида путём швартовки к нему космического аппарата с незатеняемым мощным солнечным парусом; 2) «ударное» увеличение альbedo астероида до значения, близкого к единице (окрашивание, обёртывание зеркальной плёнкой и т. д.). Метод 1 является методом «быстрой» активной коррекции, использующей силу тяги солнечного паруса, метод 2 является методом более медленной, пассивной коррекции. Например, для астероида радиусом 5 м, снабжённым парусом

размерами 600×600 м, отклонение от Земли на 10^6 км можно обеспечить за один год (быстрая коррекция).

Ротационные эффекты связаны с анизотропностью переизлучения солнечной радиации поверхностью астероида за счёт нерегулярности его альbedo: 1) динамические эффекты термической инерции вращающегося астероида, то есть перемещения тепловой волны от освещённой к теневой стороне (эффект Ярковского); 2) влияние нерегулярности альbedo на скорость осевой раскрутки астероида (эффект Радзиевского); 3) зависимость фактора нерегулярности альbedo от направления осевого вращения астероида по отношению к орбитальному движению вокруг Солнца.

Для изменения орбит комет в работах (Сазонов, 2000б) предлагается так называемый сублимационный эффект, состоящий в сублимации кометных льдов под действием солнечной радиации. Инициирование сублимационного воздействия предлагается осуществлять искусственным сбросом тонкой пылевой оболочки ядра кометы. Данный способ базируется на принудительном сбросе пылевой оболочки ядра кометы в определённый момент времени, в результате чего повышается кометная активность и появляется реактивная тяга, обуславливающая целенаправленное изменение первоначальной орбиты кометы. Из-за достаточно рыхлой структуры ядра для создания сублимационных эффектов не требуется большой энергии, поэтому они могут быть осуществлены современными средствами. Есть проекты ряда таких способов: а) ядерный взрыв вблизи кометы; б) воздействие на поверхность ядра кометы потоком высокоскоростных частиц; в) сброс пылевой оболочки после действий по первым двум пунктам; г) использование солнечной радиации (Сазонов, Дмитриев, 1998; Сазонов, 2000б).

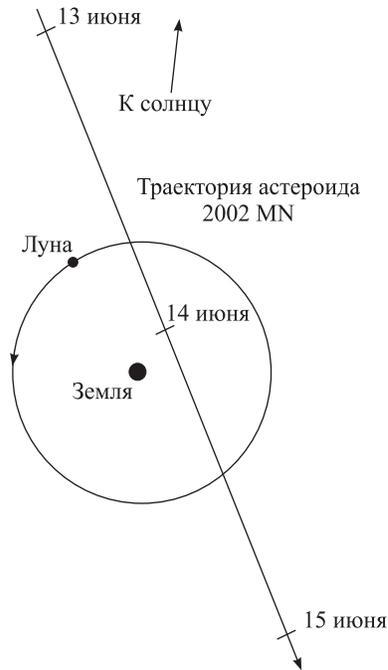


Рис. 5.4. Пролёт опасного астероида 2002 MN в ОКП

Однако, несмотря на все эти проекты, проблема защиты Земли от космической опасности до сих пор остаётся открытой.

Можно отметить, что здесь основной проблемой всё-таки остаётся проблема своевременного обнаружения опасных объектов, движущихся почти по лучу зрения и имеющих весьма малые собственные движения на небесной сфере.

Об этом свидетельствует, например, факт обнаружения опасного астероида диаметром 100 м в ОКП, который был открыт 17.06.2002 г. проектом LINEAR после его максимального сближения с Землёй до 120 тыс. км, которое произошло ещё 14.06.2002 (рис. 5.4 — *www.astronet.ru*, 2002).

Заключение

К началу XXI в. околоземное космическое пространство стало значительным фактором научного, общественного, коммерческого использования.

По оценкам ООН, в первые десятилетия XXI в. ОКП станет одним из крупнейших и высокодоходных участков мирового рынка. Так, в 1996 г. доходы глобальной космической индустрии составили около \$77 млрд при росте 5% годовых, и в ней было занято около 800 тыс. человек (ООН, 1999; Кричевский, 1999).

В настоящей работе подробно рассмотрены и проанализированы процессы взаимодействия между различными компонентами околоземного пространства, космоса и окружающей им био- и техносферы, составляющие физические основы экологии ОКП. Сюда входят процессы, обусловленные взаимодействием естественных космических и техногенных излучений с веществом и полями ОКП, процессы, сопровождающие загрязнение ОКП. Все эти процессы выводят ОКП из состояния динамического равновесия. Однако, благодаря наличию большого количества отрицательных обратных связей ОКП возвращается к состоянию равновесия. Все процессы, протекающие в ОКП, оказывают воздействие на биосферу планеты, с которой у него также существует большое количество как отрицательных, так и положительных (усиливающих воздействие) обратных связей.

Несомненно, основным источником процессов в ОКП и биосфере является Солнце, дающее подавляющий вклад энергии в систему «ОКП-биосфера». Даже при спокойном состоянии Солнца в периоды минимума его активности вариации как электромагнитного, так и корпускулярного излучения Солнца, взаимодействие межпланетного и геомагнитного полей, воздействие солнечных космических лучей приводят к нестабильным процессам в ОКП, выводящим его из состояния динамического равновесия. Вследствие этого гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространённых физико-химических процессов в биосфере, они воздействуют на многие стороны биологических явлений, что и находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов.

Природа физического механизма воздействия солнечной активности на Землю в целом до сих пор не раскрыта, поскольку попадающее в нижние слои атмосферы видимое излучение, как и полный поток солнечного излучения, изменяется всего лишь на доли процента, тогда как параметры ОКП и состояние биосферы оказываются подверженными значительным изменениям. Необходимо найти механизм воздействия солнечной активности на ОКП и биосферу Земли с тем, чтобы научиться управлять таким воздействием.

Весьма важным параметром, характеризующим общее состояние ОКП, является его загрязнение космическим мусором естественного происхождения.

Одним из последствий появления осколков небесных тел в ОКП является явление, называемое космической опасностью: возможность соударения Земли с астероидом, метеороидом или ядром кометы. Воздействия на биосферу после такого соударения могут принять глобальные масштабы и оказаться катастрофическими для человеческой цивилизации. Примером такого воздействия является соударение кометы Шумейкеров-Леви с Юпитером

Однако, основной проблемой является в настоящее время проблема техногенного загрязнения ОКП. В общем виде это:

- загрязнение природной среды и ОКП вредными продуктами сгорания ракетного топлива и его несгоревшими остатками;
- загрязнение ионосферы при запусках КА;
- космический мусор в ОКП;
- падение техногенных отходов на Землю;
- электромагнитные излучения различных передатчиков и линий передачи электроэнергии на Земле;
- взрывы ядерных зарядов, общая радиоактивность;
- техногенные катастрофы;
- взаимодействие ОКП с собственной атмосферой КА;
- последствия аварий и столкновений космической техники в ОКП.

При выборе параметров, характеризующих антропогенные явления, можно выделить две группы. К первой относятся концентрации компонентов, непосредственно загрязняющих ближний космос. Эти компоненты поступают в околоземное пространство в результате производственной деятельности человека (фреоны, окислы азота, хлора, изотопы радиоактивных элементов и др.), а также в результате запусков ракетно-космических систем. Сюда же относятся электромагнитные излучения техногенного про-

исхождения, изменяющие состояние ионосферы и магнитосферы Земли. Ко второй группе относятся параметры, характеризующие состояние верхней атмосферы, ионосферы, магнитосферы, претерпевающие значительные изменения в результате техногенного воздействия, что в результате обратных связей воздействует на природу планеты.

Причём, следует отметить, что если вероятность столкновения Земли с крупными небесными телами в процессе эволюции Солнечной системы уменьшается, то интенсивность техногенных воздействий с развитием цивилизации и её деятельности по освоению ОКП заметно возрастает.

Таким образом, околоземное космическое пространство как глобальная составляющая окружающей биосферу среды является многокомпонентной динамической системой со сложным образом изменяющимися параметрами, состояние которой во многом определяет процессы в самой биосфере.

В настоящей работе автором впервые поставлен и проанализирован вопрос об устойчивости ОКП как физической системы со многими обратными связями как внутри самого ОКП, так и в системе «ОКП-биосфера».

Энергия техногенных воздействий в ОКП в настоящее время имеет мощность, на два порядка меньшую мощности естественных воздействий, однако, её рост проходит практически по экспоненциальному закону. При таком законе возрастания техногенные воздействия уже в этом веке могут превзойти естественные, что в значительной мере может сказаться на условии равновесия ОКП. Критическое значение энергетического загрязнения ОКП может составить величину всего $\approx 1\%$ от значения солнечной постоянной. В таком случае действие принципа Ле Шателье-Брауна в ОКП может оказаться нарушенным, и ОКП, выйдя из состояния динамического равновесия, уже в него не вернётся. ОКП с новыми параметрами может иметь совершенно иные свойства, что неизвестно каким образом скажется на земной природе.

В связи с этим задача определения предельно допустимых уровней воздействия на околоземное пространство может стать главной задачей исследований ближайшего десятилетия. Она является чрезвычайно актуальной по отношению к антропогенным воздействиям всех видов, и от её скорейшего решения зависят как дальнейшее развитие космической деятельности человечества, так и обеспечение существования современной цивилизации.

Таким образом, с выходом человечества за пределы биосферы вопросы контроля состояния ОКП приобретают особое значе-

ние. Разработка методов охраны и рационального использования ОКП должна базироваться, по мнению автора, на исследованиях в рамках его экологии и может явиться одной из важнейших научных, технических и даже этических проблем третьего тысячелетия. Здесь, в заключение, можно выделить ряд моментов:

- на современном этапе весьма важной является задача определения предельно допустимых техногенных воздействий на ОКП и в дальнейшем их контроля;
- методы охраны и рационального использования ОКП не должны использовать технологии, вредно воздействующие на ОКП и биосферу;
- они должны быть направлены на снижение засорённости как ОКП, так и биосферы;
- применяемые в будущем методы охраны и рационального использования ОКП не должны энергетически превышать предел, выше которого ОКП не сможет вернуться к первоначальному устойчивому (или какому-либо устойчивому, но несколько отличающемуся по параметрам от первоначального) состоянию.

Приложение А

ОПАСНЫЕ ПРОЛЁТЫ АСТЕРОИДОВ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ

Приведены данные о прохождении через околоземное космическое пространство на расстоянии ближе 0.05 а.е. «опасных» астероидов на период до 2178 г. по данным службы *PHA (Potentially Hazardous Asteroids)*. Представлены данные об известных на 1 марта 2004 г. астероидах, пересекающих орбиту Земли. (1 а.е. = 149 597 870 км, среднее расстояние до Луны 0,0026 а.е. = 384 400 км).

Объект (и имя)	Дата макс. сближения		Расстояние (а.е.)
	юлианская	календарная	
	2 461 948.73	2028 June 26.23	0.001 670
	2 491 724.91	2110 Jan. 4.41	0.001 813
	2 505 621.64	2148 Jan. 22.14	0.002 004
	2 503 014.32	2140 Dec. 1.82	0.002 146
	2 461 624.79	2027 Aug. 7.29	0.002 652
(35396)	(35396)	2501 518.99 2136 Oct. 28.49	0.002 762
	2 494 243.50	2116 Nov. 27.00	0.002 917
	2 475 918.36	2066 Sept. 24.86	0.003 396
	2 481 030.71	2080 Sept. 23.21	0.003 582
	2 488 186.18	2100 Apr. 27.68	0.003 976
	2 481 007.52	2080 Aug. 31.02	0.004 194
	2 473 725.52	2060 Sept. 23.02	0.005 032
	2 463 235.46	2032 Jan. 3.96	0.005 074
	2 499 184.28	2130 June 7.78	0.005 156
	2 509 520.97	2158 Sept. 25.47	0.005 509
	2 489 443.49	2103 Oct. 6.99	0.005 622
	2 481 092.11	2080 Nov. 23.61	0.005 639
(2340)	Hathor	2 483 250.17 2086 Oct. 21.67	0.005 973
	1999 VP11	2 483 250.91 2086 Oct. 22.41	0.006 027
	1994 WR12	2 459 542.44 2021 Nov. 23.94	0.006 124
(35396)	(35396)	2 462 070.78 2028 Oct. 26.28	0.006 239
	2000 TU28	2 495 842.79 2121 Apr. 14.29	0.006 492
	1999 DB7	2 469 134.55 2048 Feb. 28.05	0.006 524
(27002)	1998 DV9	2 510 013.77 2160 Jan. 31.27	0.006 577
(2340)	Hathor	2 477 040.85 2069 Oct. 21.35	0.006 598

	2002 YP2	2 505 366.95	2147	May 12.45	0.006 934
	2000 EH26	2 490 370.45	2106	Apr. 20.95	0.007 056
	2002 NY40	2 465 465.60	2038	Feb. 11.10	0.007 211
	1997 XR2	2 501 735.45	2137	June 1.95	0.007 218
	2003 UV11	2 455 499.19	2010	Oct. 29.69	0.007 411
	1999 MN	2 455 349.89	2010	June 2.39	0.007 625
	1998 HH49	2 460 234.52	2023	Oct. 17.02	0.007 852
	2000 TU28	2 488 903.10	2102	Apr. 14.60	0.007 918
(4660)	Nereus	2 473 503.79	2060	Feb. 14.29	0.008 012
	2003 RM10	2 503 290.89	2141	Sept. 4.39	0.008 136
	2004 BL86	2 485 904.25	2094	Jan. 26.75	0.008 174
	2000 WO107	2 485 847.45	2093	Nov. 30.95	0.008 373
	2001 AD2	2 500 217.13	2133	Apr. 5.63	0.008 723
	2003 HF2	2 504 592.36	2145	Mar. 28.86	0.008 858
	2003 QH5	2 512 743.35	2167	July 22.85	0.009 218
	1994 WR12	2 504 103.90	2143	Nov. 26.40	0.009 312
	2000 LF3	2 468 511.20	2046	June 14.70	0.009 356
	2002 AJ129	2 483 357.88	2087	Feb. 6.38	0.009 470
	2002 SZ	2 476 269.40	2067	Sept. 10.90	0.009 472
	2002 LV	2 479 519.98	2076	Aug. 4.48	0.009 667
	2000 QK130	2 498 369.64	2128	Mar. 15.14	0.009 690
	2002 SY50	2 477 779.67	2071	Oct. 30.17	0.009 786
	1999 FA	2 503 839.41	2143	Mar. 6.91	0.009 834
	1998 KM3	2 506 306.86	2149	Dec. 7.36	0.01013
(4179)	Toutatis	2 453 278.07	2004	Sept. 29.57	0.01036
	1999 JU3	2 479 643.74	2076	Dec. 6.24	0.01044
(35396)	(35396)	2 486 542.72	2095	Oct. 27.22	0.01057
	1991 AQ	2 499 052.93	2130	Jan. 27.43	0.01064
	1998 SC15	2 486 341.46	2095	Apr. 8.96	0.01064
	2000 LB16	2 511 427.04	2163	Dec. 14.54	0.01065
	2002 NN4	2 477 269.12	2070	June 6.62	0.01081
	1999 GL4	2 510 783.69	2162	Mar. 11.19	0.01090
	2002 AW	2 499 669.68	2131	Oct. 6.18	0.01111
	2001 AD2	2 468 439.33	2046	Apr. 3.83	0.01124
	2002 AW	2 475 198.48	2064	Oct. 4.98	0.01130
	2003 YT1	2 478 326.69	2073	Apr. 29.19	0.01148
	1995 CR	2 498 713.88	2129	Feb. 22.38	0.01154
	2000 QK130	2 464 768.12	2036	Mar. 15.62	0.01157
	1999 AQ10	2 454 881.14	2009	Feb. 18.64	0.01183
	1998 SH36	2 472 649.25	2057	Oct. 12.75	0.01185
(52768)	1998 OR2	2 480 505.10	2079	Apr. 16.60	0.01185
	2001 AD2	2 506 426.73	2150	Apr. 6.23	0.01190
(4581)	Asclepius	2 470 254.83	2051	Mar. 24.33	0.01196
	1999 MN	2 495 163.41	2119	June 4.91	0.01216
	2001 QQ142	2 474 536.06	2062	Dec. 12.56	0.01254
(33342)	(33342)	2 488 055.52	2099	Dec. 18.02	0.01263
	2003 MH4	2 499 919.94	2132	June 12.44	0.01273

	2001 FO32	2 489 246.14	2103	Mar. 23.64	0.01274
	2001 EC	2 494 698.79	2118	Feb. 25.29	0.01276
	2002 CU11	2 505 480.13	2147	Sept. 2.63	0.01284
	1995 YR1	2 514 727.23	2172	Dec. 26.73	0.01284
(25143)	Itokawa	2 453 183.33	2004	June 26.83	0.01290
	2000 EW70	2 476 830.54	2069	Mar. 25.04	0.01295
	1998 SH36	2 466 439.62	2040	Oct. 12.12	0.01296
(41429)	2000 GE2	2 466 428.84	2040	Oct. 1.34	0.01317
(7482)	(7482)	2 459 598.41	2022	Jan. 18.91	0.01324
	2003 CR20	2 491 255.70	2108	Sept. 22.20	0.01338
	2001 FO32	2 459 295.17	2021	Mar. 21.67	0.01344
	1998 SH36	2 494 199.00	2116	Oct. 13.50	0.01346
	2002 GO5	2 502 044.98	2138	Apr. 7.48	0.01352
	1994 WR12	2 504 834.78	2145	Nov. 26.28	0.01357
	2001 EC	2 502 371.65	2139	Feb. 28.15	0.01365
	2002 PZ39	2 485 005.32	2091	Aug. 11.82	0.01399
	1994 CN2	2 502 527.83	2139	Aug. 3.33	0.01402
(66391)	1999 KW4	2 496 981.34	2124	May 26.84	0.01414
(33342)	(33342)	2 504 492.29	2144	Dec. 18.79	0.01430
(33342)	(33342)	2 471 620.80	2054	Dec. 19.30	0.01436
	2003 MK4	2 469 443.98	2049	Jan. 2.48	0.01443
	1994 CC	2 501 014.99	2135	June 12.49	0.01446
	2002 EV11	2 516 630.85	2178	Mar. 14.35	0.01447
	2000 YF29	2 501 242.58	2136	Jan. 26.08	0.01451
	2002 JE9	2 504 974.44	2146	Apr. 14.94	0.01483
	2004 DV24	2 467 141.98	2042	Sept. 14.48	0.01500
(4660)	Nereus	2 477 512.21	2071	Feb. 4.71	0.01504
	1999 VP11	2 458 048.97	2017	Oct. 22.47	0.01511
	2003 MA3	2 495 394.18	2120	Jan. 21.68	0.01525
	2002 SY50	2 502 981.83	2140	Oct. 30.33	0.01536
	2003 HF2	2 492 173.35	2111	Mar. 28.85	0.01537
(66391)	1999 KW4	2 464 839.07	2036	May 25.57	0.01554
(7482)	(7482)	2 489 913.01	2105	Jan. 18.51	0.01566
	2002 NY40	2 501 629.37	2137	Feb. 15.87	0.01577
	1997 QK1	2 465 980.89	2039	July 11.39	0.01586
(65679)	1989 UQ	2 485 737.96	2093	Aug. 13.46	0.01604
	2003 SD220	2 515 452.49	2174	Dec. 21.99	0.01605
	2003 WY25	2 476 322.51	2067	Nov. 3.01	0.01608
(66391)	1999 KW4	2 515 974.78	2176	May 27.28	0.01616
	2002 DU3	2 503 852.50	2143	Mar. 20.00	0.01619
	2000 QK130	2 476 091.55	2067	Mar. 17.05	0.01629
	2003 CR20	2 502 579.43	2139	Sept. 23.93	0.01631
(41429)	2000 GE2	2 465 698.10	2038	Oct. 1.60	0.01635
	1997 NC1	2 516 736.91	2178	June 28.41	0.01650
(52768)	1998 OR2	2 498 037.90	2127	Apr. 18.40	0.01653
	1997 NC1	2 500 300.92	2133	June 28.42	0.01671
	1994 CC	2 478 735.09	2074	June 11.59	0.01675
	1994 CC	2 454 992.76	2009	June 10.26	0.01683

	2000 EV70	2 514 955.17	2173	Aug. 11.67	0.01688
	2000 GK137	2 502 193.95	2138	Sept. 3.45	0.01697
	2003 RB5	2 500 370.01	2133	Sept. 5.51	0.01698
	1997 NC1	2 461 218.97	2026	June 27.47	0.01716
	2001 SG286	2 461 913.55	2028	May 22.05	0.01729
	2002 LY1	2 498 459.63	2128	June 13.13	0.01730
	1999 MN	2 453 197.56	2004	July 11.06	0.01737
(66391)	1999 KW4	2 477 623.03	2071	May 26.53	0.01751
(4660)	Nereus	2 492 808.18	2112	Dec. 22.68	0.01751
	2004 BV1	2 466 330.02	2040	June 24.52	0.01752
	2002 SY50	2 495 676.19	2120	Oct. 29.69	0.01757
(4660)	Nereus	2 512 223.38	2166	Feb. 17.88	0.01767
	2002 XR14	2 488 247.38	2100	June 27.88	0.01769
	2001 XU	2 464 311.50	2034	Dec. 15.00	0.01787
	2001 DF47	2 467 479.20	2043	Aug. 17.70	0.01791
	2001 OY13	2 511 271.51	2163	July 12.01	0.01794
	2002 RW25	2 479 525.20	2076	Aug. 9.70	0.01800
	2002 JX8	2 493 685.98	2115	May 19.48	0.01808
	2003 SD220	2 477 466.50	2070	Dec. 21.00	0.01814
(13651)	(13651)	2 500 325.31	2133	July 22.81	0.01815
	2001 FO32	2 470 619.26	2052	Mar. 22.76	0.01815
	2000 RW37	2 490 679.64	2107	Feb. 24.14	0.01816
	2000 KA	2 511 409.62	2163	Nov. 27.12	0.01828
	2000 UG11	2 503 724.65	2142	Nov. 12.15	0.01828
	2003 WG	2 490 569.98	2106	Nov. 6.48	0.01829
	2002 GM2	2 491 577.33	2109	Aug. 9.83	0.01839
	2003 SD220	2 495 364.63	2119	Dec. 23.13	0.01841
	2001 FE90	2 455 011.10	2009	June 28.60	0.01848
	1999 SO5	2 504 967.33	2146	Apr. 7.83	0.01854
	1999 MN	2 485 340.34	2092	July 11.84	0.01874
	1999 MN	2 508 351.19	2155	July 13.69	0.01882
	1998 SH36	2 516 115.29	2176	Oct. 14.79	0.01882
	2003 SD220	2 458 474.55	2018	Dec. 22.05	0.01891
	1998 SC15	2 507 160.49	2152	Apr. 8.99	0.01892
	2000 KA	2 456 620.91	2013	Nov. 24.41	0.01902
	1993 VD	2 515 761.13	2175	Oct. 26.63	0.01904
	2002 FB3	2 480 137.20	2078	Apr. 13.70	0.01905
	1999 SO5	2 483 052.42	2086	Apr. 6.92	0.01905
	2000 TU28	2 470 273.98	2051	Apr. 12.48	0.01923
(2340)	Hathor	2 493 112.08	2113	Oct. 22.58	0.01942
(3200)	Phaethon	2 485 860.97	2093	Dec. 14.47	0.01946
(2101)	Adonis	2 488 989.50	2102	July 10.00	0.01953
	2003 BD44	2 479 042.50	2075	Apr. 15.00	0.01954
	1999 RM45	2 459 276.34	2021	Mar. 2.84	0.01974
	2000 GF2	2 474 447.35	2062	Sept. 14.85	0.01983
(4179)	Toutatis	2 477 056.16	2069	Nov. 5.66	0.01985
	1999 FA	2 468 409.71	2046	Mar. 5.21	0.01994
	2002 JE9	2 508 992.51	2157	Apr. 15.01	0.02008

	2000 RS11	2 472 072.44	2056	Mar. 14.94	0.02011
	1997 QK1	2 460 907.93	2025	Aug. 20.43	0.02013
	2002 CY9	2 493 207.10	2114	Jan. 25.60	0.02020
	1993 VD	2 470 834.62	2052	Oct. 24.12	0.02024
(23187)	(23187)	2 453 800.68	2006	Mar. 6.18	0.02034
	2002 AW	2 510 261.46	2160	Oct. 4.96	0.02036
	1990 OS	2 471 222.74	2053	Nov. 16.24	0.02038
	2000 SP43	2 479 565.65	2076	Sept. 19.15	0.02046
	1999 DB7	2 503 469.88	2142	Mar. 2.38	0.02056
	2002 GT	2 514 664.09	2172	Oct. 24.59	0.02083
	2002 FB3	2 479 406.70	2076	Apr. 13.20	0.02084
	1994 XD	2 470 701.84	2052	June 13.34	0.02108
	2002 MX	2 463 930.85	2033	Nov. 29.35	0.02109
	1999 UR	2 507 729.36	2153	Oct. 29.86	0.02110
(27002)	1998 DV9	2 507 463.88	2153	Feb. 6.38	0.02111
(3361)	Orpheus	2 484 890.45	2091	Apr. 18.95	0.02113
	2000 WO107	2 466 488.03	2040	Nov. 29.53	0.02117
	2002 HP11	2 503 311.00	2141	Sept. 24.50	0.02118
	2002 AW	2 481 587.00	2082	Apr. 2.50	0.02123
	1990 OS	2 497 428.97	2125	Aug. 17.47	0.02126
	2000 YV137	2 512 764.20	2167	Aug. 12.70	0.02148
	2003 YX1	2 470 155.33	2050	Dec. 14.83	0.02174
	2004 BL86	2 457 047.95	2015	Jan. 25.45	0.02182
	2003 BK47	2 500 702.48	2134	Aug. 3.98	0.02188
	2002 TB70	2 471 726.59	2055	Apr. 4.09	0.02191
	1997 WQ23	2 476 692.50	2068	Nov. 7.00	0.02195
	1999 MN	2 500 679.98	2134	July 12.48	0.02195
	2003 UX34	2 479 188.21	2075	Sept. 7.71	0.02198
	2000 EH26	2 509 049.14	2157	June 10.64	0.02209
	1998 FW4	2 455 104.28	2009	Sept. 29.78	0.02218
(68347)	2001 KB67	2 470 322.13	2051	May 30.63	0.02219
(2101)	Adonis	2 503 965.44	2143	July 10.94	0.02220
	1994 CN2	2 467 102.99	2042	Aug. 6.49	0.02241
(23187)	(23187)	2 500 552.71	2134	Mar. 7.21	0.02244
(2101)	Adonis	2 516 232.72	2177	Feb. 9.22	0.02246
	2001 SG286	2 484 560.06	2090	May 23.56	0.02264
	2003 RS1	2 471 530.51	2054	Sept. 20.01	0.02284
	2002 SZ	2 506 583.80	2150	Sept. 10.30	0.02287
	1999 GS6	2 477 729.98	2071	Sept. 10.48	0.02288
	1998 BB10	2 463 799.98	2033	July 21.48	0.02296
	2000 AF6	2 481 477.08	2081	Dec. 13.58	0.02301
	1999 MN	2 516 348.82	2177	June 5.32	0.02305
(4953)	(4953)	2 472 884.93	2058	June 5.43	0.02307
	2002 AZ1	2 454 655.79	2008	July 8.29	0.
	2002 CQ11	2 498 067.14	2127	May 17.64	0.02328
	2003 MS2	2 502 497.17	2139	July 3.67	0.02336
(33342)	(33342)	2 515 809.69	2175	Dec. 14.19	0.02339
	2002 VE68	2 506 288.59	2149	Nov. 19.09	0.02344

	2000 QS7	2 512 789.10	2167	Sept. 6.60	0.02344
	2002 CQ11	2 508 293.60	2155	May 17.10	0.02361
(41429)	2000 GE2	2 483 794.80	2088	Apr. 18.30	0.02366
	1998 ST27	2 460 595.58	2024	Oct. 12.08	0.02381
(66391)	1999 KW4	2 484 197.34	2089	May 25.84	0.02398
(65679)	1989 UQ	2 483 656.85	2087	Dec. 2.35	0.02401
	2001 DF47	2 500 718.62	2134	Aug. 20.12	0.02407
	1996 JG	2 496 250.71	2122	May 27.21	0.02407
	1998 SH36	2 470 694.90	2052	June 6.40	0.02414
(2340)	Hathor	2 468 274.84	2045	Oct. 21.34	0.02417
	2002 VE68	2 490 580.23	2106	Nov. 16.73	0.02418
	1998 BB10	2 491 560.21	2109	July 23.71	0.02418
	1998 BB10	2 479 506.60	2076	July 22.10	0.02419
	1998 HE3	2 473 224.91	2059	May 11.41	0.02427
	1999 FA	2 486 309.11	2095	Mar. 7.61	0.02432
	2002 AW	2 513 916.47	2170	Oct. 7.97	0.02432
	1999 VP11	2 515 392.68	2174	Oct. 23.18	0.02435
	2001 OY13	2 473 652.23	2060	July 11.73	0.02439
(68347)	2001 KB67	2 458 267.62	2018	May 29.12	0.02440
	2002 HK12	2 507 236.66	2152	June 24.16	0.02443
	1999 MM	2 483 881.58	2088	July 14.08	0.02443
(4581)	Asclepius	2 510 065.95	2160	Mar. 23.45	0.02446
	1999 GL4	2 464 760.38	2036	Mar. 7.88	0.02450
(27002)	1998 DV9	2 486 280.53	2095	Feb. 7.03	0.02456
(41429)	2000 GE2	2 483 065.17	2086	Apr. 19.67	0.02462
(7822)	(7822)	2 514 244.82	2171	Sept. 1.32	0.02466
	1996 RG3	2 486 666.09	2096	Feb. 27.59	0.02470
	2000 EV70	2 471 854.43	2055	Aug. 9.93	0.02473
	1978 CA	2 505 481.60	2147	Sept. 4.10	0.02473
	2002 EU11	2 455 068.28	2009	Aug. 24.78	0.02482
(7753)	1988 XB	2 503 223.28	2141	June 28.78	0.02485
	1998 VO	2 507 915.37	2154	May 3.87	0.02489
	2002 CQ11	2 476 516.72	2068	May 15.22	0.02491
	2003 BR47	2 501 980.96	2138	Feb. 2.46	0.02493
(7822)	(7822)	2 475 528.66	2065	Aug. 31.16	0.02498
(68216)	2001 CV26	2 472 279.86	2056	Oct. 8.36	0.02504
(8566)	1996 EN	2 477 363.01	2070	Sept. 8.51	0.02514
	2000 CO101	2 472 623.29	2057	Sept. 16.79	0.02515
(68216)	2001 CV26	2 455 113.16	2009	Oct. 8.66	0.02518
	1998 SJ70	2 468 068.51	2045	Mar. 29.01	0.02520
	2000 YF29	2 481 887.29	2083	Jan. 27.79	0.02526
	1994 CC	2 486 409.37	2095	June 15.87	0.02545
	2002 SY50	2 470 472.84	2051	Oct. 28.34	0.02558
	1998 FW4	2 460 948.29	2025	Sept. 29.79	0.02576
(20425)	1998 VD35	2 467 016.73	2042	May 12.23	0.02576
(66391)	1999 KW4	2 509 765.18	2159	May 27.68	0.02584
	1999 AQ10	2 507 476.48	2153	Feb. 18.98	0.02584
	2003 YM137	2 463 773.68	2033	June 25.18	0.02584

	2000 GJ147	2 487 841.24	2099	May 17.74	0.02585
	2002 JX8	2 460 806.68	2025	May 11.18	0.02595
	2002 HK12	2 477 284.63	2070	June 22.13	0.02599
	2001 QQ142	2 468 331.65	2045	Dec. 17.15	0.02603
	2001 FC58	2 464 408.15	2035	Mar. 21.65	0.02611
	1998 FW4	2 462 409.52	2029	Sept.30.02	0.02614
(4660)	Nereus	2 459 560.08	2021	Dec. 11.58	0.02630
	2002 FB3	2 480 867.71	2080	Apr. 13.21	0.02632
	2002 JX8	2 484 558.48	2090	May 21.98	0.02646
	2000 GJ147	2 489 667.40	2104	May 17.90	0.02648
	2000 AA6	2 473 471.00	2060	Jan. 12.50	0.02656
	2001 SG286	2 503 188.69	2141	May 25.19	0.02663
	1989 UP	2 470 148.86	2050	Dec. 8.36	0.02673
	1997 XR2	2 509 579.91	2158	Nov. 23.41	0.02674
	2001 SY269	2 453 082.82	2004	Mar. 18.32	0.02676
	2001 OY13	2 490 815.85	2107	July 10.35	0.02678
	2002 HK12	2 494 894.74	2118	Sept. 9.24	0.02684
	2003 TK2	2 488 351.77	2100	Oct. 10.27	0.02687
(7335)	(7335)	2 459 727.10	2022	May 27.60	0.02690
	1999 UR	2 463 897.02	2033	Oct. 26.52	0.02693
	2001 QQ142	2 514 719.07	2172	Dec. 18.57	0.02694
(31669)	1999 JT6	2 479 652.38	2076	Dec. 14.88	0.02700
	1996 JG	2 502 458.63	2139	May 26.13	0.02703
	2003 HF2	2 465 143.94	2037	Mar. 26.44	0.02709
	1995 YR1	2 457 381.06	2015	Dec. 24.56	0.02712
	2002 WQ4	2 510 719.67	2162	Jan. 6.17	0.02731
	2002 AJ129	2 458 154.43	2018	Feb. 4.93	0.02732
(33342)	(33342)	2 466 509.12	2040	Dec. 20.62	0.02736
	1998 SH36	2 514 160.66	2171	June 9.16	0.02740
	1993 VD	2 507 360.58	2152	Oct. 26.08	0.02740
	2003 YT1	2 493 302.65	2114	May 1.15	0.02754
	1998 VO	2 490 018.31	2105	May 3.81	0.02755
	1997 XR2	2 467 769.36	2044	June 2.86	0.02762
	1997 NC1	2 483 865.75	2088	June 28.25	0.02787
	2003 MS2	2 477 293.48	2070	June 30.98	0.02792
(33342)	2003 FC5	2 506 038.02	2149	Mar. 13.52	0.02797
(33342)	(33342)	2 457 368.05	2015	Dec. 11.55	0.02799
(3671)	Dionysus	2 482 759.85	2085	June 18.35	0.02800
	1998 WB2	2 460 401.61	2024	Apr. 1.11	0.02803
	1999 MN	2 457 177.78	2015	June 4.28	0.02804
	2001 EB18	2 511 321.72	2163	Aug. 31.22	0.02808
	2000 HA24	2 480 475.48	2079	Mar. 17.98	0.02810
	1995 CR	2 468 398.49	2046	Feb. 21.99	0.02810
	2001 BO61	2 510 601.26	2161	Sept. 9.76	0.02818
(25143)	Itokawa	2 477 576.54	2071	Apr. 10.04	0.02818
	1988 TA	2 490 028.64	2105	May 14.14	0.02828
	1989 UP	2 507 405.66	2152	Dec. 10.16	0.02830
	2003 YX1	2 492 802.64	2112	Dec. 17.14	0.02837

	1998 FW4	2 486 159.41	2094	Oct. 8.91	0.02837
	2001 SX169	2 494 635.87	2117	Dec. 24.37	0.02838
	2001 GQ2	2 511 926.57	2165	Apr. 27.07	0.02844
	2001 KF54	2 474 376.24	2062	July 5.74	0.02844
(41429)	2000 GE2	2 467 158.04	2042	Sept.30.54	0.02849
	2001 US16	2 453 134.18	2004	May 8.68	0.02850
	2001 WS1	2 467 521.43	2043	Sept.28.93	0.02852
	2002 QQ40	2 495 998.60	2121	Sept. 17.10	0.02868
(7822)	(7822)	2 505 113.24	2146	Aug. 31.74	0.02869
	2000 WO107	2 459 182.71	2020	Nov. 29.21	0.02873
(7753)	1988 XB	2 497 381.38	2125	June 30.88	0.02876
	2003 YT1	2 505 721.30	2148	Apr. 30.80	0.02893
	1999 MN	2 466 347.42	2040	July 11.92	0.02894
	1999 RQ36	2 498 200.84	2127	Sept.28.34	0.02896
	2003 AD23	2 502 678.66	2140	Jan. 1.16	0.02900
(13651)	(13651)	2 470 376.11	2051	July 23.61	0.02908
	2002 TD66	2 515 519.51	2175	Feb. 27.01	0.02909
	2001 XR30	2 505 754.80	2148	June 3.30	0.02913
(12538)	1998 OH	2 467 007.80	2042	May 3.30	0.02920
	2002 NV16	2 479 231.88	2075	Oct. 21.38	0.02925
	1999 GS6	2 494 004.25	2116	Apr. 1.75	0.02938
	2001 AD2	2 487 432.01	2098	Apr. 3.51	0.02948
	2003 MA3	2 497 383.10	2125	July 2.60	0.02952
	2002 RW25	2 502 595.35	2139	Oct. 9.85	0.02955
	2001 RA12	2 463 818.21	2033	Aug. 8.71	0.02956
	2002 KJ4	2 491 146.73	2108	June 5.23	0.02957
(2135)	Aristaeus	2 505 324.23	2147	Mar. 30.73	0.02974
	2002 JX8	2 468 488.64	2046	May 23.14	0.02982
	1998 KJ9	2 489 898.12	2105	Jan. 3.62	0.02983
	1999 UR	2 512 475.60	2166	Oct. 28.10	0.02988
	2002 FC	2 502 450.07	2139	May 17.57	0.02988
	1995 CR	2 487 026.64	2097	Feb. 22.14	0.02990
	2001 US16	2 479 076.66	2075	May 19.16	0.02993
	1996 EO	2 515 357.23	2174	Sept. 17.73	0.02998
	2002 VE68	2 487 651.83	2098	Nov. 9.33	0.03008
	1996 FG3	2 512 505.86	2166	Nov. 27.36	0.03008
	2004 BV1	2 495 913.92	2121	June 24.42	0.03014
	1998 HE3	2 478 338.35	2073	May 10.85	0.03014
	2003 SD220	2 496 456.88	2122	Dec. 19.38	0.03020
	2002 YP2	2 466 285.84	2040	May 11.34	0.03020
	1998 QP	2 511 683.64	2164	Aug. 27.14	0.03026
(8566)	1996 EN	2 463 849.11	2033	Sept. 8.61	0.03031
	2004 CL	2 456 115.69	2012	July 7.19	0.03042
	2002 VE68	2 503 356.66	2141	Nov. 9.16	0.03043
(9856)	(9856)	2 475 535.03	2065	Sept. 6.53	0.03047
	2003 AD23	2 474 187.26	2061	Dec. 28.76	0.03068
	2000 RW37	2 468 765.52	2047	Feb. 24.02	0.03075
(41429)	2000 GE2	2 482 335.38	2084	Apr. 19.88	0.03076

	2002 NV16	2 501 871.69	2137	Oct. 16.19	0.03079
	2002 FB3	2 478 676.20	2074	Apr. 13.70	0.03080
	2001 SG286	2 454 968.81	2009	May 17.31	0.03081
(4953)	(4953)	2 461 563.45	2027	June 6.95	0.03084
	2002 NV16	2 460 608.90	2024	Oct. 25.40	0.03101
	2001 AD2	2 462 231.17	2029	Apr. 4.67	0.03101
	1997 XR2	2 484 936.42	2091	June 3.92	0.03108
	2001 AD2	2 465 049.93	2036	Dec. 22.43	0.03119
	2003 ED50	2 474 264.01	2062	Mar. 15.51	0.03119
	2003 AF23	2 496 839.58	2124	Jan. 6.08	0.03129
	1998 VO	2 468 466.32	2046	Apr. 30.82	0.03138
	1994 WR12	2 480 360.44	2078	Nov. 22.94	0.03145
	2002 VE68	2 493 509.46	2114	Nov. 23.96	0.03156
	2003 AF23	2 500 126.80	2133	Jan. 5.30	0.03162
	2001 US16	2 464 086.49	2034	May 3.99	0.03163
	2000 CO101	2 486 868.81	2096	Sept. 17.31	0.03163
(12538)	2002 DO3	2 466 319.46	2040	June 13.96	0.03169
	1998 OH	2 499 878.79	2132	May 2.29	0.03170
	1998 HE3	2 496 966.86	2124	May 12.36	0.03174
	1998 SC15	2 466 981.71	2042	Apr. 7.21	0.03184
	1998 HE3	2 456 058.25	2012	May 10.75	0.03192
	2003 WR21	2 488 977.52	2102	June 28.02	0.03193
	1999 MM	2 510 176.91	2160	July 12.41	0.03199
	2000 AZ93	2 514 001.91	2171	Jan. 1.41	0.03202
	2002 TB70	2 506 063.92	2149	Apr. 8.42	0.03206
	2001 US16	2 511 960.62	2165	May 31.12	0.03209
	1999 MN	2 487 494.34	2098	June 4.84	0.03212
	1999 MN	2 475 844.13	2066	July 12.63	0.03216
	2003 UV11	2 493 119.58	2113	Oct. 30.08	0.03222
	2001 EB18	2 476 987.33	2069	Aug. 28.83	0.03232
	2002 VP69	2 515 489.38	2175	Jan. 27.88	0.03242
	2002 DO3	2 512 707.25	2167	June 16.75	0.03254
	1989 UP	2 480 381.07	2078	Dec. 13.57	0.03257
	1999 AN10	2 483 903.74	2088	Aug. 5.24	0.03261
	2001 WN5	2 501 027.30	2135	June 24.80	0.03269
	2000 AF6	2 500 105.09	2132	Dec. 14.59	0.03274
	2004 DV24	2 482 116.07	2083	Sept. 13.57	0.03278
	2000 HA24	2 498 569.65	2128	Oct. 1.15	0.03282
	2000 EV70	2 494 712.37	2118	Mar. 10.87	0.03284
	1998 HH49	2 511 372.39	2163	Oct. 20.89	0.03288
	2003 AF23	2 503 414.05	2142	Jan. 5.55	0.03299
	2002 RW25	2 478 425.53	2073	Aug. 6.03	0.03301
	2002 JX8	2 476 871.39	2069	May 4.89	0.03311
	1999 RQ36	2 453 633.95	2005	Sept. 20.45	0.03313
	2000 AZ93	2 470 172.89	2051	Jan. 1.39	0.03315
	2002 SM	2 499 118.73	2130	Apr. 3.23	0.03322
	2002 VR85	2 465 179.55	2037	May 1.05	0.03322
	2001 EC	2 493 075.15	2113	Sept. 15.65	0.03328

	1994 RC	2 515 688.07	2175	Aug. 14.57	0.03331
	2003 TR9	2 505 152.97	2146	Oct. 10.47	0.03332
	2001 AD2	2 503 036.70	2140	Dec. 24.20	0.03337
	2001 GN2	2 489 967.61	2105	Mar. 14.11	0.03351
	2000 YV137	2 461 261.72	2026	Aug. 9.22	0.03352
	2001 HY7	2 507 510.42	2153	Mar. 24.92	0.03354
	2003 ED50	2 485 953.29	2094	Mar. 16.79	0.03354
	2002 RW25	2 489 018.29	2102	Aug. 7.79	0.03356
	1999 NC43	2 514 777.23	2173	Feb. 14.73	0.03363
	2003 RM10	2 501 461.85	2136	Sept. 1.35	0.03369
(33342)	(33342)	2 499 368.38	2130	Dec. 8.88	0.03377
	1998 ST27	2 478 492.48	2073	Oct. 11.98	0.03385
	1999 UR	2 490 578.86	2106	Nov. 15.36	0.03387
	2003 YX1	2 465 044.58	2036	Dec. 17.08	0.03394
	2002 AM31	2 463 442.64	2032	July 29.14	0.03406
(41429)	2003 WR21	2 515 276.23	2174	June 28.73	0.03406
	2000 GE2	2 484 523.98	2090	Apr. 17.48	0.03413
	1999 MN	2 477 997.73	2072	June 4.23	0.03420
	2002 GT	2 471 931.41	2055	Oct. 25.91	0.03421
	2002 TB70	2 461 138.29	2026	Apr. 7.79	0.03431
	2002 NN4	2 459 006.64	2020	June 6.14	0.03438
	2003 GY	2 470 042.68	2050	Aug. 24.18	0.03447
	2000 EE104	2 506 796.92	2151	Apr. 11.42	0.03450
	2001 HY7	2 510 067.13	2160	Mar. 24.63	0.03455
	2002 LT38	2 462 680.28	2030	June 27.78	0.03457
	1999 MN	2 493 008.67	2113	July 11.17	0.03458
(66391)	1999 KW4	2 458 629.46	2019	May 25.96	0.03464
	2003 YT1	2 457 692.90	2016	Oct. 31.40	0.03470
	2003 UX34	2 476 265.64	2067	Sept. 7.14	0.03473
	2002 CU11	2 456 899.63	2014	Aug. 30.13	0.03474
	1996 JG	2 511 410.17	2163	Nov. 27.67	0.03476
	2002 NN4	2 512 698.81	2167	June 8.31	0.03477
	2001 HY7	2 472 080.86	2056	Mar. 23.36	0.03482
	2000 AZ93	2 477 478.98	2071	Jan. 2.48	0.03483
	2001 FC58	2 477 191.64	2070	Mar. 21.14	0.03488
	2002 PF43	2 480 994.01	2080	Aug. 17.51	0.03496
(33342)	(33342)	2 482 931.50	2085	Dec. 7.00	0.03497
(22753)	(22753)	2 493 247.52	2114	Mar. 7.02	0.03505
	2000 HA24	2 465 694.36	2038	Sept. 27.86	0.03507
	2003 AF23	2 493 552.40	2115	Jan. 5.90	0.03512
	2002 AM31	2 456 131.49	2012	July 22.99	0.03514
	2002 WQ4	2 479 676.87	2077	Jan. 8.37	0.03517
	2002 QQ40	2 505 861.60	2148	Sept. 18.10	0.03518
	1996 EO	2 475 545.81	2065	Sept. 17.31	0.03523
	2000 RS11	2 456 727.89	2014	Mar. 11.39	0.03524
	1998 SH36	2 476 905.21	2069	June 7.71	0.03524
	1996 EO	2 510 242.64	2160	Sept. 16.14	0.03526
	2004 BW58	2 502 341.31	2139	Jan. 28.81	0.03528

	2000 YV137	2 493 041.68	2113	Aug. 13.18	0.03530
	2002 PF43	2 514 961.56	2173	Aug. 18.06	0.03535
	2002 VE68	2 455 507.65	2010	Nov. 7.15	0.03536
	2002 TD66	2 501 639.92	2137	Feb. 26.42	0.03537
	2000 EW70	2 495 457.71	2120	Mar. 25.21	0.03541
	1999 BJ8	2 471 322.96	2054	Feb. 24.46	0.03550
	2002 NV16	2 456 567.22	2013	Oct. 1.72	0.03553
	2001 XP1	2 499 011.09	2129	Dec. 16.59	0.03562
	2000 QW7	2 458 741.51	2019	Sept. 15.01	0.03565
	2003 GQ22	2 510 448.32	2161	Apr. 9.82	0.03567
	2003 AF23	2 459 218.32	2021	Jan. 3.82	0.03568
(2101)	Adonis	2 464 730.76	2036	Feb. 7.26	0.03569
	2000 QS7	2 467 849.96	2044	Aug. 22.46	0.03577
	1996 EO	2 470 432.40	2051	Sept. 17.90	0.03578
	1991 GO	2 484 352.05	2089	Oct. 27.55	0.03578
	1999 MN	2 502 835.27	2140	June 5.77	0.03579
	1994 WR12	2 503 376.36	2141	Nov. 28.86	0.03580
	1998 KM3	2 484 943.83	2091	June 11.33	0.03581
	1999 RM45	2 486 490.90	2095	Sept. 5.40	0.03584
	2002 LT38	2 489 344.05	2103	June 29.55	0.03594
	1993 VD	2 482 979.34	2086	Jan. 23.84	0.03602
	2003 AF23	2 455 931.03	2012	Jan. 4.53	0.03605
	2001 QQ142	2 460 285.59	2023	Dec. 7.09	0.03606
	1994 XL1	2 496 444.41	2122	Dec. 6.91	0.03617
	2003 SD220	2 459 566.24	2021	Dec. 17.74	0.03622
	2003 QH5	2 503 975.12	2143	July 20.62	0.03624
	1999 SO5	2 514 096.74	2171	Apr. 6.24	0.03631
	2002 VE68	2 484 724.98	2090	Nov. 4.48	0.03631
	1999 RQ36	2 512 081.62	2165	Sept. 29.12	0.03636
	2002 NV16	2 493 780.93	2115	Aug. 22.43	0.03643
	2003 FH	2 487 443.03	2098	Apr. 14.53	0.03651
	2003 AA3	2 500 860.31	2135	Jan. 8.81	0.03657
	1993 VD	2 474 122.77	2061	Oct. 25.27	0.03667
	1994 XL1	2 463 936.54	2033	Dec. 5.04	0.03672
	1994 WR12	2 505 568.02	2147	Nov. 29.52	0.03677
	2000 EW70	2 499 110.27	2130	Mar. 25.77	0.03679
	2000 SP43	2 496 367.49	2122	Sept. 20.99	0.03679
	1993 VD	2 458 141.29	2018	Jan. 22.79	0.03680
	2000 GJ147	2 486 013.89	2094	May 16.39	0.03683
	2002 CQ11	2 516 203.10	2177	Jan. 10.60	0.03685
	2002 AJ129	2 486 281.71	2095	Feb. 8.21	0.03686
	1991 AQ	2 500 353.34	2133	Aug. 19.84	0.03693
	1998 VO	2 472 122.09	2056	May 3.59	0.03694
	2000 ET70	2 473 143.89	2059	Feb. 19.39	0.03695
(3361)	Orpheus	2 509 216.10	2157	Nov. 24.60	0.03697
	2003 FC5	2 464 258.76	2034	Oct. 23.26	0.03701
	2000 UL11	2 510 809.21	2162	Apr. 5.71	0.03707
	2001 AD2	2 484 043.63	2088	Dec. 23.13	0.03725

(52768)	1998 OR2	2 515 564.47	2175	Apr. 12.97	0.03725
	2001 EB18	2 486 850.72	2096	Aug. 30.22	0.03731
	1999 MN	2 476 168.71	2067	June 2.21	0.03742
	2000 EE104	2 462 817.03	2030	Nov. 11.53	0.03751
	2001 SQ3	2 507 141.18	2152	Mar. 20.68	0.03754
(52760)	1998 ML14	2 493 489.79	2114	Nov. 4.29	0.03759
	2001 HY7	2 504 953.86	2146	Mar. 25.36	0.03760
	2002 VE68	2 458 427.43	2018	Nov. 4.93	0.03761
	1994 CN2	2 465 716.64	2038	Oct. 20.14	0.03761
	2000 PP9	2 489 411.31	2103	Sept. 4.81	0.03762
	1999 GS6	2 512 427.17	2166	Sept. 9.67	0.03772
(35396)	(35396)	2 488 935.56	2102	May 17.06	0.03776
	2002 LX	2 475 787.58	2066	May 17.08	0.03777
	2001 SQ3	2 500 017.71	2132	Sept. 18.21	0.03778
(66391)	1999 KW4	2 503 191.26	2141	May 27.76	0.03789
(3757)	(3757)	2 478 924.80	2074	Dec. 18.30	0.03792
(3361)	Orpheus	2 460 998.56	2025	Nov. 19.06	0.03793
	2000 AZ93	2 506 700.28	2151	Jan. 4.78	0.03794
	2003 QO104	2 495 870.46	2121	May 11.96	0.03801
	1998 VF32	2 488 761.01	2101	Nov. 23.51	0.03802
	1998 QC1	2 470 557.15	2052	Jan. 20.65	0.03806
	2002 AY1	2 456 300.46	2013	Jan. 7.96	0.03814
	1991 GO	2 481 428.29	2081	Oct. 25.79	0.03815
	1998 VF32	2 484 743.19	2090	Nov. 22.69	0.03834
	2003 AF23	2 506 701.27	2151	Jan. 5.77	0.03840
	1999 RR28	2 512 629.24	2167	Mar. 30.74	0.03842
	2002 AC9	2 466 886.98	2042	Jan. 2.48	0.03843
	2003 AC23	2 490 662.32	2107	Feb. 6.82	0.03844
	2002 PF43	2 474 055.47	2061	Aug. 18.97	0.03845
	2002 NV16	2 516 421.46	2177	Aug. 16.96	0.03845
	1999 TT16	2 457 336.60	2015	Nov. 10.10	0.03847
	2004 BW58	2 465 815.70	2039	Jan. 27.20	0.03849
	2003 GG21	2 469 901.74	2050	Apr. 5.24	0.03855
(3361)	Orpheus	2 459 540.31	2021	Nov. 21.81	0.03856
	2002 LX	2 477 251.28	2070	May 19.78	0.03858
	2002 NV16	2 497 827.72	2126	Sept. 20.22	0.03861
	2002 PZ39	2 458 894.96	2020	Feb. 15.46	0.03861
	2000 RD53	2 467 508.09	2043	Sept. 15.59	0.03871
	2002 LT38	2 516 007.92	2176	June 29.42	0.03873
	2002 NV16	2 475 183.38	2064	Sept. 19.88	0.03875
	2000 KA	2 501 911.63	2137	Nov. 25.13	0.03876
	2002 AY1	2 460 318.26	2024	Jan. 8.76	0.03879
(35396)	(35396)	2 484 556.34	2090	May 19.84	0.03882
	2001 US16	2 494 085.52	2116	June 22.02	0.03890
	2000 JG5	2 468 097.36	2045	Apr. 26.86	0.03891
	2003 YT1	2 482 896.99	2085	Nov. 2.49	0.03898
(7822)	(7822)	2 484 660.66	2090	Sept. 1.16	0.03904
	2001 UA5	2 483 655.03	2087	Nov. 30.53	0.03904

	1994 XL1	2 482 200.63	2083	Dec. 7.13	0.03905
	2000 LB16	2 470 520.43	2051	Dec. 14.93	0.03911
	1997 WQ23	2 464 896.30	2036	July 21.80	0.03913
(65803)	1996 GT	2 496 776.75	2123	Nov. 4.25	0.03914
(65803)	(65803)	2 496 776.74	2123	Nov. 4.24	0.03915
	2002 PZ39	2 509 666.28	2159	Feb. 17.78	0.03919
	1999 MN	2 466 672.15	2041	June 1.65	0.03927
	1999 RQ36	2 471 540.55	2054	Sept.30.05	0.03932
(8014)	(8014)	2 481 019.95	2080	Sept.12.45	0.03932
	1998 SH36	2 509 906.62	2159	Oct. 16.12	0.03933
(66391)	1999 KW4	2 490 407.38	2106	May 27.88	0.03936
	2002 FB3	2 481 598.22	2082	Apr. 13.72	0.03938
(22753)	(22753)	2 466 217.81	2040	Mar. 4.31	0.03939
	2001 SX169	2 486 765.91	2096	June 6.41	0.03949
	1999 TT16	2 478 298.97	2073	Apr. 1.47	0.03952
	2003 MA3	2 479 690.33	2077	Jan. 21.83	0.03966
	1998 VF32	2 492 778.82	2112	Nov. 23.32	0.03966
	2000 EE104	2 506 431.48	2150	Apr. 10.98	0.03968
	2000 QW7	2 512 417.38	2166	Aug.30.88	0.03975
	1991 GO	2 478 505.35	2073	Oct. 24.85	0.03978
	2000 EE104	2 507 161.98	2152	Apr. 10.48	0.03980
	2002 GZ8	2 511 455.22	2164	Jan. 11.72	0.03982
	2001 XN254	2 483 415.26	2087	Apr. 4.76	0.03983
	2002 GM2	2 479 737.36	2077	Mar. 9.86	0.04004
	2003 WR21	2 493 723.22	2115	June 25.72	0.04009
	2003 GQ22	2 492 915.97	2113	Apr. 9.47	0.04014
	2002 HP11	2 464 226.05	2034	Sept.20.55	0.04017
	2002 VE68	2 461 347.33	2026	Nov. 2.83	0.04019
	1997 GL3	2 458 017.24	2017	Sept.20.74	0.04031
	1995 CR	2 480 084.68	2078	Feb. 20.18	0.04032
	2003 QH5	2 482 796.11	2085	July 24.61	0.04037
	1992 UY4	2 453 590.88	2005	Aug. 8.38	0.04038
	2003 KO2	2 472 480.28	2057	Apr. 26.78	0.04041
	2001 DF47	2 499 254.38	2130	Aug. 16.88	0.04045
	2003 ED50	2 493 443.92	2114	Sept.19.42	0.04045
	2000 AZ93	2 462 872.75	2031	Jan. 6.25	0.04047
	1994 CN2	2 501 129.97	2135	Oct. 5.47	0.04050
	2003 MS2	2 508 708.00	2156	July 4.50	0.04054
	2001 TC45	2 479 972.43	2077	Oct. 30.93	0.04055
	2000 EE104	2 463 183.01	2031	Nov. 12.51	0.04062
	2000 QW7	2 483 583.00	2087	Sept.19.50	0.04065
	2003 HG2	2 469 376.35	2048	Oct. 26.85	0.04066
	1998 QC1	2 489 915.20	2105	Jan. 20.70	0.04068
	1999 CF9	2 516 631.61	2178	Mar. 15.11	0.04069
	2003 HG2	2 506 995.87	2151	Oct. 27.37	0.04071
	2001 BE10	2 515 475.81	2175	Jan. 14.31	0.04071
(2340)	Hathor	2 513 932.01	2170	Oct. 23.51	0.04075
(25143)	Itokawa	2 464 856.14	2036	June 11.64	0.04076

	2003 AD23	2 467 249.15	2042	Dec. 30.65	0.04082
	2002 LT38	2 513 448.37	2169	June 26.87	0.04088
	2000 HA24	2 464 040.38	2034	Mar. 18.88	0.04088
	2003 AF23	2 462 505.56	2030	Jan. 4.06	0.04089
	2001 HY7	2 474 637.56	2063	Mar. 24.06	0.04093
	1997 XR2	2 513 231.44	2168	Nov. 21.94	0.04095
	2001 SQ3	2 461 850.05	2028	Mar. 19.55	0.04098
	2002 QQ40	2 485 255.81	2092	Apr. 18.31	0.04101
	2001 HY7	2 512 623.92	2167	Mar. 25.42	0.04102
	2001 BE10	2 473 472.10	2060	Jan. 13.60	0.04102
	2001 JV1	2 477 289.17	2070	June 26.67	0.04107
	2003 WC158	2 503 003.87	2140	Nov. 21.37	0.04110
	2000 GJ147	2 491 492.36	2109	May 16.86	0.04111
	2002 VE68	2 509 217.11	2157	Nov. 25.61	0.04111
	1994 XL1	2 510 688.16	2161	Dec. 5.66	0.04115
	1997 BQ	2 458 991.41	2020	May 21.91	0.04115
	1993 VD	2 509 642.17	2159	Jan. 24.67	0.04117
	1998 QP	2 487 943.27	2099	Aug. 27.77	0.04122
	2003 FH	2 515 026.48	2173	Oct. 21.98	0.04130
(68347)	2001 KB67	2 488 583.28	2101	May 29.78	0.04132
(6489)	Golevka	2 510 891.45	2162	June 26.95	0.04145
	1998 HL1	2 502 978.18	2140	Oct. 26.68	0.04149
	2003 CC	2 497 006.76	2124	June 21.26	0.04150
	2002 TB70	2 486 699.96	2096	Apr. 1.46	0.04151
	2002 LX	2 500 631.26	2134	May 24.76	0.04154
	1998 HL1	2 458 782.22	2019	Oct. 25.72	0.04155
	2000 EE104	2 462 451.14	2029	Nov. 10.64	0.04160
	2000 JG5	2 489 647.11	2104	Apr. 27.61	0.04161
	1994 XL1	2 514 708.52	2172	Dec. 8.02	0.04162
	2003 BR47	2 511 105.45	2163	Jan. 26.95	0.04166
	1998 HH49	2 486 529.24	2095	Oct. 13.74	0.04169
	2002 NV16	2 471 129.87	2053	Aug. 15.37	0.04170
	2002 VE68	2 481 799.89	2082	Nov. 1.39	0.04170
	2003 FH	2 508 452.60	2155	Oct. 23.10	0.04187
	2002 AW	2 463 321.47	2032	Mar. 29.97	0.04193
	2002 AY1	2 487 711.55	2099	Jan. 8.05	0.04194
(8014)	(8014)	2 491 919.34	2110	July 17.84	0.04197
	2003 AC23	2 468 832.00	2047	May 1.50	0.04198
	2001 WN5	2 488 343.08	2100	Oct. 1.58	0.04199
(52768)	1998 OR2	2 458 968.91	2020	Apr. 29.41	0.04203
(37655)	Illapa	2 491 586.69	2109	Aug. 19.19	0.04207
	2001 WN5	2 505 875.61	2148	Oct. 2.11	0.04209
	2002 TD66	2 454 522.60	2008	Feb. 26.10	0.04210
	2001 BE10	2 495 022.32	2119	Jan. 14.82	0.04213
	2000 GF2	2 509 516.15	2158	Sept. 20.65	0.04213
	2001 SQ3	2 474 814.04	2063	Sept. 16.54	0.04221
	1998 ST27	2 502 599.79	2139	Oct. 14.29	0.04223
	1988 TA	2 456 421.64	2013	May 9.14	0.04225

	2000 DP107	2 476 278.96	2067	Sept.20.46	0.04237
	2003 EG16	2 506 929.10	2151	Aug.21.60	0.04238
	2002 AC9	2 487 924.05	2099	Aug. 8.55	0.04238
	2002 CD14	2 462 020.64	2028	Sept. 6.14	0.04242
	1999 FA	2 461 468.71	2027	Mar. 4.21	0.04243
	2000 EH26	2 471 047.10	2053	May 24.60	0.04244
	1989 UP	2 499 015.50	2129	Dec. 21.00	0.04247
	2001 US16	2 468 153.78	2045	June 22.28	0.04249
	1998 OX4	2 504 894.65	2146	Jan. 25.15	0.04257
	2000 ET70	2 468 760.90	2047	Feb. 19.40	0.04264
(33342)	(33342)	2 476 737.63	2068	Dec. 22.13	0.04268
	2000 PD3	2 486 984.83	2097	Jan. 11.33	0.04270
	2002 RW25	2 480 631.99	2079	Aug.21.49	0.04271
(25143)	Itokawa	2 513 799.26	2170	June 12.76	0.04273
	2003 AY2	2 460 849.23	2025	June 22.73	0.04281
(39572)	1993 DQ1	2 503 618.00	2142	July 28.50	0.04283
	2002 AP3	2 507 228.91	2152	June 16.41	0.04285
	1994 WR12	2 481 821.17	2082	Nov. 22.67	0.04286
	2002 CQ11	2 495 383.92	2120	Jan. 11.42	0.04292
	2002 AM31	2 503 247.14	2141	July 22.64	0.04297
	2000 AC6	2 515 431.71	2174	Dec. 1.21	0.04306
	2002 VE68	2 464 267.54	2034	Nov. 1.04	0.04313
	1998 ST27	2 511 000.62	2162	Oct. 14.12	0.04322
(35107)	1991 VH	2 504 724.05	2145	Aug. 7.55	0.04330
	1998 KM3	2 496 076.79	2121	Dec. 4.29	0.04333
(37655)	Illapa	2 494 871.77	2118	Aug. 17.27	0.04341
	2000 RD53	2 497 107.87	2124	Sept.30.37	0.04346
(33342)	(33342)	2 493 173.98	2113	Dec. 23.48	0.04346
	2003 HG2	2 460 976.26	2025	Oct. 27.76	0.04354
	2000 KA	2 505 372.56	2147	May 18.06	0.04358
(37638)	1993 VB	2 459 997.29	2023	Feb. 21.79	0.04363
	2002 AT4	2 508 230.70	2155	Mar. 15.20	0.04371
	1998 SY14	2 516 915.36	2178	Dec. 23.86	0.04372
	2000 EA14	2 505 847.40	2148	Sept. 3.90	0.04377
	2002 AM31	2 495 941.76	2121	July 22.26	0.04388
	1994 XL1	2 478 180.23	2072	Dec. 3.73	0.04396
	2002 AT4	2 470 975.57	2053	Mar. 14.07	0.04398
	2003 DX10	2 489 252.64	2103	Mar. 30.14	0.04408
	2001 SQ3	2 481 937.15	2083	Mar. 18.65	0.04416
	1997 XR2	2 505 928.41	2148	Nov. 23.91	0.04416
(33342)	(33342)	2 510 680.80	2161	Nov. 28.30	0.04417
	2000 AZ93	2 484 790.02	2091	Jan. 8.52	0.04420
	2003 SS84	2 496 017.98	2121	Oct. 6.48	0.04431
	2003 MH4	2 460 820.09	2025	May 24.59	0.04434
	1994 CN2	2 500 417.48	2133	Oct. 22.98	0.04437
(2102)	Tantalus	2 465 784.82	2038	Dec. 27.32	0.04440
	2000 EA14	2 510 600.90	2161	Sept. 9.40	0.04440
	2002 LT38	2 465 239.10	2037	June 29.60	0.04441

	1998 ST27	2 486 893.16	2096	Oct. 11.66	0.04450
(35107)	1991 VH	2 475 503.94	2065	Aug. 6.44	0.04450
	1993 VD	2 495 672.98	2120	Oct. 26.48	0.04455
	1998 QA1	2 474 382.26	2062	July 11.76	0.04462
	2002 CY9	2 486 266.24	2095	Jan. 23.74	0.04474
	1998 VF32	2 480 725.27	2079	Nov. 22.77	0.04479
	1999 UR	2 468 701.21	2046	Dec. 21.71	0.04480
	2003 BD44	2 491 232.78	2108	Aug. 30.28	0.04480
(4660)	Nereus	2 508 211.24	2155	Feb. 23.74	0.04481
	2003 GQ22	2 505 703.38	2148	Apr. 12.88	0.04482
	2002 JX8	2 502 094.15	2138	May 26.65	0.04486
	2001 KF54	2 461 350.33	2026	Nov. 5.83	0.04489
	2001 SG286	2 506 103.28	2149	May 17.78	0.04490
	2003 QH5	2 474 023.82	2061	July 18.32	0.04493
(2340)	Hathor	2 510 279.52	2160	Oct. 23.02	0.04497
(68216)	2001 CV26	2 490 539.96	2106	Oct. 7.46	0.04499
	1998 FW4	2 456 560.27	2013	Sept. 24.77	0.04500
	2002 RW25	2 497 452.81	2125	Sept. 10.31	0.04502
	2003 EF54	2 472 953.86	2058	Aug. 13.36	0.04507
	2003 BH	2 476 399.81	2068	Jan. 19.31	0.04511
	2002 AY1	2 516 567.38	2178	Jan. 9.88	0.04511
(4581)	Asclepius	2 497 799.81	2126	Aug. 23.31	0.04511
	1978 CA	2 475 898.48	2066	Sept. 4.98	0.04522
	2000 AC6	2 490 961.13	2107	Dec. 2.63	0.04523
	2002 LT38	2 460 120.06	2023	June 24.56	0.04530
	2002 RW25	2 490 156.94	2105	Sept. 19.44	0.04533
(35107)	1991 VH	2 483 913.92	2088	Aug. 15.42	0.04534
	2000 DN1	2 509 007.37	2157	Apr. 29.87	0.04539
	2001 WS1	2 489 058.71	2102	Sept. 17.21	0.04541
	2000 EA14	2 470 422.79	2051	Sept. 8.29	0.04542
	2002 AV	2 505 922.52	2148	Nov. 18.02	0.04542
	2001 SY269	2 474 467.82	2062	Oct. 5.32	0.04544
	2000 ET70	2 455 977.36	2012	Feb. 19.86	0.04544
	2001 FC58	2 490 340.89	2106	Mar. 22.39	0.04544
	2003 KO2	2 479 055.05	2075	Apr. 27.55	0.04548
(27002)	1998 DV9	2 472 772.04	2058	Feb. 12.54	0.04554
	2003 KO2	2 457 503.52	2016	Apr. 25.02	0.04556
	2003 QO104	2 474 319.74	2062	May 10.24	0.04558
	2003 YH136	2 481 885.67	2083	Jan. 26.17	0.04559
	2000 OH	2 491 543.82	2109	July 7.32	0.04560
	1999 GS6	2 472 983.10	2058	Sept. 11.60	0.04563
	1998 FF14	2 474 092.49	2061	Sept. 24.99	0.04565
	2000 DP107	2 479 193.97	2075	Sept. 13.47	0.04570
	2000 CO101	2 455 092.46	2009	Sept. 17.96	0.04573
	2002 LT38	2 486 783.43	2096	June 23.93	0.04573
	1998 FF14	2 505 137.50	2146	Sept. 25.00	0.04573
(66391)	1999 KW4	2 471 413.39	2054	May 25.89	0.04573
(35107)	1991 VH	2 454 694.04	2008	Aug. 15.54	0.04577

	2002 HK12	2 501 040.50	2135	July	8.00	0.04578
	2000 AZ93	2 495 360.35	2119	Dec.	18.85	0.04591
	2002 VE68	2 478 876.07	2074	Oct.	30.57	0.04592
	2003 EE16	2 506 152.82	2149	July	6.32	0.04592
	2001 AD2	2 481 225.02	2081	Apr.	5.52	0.04608
	2002 VE68	2 467 188.12	2042	Oct.	30.62	0.04612
	2002 FB3	2 477 945.64	2072	Apr.	13.14	0.04625
	2002 RW25	2 515 377.69	2174	Oct.	8.19	0.04628
	2001 SX169	2 468 503.67	2046	June	7.17	0.04629
	2002 JE9	2 476 482.32	2068	Apr.	10.82	0.04630
	2003 SS84	2 471 544.95	2054	Oct.	4.45	0.04631
(4179)	Toutatis	2 456 273.78	2012	Dec.	12.28	0.04633
	2002 VR85	2 503 527.20	2142	Apr.	28.70	0.04634
(3757)	(3757)	2 510 713.96	2161	Dec.	31.46	0.04644
	1978 CA	2 485 029.87	2091	Sept.	5.37	0.04648
	2002 LV	2 510 567.87	2161	Aug.	7.37	0.04657
	2000 EV70	2 489 755.06	2104	Aug.	13.56	0.04658
	1998 HL1	2 470 469.57	2051	Oct.	25.07	0.04661
	2004 CL	2 453 025.67	2004	Jan.	21.17	0.04661
	1999 VP11	2 502 611.26	2139	Oct.	25.76	0.04674
	1998 VF32	2 496 796.58	2123	Nov.	24.08	0.04681
	1999 GS6	2 489 254.29	2103	Mar.	31.79	0.04682
(4581)	Asclepius	2 487 938.78	2099	Aug.	23.28	0.04684
	1998 MZ	2 511 612.54	2164	June	17.04	0.04685
	1999 RQ36	2 495 271.90	2119	Sept.	21.40	0.04687
	2003 EF54	2 507 166.88	2152	Apr.	15.38	0.04693
(3671)	Dionysus	2 505 408.74	2147	June	23.24	0.04699
	2000 LF3	2 460 844.30	2025	June	17.80	0.04700
	2000 AZ93	2 499 401.50	2131	Jan.	11.00	0.04701
	1999 JU3	2 511 435.29	2163	Dec.	22.79	0.04704
	2001 UA5	2 512 503.23	2166	Nov.	24.73	0.04704
	2000 CO101	2 504 399.34	2144	Sept.	16.84	0.04706
	2003 HG2	2 477 778.46	2071	Oct.	28.96	0.04707
	2002 GT	2 495 297.32	2119	Oct.	16.82	0.04710
	1999 CF9	2 497 801.80	2126	Aug.	25.30	0.04712
	2002 AC9	2 455 421.64	2010	Aug.	13.14	0.04716
	1999 MN	2 514 192.08	2171	July	10.58	0.04716
(65717)	1993 BX3	2 459 231.86	2021	Jan.	17.36	0.04733
	2000 EA14	2 475 172.64	2064	Sept.	9.14	0.04736
	2001 HY7	2 469 524.50	2049	Mar.	24.00	0.04741
	1999 JU3	2 463 952.74	2033	Dec.	21.24	0.04744
	2003 MK4	2 503 411.25	2142	Jan.	2.75	0.04746
	2000 DP107	2 503 665.81	2142	Sept.	14.31	0.04747
	2003 GY	2 490 144.92	2105	Sept.	7.42	0.04748
	1999 MN	2 468 502.42	2046	June	5.92	0.04749
	1999 YG3	2 476 030.42	2067	Jan.	14.92	0.04767
	2001 XT1	2 508 685.80	2156	June	12.30	0.04767
	2000 AZ93	2 455 573.23	2011	Jan.	11.73	0.04769

	2000 DK79	2 489 475.46	2103	Nov.	7.96	0.04773
(68216)	2001 CV26	2 511 001.15	2162	Oct.	14.65	0.04778
	2000 ET70	2 491 041.17	2108	Feb.	20.67	0.04779
	2001 QQ142	2 496 807.71	2123	Dec.	5.21	0.04781
	2001 XR30	2 473 974.98	2061	May	30.48	0.04781
(22753)	(22753)	2 480 465.11	2079	Mar.	7.61	0.04785
	2003 QO104	2 484 545.99	2090	May	9.49	0.04788
	1999 MN	2 474 014.27	2061	July	8.77	0.04796
	1999 MN	2 508 676.36	2156	June	2.86	0.04800
	1999 RB32	2 508 061.67	2154	Sept.	27.17	0.04801
	1998 KM3	2 471 609.59	2054	Dec.	8.09	0.04815
	2000 EA14	2 465 676.54	2038	Sept.	10.04	0.04819
(2340)	Hathor	2 456 952.39	2014	Oct.	21.89	0.04825
	2001 KF54	2 508 460.53	2155	Oct.	31.03	0.04833
	1994 WR12	2 460 279.52	2023	Dec.	1.02	0.04834
	1998 HL1	2 491 290.74	2108	Oct.	27.24	0.04835
	2000 HA24	2 496 914.45	2124	Mar.	20.95	0.04837
	1999 YG3	2 481 876.03	2083	Jan.	16.53	0.04837
	2003 AC23	2 505 706.98	2148	Apr.	16.48	0.04839
(3361)	Orpheus	2 507 751.78	2153	Nov.	21.28	0.04844
(1981)	Midas	2 498 924.10	2129	Sept.	20.60	0.04847
	2002 AY1	2 491 729.24	2110	Jan.	8.74	0.04851
	2003 MA3	2 466 537.55	2041	Jan.	18.05	0.04853
	2002 VE68	2 470 109.19	2050	Oct.	29.69	0.04853
	1997 WQ23	2 485 083.71	2091	Oct.	29.21	0.04855
(65679)	1989 UQ	2 497 790.85	2126	Aug.	14.35	0.04856
	2003 SD220	2 516 541.81	2177	Dec.	15.31	0.04862
	2002 VE68	2 475 953.11	2066	Oct.	29.61	0.04867
	2003 SD220	2 476 373.62	2067	Dec.	24.12	0.04869
	1998 HE3	2 491 853.09	2110	May	12.59	0.04871
	1993 VD	2 479 690.87	2077	Jan.	22.37	0.04879
	2003 AY2	2 486 045.38	2094	June	16.88	0.04880
	1996 EO	2 480 661.06	2079	Sept.	19.56	0.04884
	1997 WQ23	2 456 605.83	2013	Nov.	9.33	0.04887
	2002 JX8	2 510 464.28	2161	Apr.	25.78	0.04897
	1998 BY7	2 466 704.75	2041	July	4.25	0.04900
(41429)	2000 GE2	2 481 606.66	2082	Apr.	22.16	0.04916
	1990 OS	2 488 669.69	2101	Aug.	24.19	0.04921
(41429)	2000 GE2	2 464 964.80	2036	Sept.	28.30	0.04922
(25143)	Itokawa	2 489 320.14	2103	June	5.64	0.04923
	2000 GF2	2 485 767.51	2093	Sept.	12.01	0.04926
	2000 CE59	2 472 592.28	2057	Aug.	16.78	0.04926
	2002 QC7	2 504 926.09	2146	Feb.	25.59	0.04933
	2000 GV147	2 503 933.30	2143	June	8.80	0.04933
	2001 FE90	2 483 506.08	2087	July	4.58	0.04941
(13651)	(13651)	2 476 587.20	2068	July	24.70	0.04942
	2002 CD14	2 468 961.31	2047	Sept.	7.81	0.04945
	2003 WC158	2 463 918.87	2033	Nov.	17.37	0.04948

	2003 HG2	2 498 593.62	2128	Oct. 25.12	0.04949
	1998 MZ	2 483 488.55	2087	June 17.05	0.04950
	2002 RW25	2 482 873.89	2085	Oct. 10.39	0.04955
(33342)	(33342)	2 462 466.65	2029	Nov. 26.15	0.04957
	2001 GT2	2 470 996.51	2053	Apr. 4.01	0.04959
	2002 VE68	2 473 030.82	2058	Oct. 29.32	0.04960
	1994 XL1	2 467 956.86	2044	Dec. 7.36	0.04965
(65803)	(65803)	2 474 482.61	2062	Oct. 20.11	0.04965
(65803)	1996 GT	2 474 482.60	2062	Oct. 20.10	0.04966
	2002 MX	2 498 631.07	2128	Dec. 1.57	0.04968
	1993 VD	2 492 384.23	2111	Oct. 25.73	0.04974
	2001 SN263	2 496 514.86	2123	Feb. 15.36	0.04976
	1995 CR	2 461 456.27	2027	Feb. 19.77	0.04977
	1998 MZ	2 513 234.49	2168	Nov. 24.99	0.04986
	2003 MH4	2 464 836.87	2036	May 23.37	0.04986
	2002 JZ8	2 472 447.45	2057	Mar. 24.95	0.04986
(35396)	(35396)	2 505 735.11	2148	May 14.61	0.04986
	2003 UV11	2 490 566.10	2106	Nov. 2.60	0.04993

Приложение Б

ЭКОЛОГИЯ КОСМОСА.
ТЕМАТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

А

абиогенез — теория происхождения жизни путём постепенного усложнения вещества неорганической природы и возникновения биополимеров;

абиосфера — слои литосферы, не испытывающие в течение всей своей эволюции влияния живых организмов или биогенных веществ;

абляция — разрушение поверхности тела (обычно метеорита) из-за сопротивления среды, возникающее при прохождении тела через земную (или любой другой планеты) атмосферу;

авария экологическая — производственная или транспортная ситуация, не предусмотренная действующими технологическими регламентами и сопровождающаяся существенным увеличением воздействия на окружающую среду;

автогенез — теория эволюции живой природы вне зависимости от внешних условий;

авторегуляция (в природе) — система взаимодействий в природе, основанная на прямых и обратных связях и ведущая в соответствии с принципом Ле Шателье к динамическому равновесию или самоорганизации и саморазвитию всей системы;

автотрофы — (греч. *autos* — сам + *trophe* — пища). Организмы, синтезирующие органическое вещество из неорганического благодаря фотосинтезу или энергии, освобождающейся при химических реакциях (хемосинтез);

адаптация — (позднелат. *adaptatio* — приспособление). Комплекс морфофизиологических и поведенческих признаков, обеспечивающий успех в естественном отборе и способствующий выживанию в борьбе за существование. Любое приспособление организма к изменяющимся условиям среды;

акклиматизация — приспособление организмов к изменяющимся географическим (преимущественно климатическим) условиям существования;

аккреция — (лат. *accretio* — приращение, увеличение). Падение вещества из окружающего пространства на небесное тело;

аккумуляция (загрязнителей организмов) — накопление в живых организмах загрязняющих среду обитания химических веществ в результате усвоения их в процессе питания;

активность солнечная — совокупность нестационарных процессов в атмосфере Солнца: пятна, факелы, вспышки, корональные конденсации, флоккулы и др;

альbedo — в общем случае отношение полного потока излучения, отражённого телом во всех направлениях, к полному падающему потоку;

Альвена

~ **волны** — поперечные волны плотности в плазме, возникающие вследствие смещения магнитных силовых линий вместе с плазмой. Распространяются вдоль магнитных силовых линий. Плотность газа не изменяется. Весь слой колеблется поперёк поля как целое;

~ **теорема** — в идеально проводящей жидкости (коэффициент электропроводности равен ∞) магнитные силовые линии скреплены с веществом, и при движении жидкости вместе с ней перемещаются и силовые линии магнитного поля, не проскальзывая относительно вещества. Таким образом, например, силовые линии магнитного поля Солнца оказываются «вмороженными» в солнечный ветер;

амплитуда экологическая — пределы приспособляемости вида или биотического сообщества к изменяющимся условиям среды;

аномалия гравитационная — изменение однородных эквипотенциальных поверхностей гравитационного поля в случае неоднородного распределения масс, создающих это поле;

антициклон — область в земной атмосфере, в которой давление увеличивается от края к центру;

антропогеоценоз — регионально ограниченное системное взаимодействие между хозяйственным коллективом людей и освоенной ими территорией в период ранней истории человечества;

антропосистема — человечество как развивающееся целое, включающее людей как биологический вид, производительные силы и производственные отношения общества;

антропосфера — составная часть социосферы, охватывающая человечество как совокупность организмов;

антропоцентризм — воззрение, согласно которому человек является центром Вселенной и целью всех совершающихся в ней событий;

апогей — наиболее удалённая от Земли точка орбиты небесного тела, обращаящегося вокруг неё;

ареал — область распространения вида или экосистемы определённого типа;

артебиосфера — (лат. *arte* — искусственный). Слой биосферной колонизации в околоземном космическом пространстве, в котором находятся обитаемые космические станции и корабли;

астеносфера — слой повышенной текучести, на котором плавают у Земли жёсткие литосферные плиты. Расположена на глубинах 70–250 км. В этом слое находятся первичные магматические очаги вулканов и образуются базальтовые магмы;

астероидов пояс — область между орбитами Марса и Юпитера от 1.5 до 5.2 а. е., где расположены орбиты большинства астероидов. В главном поясе идентифицировано 30 тыс. малых планет, из них 7 тыс. пронумеровано и у 700 известны орбиты. Основные классы: С-астероиды (альbedo менее 0.05 — углистые); S-астероиды (альbedo до 0,40 — каменные); М-астероиды — металлические. Минералогический состав определён у нескольких сотен астероидов. К 1999 г. получены прямые фотографии (АМС «Galileo») астероидов 951 Гаспра, 253 Ида со спутником Дактиль, Матильда и Эрос (АМС NEAR);

астероиды (малые планеты) — небольшие планетоподобные тела неправильной формы, орбиты наибольшего числа которых находятся между орбитами Марса и Юпитера. Известны группы астероидов, движущиеся в лагранжевых точках: (Греки, Троянцы), группы астероидов (Амура, Аполлона, Атона), тесно сближающихся с Землёй (*см. опасность астероидная*);

астроблема — сильно разрушенный древний ударный кратер;

астроботаника — наука, занимающаяся исследованием характеристик земных растений с целью определения возможности существования подобных на других планетах. Основана Г. А. Тиховым, проводившим такие исследования в отношении Марса;

атмосфера — газовый слой, окружающий поверхности некоторых планет;

~ **захваченная** — атмосфера планеты, появившаяся при её образовании в результате аккреции и сохранившаяся в последующем;

~ **Земли** — масса составляет величину порядка $5.9 \cdot 10^{18}$ кг. Состав: азот — 78,08 %, кислород — 20,29 %, аргон — 0,93 %, водяной пар — 0,2–2,6 %, углекислый газ — 0,035 %;

~ **однородная** — модель атмосферы, плотность и температура которой по всей толщине соответствуют параметрам вблизи поверхности планеты. Масса однородной атмосферы соответствует массе реальной атмосферы, поэтому её высота используется во многих расчётах;

~ **солнечная** — внешняя газовая оболочка Солнца, включающая в себя фотосферу, хромосферу и корону;

атмосферики свистящие — поперечные радиоволны (вистлеры), возникающие при вспышке молнии, и распространяющиеся вдоль земного магнитного поля за пределы ионосферы и обратно;

аутэкология — раздел экологии, изучающий взаимоотношения отдельной особи, популяции, вида с окружающей средой;

афелий — наиболее удалённая от Солнца точка орбиты небесного тела в Солнечной системе;

афотобиосфера — часть биосферы в пределах гидросферы и литосферы, куда не попадают солнечные лучи;

аэрация — естественное или искусственное поступление воздуха в какую-либо среду;

аэриобиосфера — приземный слой атмосферы до 6–7 км от поверхности, где постоянно присутствуют земные организмы;

аэросфера — земная оболочка, включающая атмосферу и почвенный воздух;

Б

баланс

~ **биосферы энергетический** — алгебраическая сумма поглощаемой и излучаемой энергии в биосфере;

~ **экологических компонентов** — количественное сочетание экологических компонентов, обеспечивающее экологическое равновесие;

барисфера — внутренняя часть земного шара, состоящая из ядра и мантии Земли;

бедствие экологическое — последствия катастрофы, после которой равновесное состояние природной среды находится на предельно низком энергетическом уровне. Возможно как следствие соударения крупного небесного тела с Землёй;

биоастрономия — наука, занимающаяся проблемами поиска планет в других звёздных системах, исследованием эволюции планет и возможности зарождения на них жизни, поиском органических молекул во Вселенной, примитивной биологической активности, а также организацией поиска сигналов от внеземных цивилизаций и проявления их деятельности на Земле;

биогеосфера — сфера возникновения жизни, в пределах которой существуют условия для развития материи от неорганических форм до появления жизни. Иногда рассматривается как синоним географической оболочки Земли;

биогеография — наука о закономерностях распространения биоценозов и входящих в их состав растений, животных и микроорганизмов. Относится к числу наук о биосфере;

биогеосфера — оболочка земного шара, в которой сконцентрировано живое вещество планеты. Единственная, в которой возможны постоянное нахождение и нормальная деятельность человека. Является менее широким понятием, чем биосфера;

биогеоценоз — сложная пространственно ограниченная природная система, функционально связанных живых организмов и окружающей их абиотической среды, характеризующаяся обменом веществ и энергии. В его состав входят биоценоз как органический комплекс и биотоп как совокупность компонентов неживой природы. Иногда используется как синоним экосистемы. Отличие в том, что биогеоценоз — конкретная территориальная единица — биохора, — соответствующая низшим единицам территориального подразделения биосферы. Экосистема же — понятие безразмерное и более общее;

биогеоценология — наука о взаимосвязанных и взаимодействующих комплексах живой и неживой природы — биогеоценозах и их планетарной совокупности — биогеосфере;

биоиндикатор — группа растений и животных, по наличию, состоянию или поведению которых можно судить об изменениях в окружающей среде;

биом — (англ. *biome*). Совокупность сообществ организмов или экосистем какой-либо крупной территории, например, природной зоны;

биосфера — область существования и функционирования всей совокупности живущих ныне организмов. Охватывает нижнюю часть ат-

мосферы до озонового слоя, гидросферу до дна самых глубоких впадин, верхнюю часть литосферы до глубины около 4 км. По В.И. Вернадскому является активной оболочкой Земли, где совокупная деятельность земных организмов и человека проявляется как геохимический фактор планетарного значения. Близка к понятию «географическая оболочка»;

биота — совокупность видов организмов (флоры и фауны) какой-либо крупной территории. В отличие от биоценоза может не иметь экологических связей между видами;

биотоп — однородный в экологическом отношении участок земной поверхности, занятый одним биоценозом. Сходные биотопы объединяются в биохор. *См. также местообитание*;

биохор — территориальное подразделение биосферы, охватывающее группу пространственно объединённых биотопов;

биоценоз — взаимосвязанная совокупность всех живых существ, населяющих более или менее однородный участок суши или водоёма, взаимодействующая с окружающей её средой. Вместе с биотопом образует биогеоценоз;

биоцикл — жизненная область, высшая единица экологического подразделения биосферы: суша, океан и континентальные водоёмы. Каждый биоцикл подразделяется на биохоры, включающие значительное число биотопов;

болид — очень яркий метеор с дымным следом;

буря геомагнитная — резкое уменьшение на несколько часов горизонтальной компоненты магнитного поля Земли вследствие попадания в магнитосферу частиц солнечного ветра при солнечных вспышках. В этот период активизируются полярные сияния, наблюдаются нарушения коротковолновой радиосвязи;

Бэра закон — *см. закон сохранения*;

В

валентность экологическая — степень приспособляемости видов к изменениям условий окружающей природной среды;

Ван Аллена пояса — *см. пояса радиационные*;

весна — время года, переходный период между зимой и летом. В астрономическом понимании — промежуток времени от момента весеннего равноденствия до летнего солнцестояния;

ветер солнечный — поток заряженных частиц, вылетающих радиально из солнечной короны со скоростями порядка 400 км/с вблизи Земли. Вместе с «вмороженным» в него магнитным полем деформирует магнитосферы планет, формирует газовые хвосты комет;

вещество

~ **антропогенное** — химическое соединение, включённое в геосферу благодаря деятельности человека;

~ **биогенное** — 1. химическое соединение, возникшее в результате жизнедеятельности организмов (но не обязательно входящее в состав их тел) 2. вещество, создаваемое и перерабатываемое жизнью (по В.И. Вернадскому) 3. химический элемент или соединение, необходимые для поддержания жизни;

~ **живое** — совокупность всех живых организмов биосферы, вне зависимости от их систематической принадлежности (по В.И. Вернадскому). Его общая масса оценивается в $(2,4-3,6) \cdot 10^{15}$ кг;

~ **природное** — любое химическое соединение или элемент, возникающие в ходе спонтанно идущих химических реакций и физических процессов и естественно входящие в природный круговорот веществ;

взаимоотношения организма и среды — влияние окружающих организмов абиотической и биотической сред на организм, и обратное воздействие организма на среду его обитания;

вистлер — поперечная волна, распространяющаяся вдоль внешнего магнитного поля. Частота её меньше частоты, с которой происходит вращение электрона вокруг магнитной силовой линии. В частности, вистлерами являются свистящие атмосферерики;

воздействие

~ **антропогенное** — сумма прямых и опосредованных влияний человечества на что-либо;

~ **антропогенное на природу** — прямое осознанное или косвенное и неосознанное воздействие человеческой деятельности, вызывающее изменение природной среды;

~ **глобальное** — воздействие естественных или антропогенных факторов на биосферу Земли в целом;

~ **на климат** — изменение глобальной энергетики Земли вследствие антропогенных воздействий: накопление углекислого газа, изменения плотности озонового слоя, загрязнение атмосферы, прямые выбросы энергии и т. д.;

воздух атмосферный — эволюционно сложившийся состав нижнего слоя атмосферы;

волны

~ **акустические** — волны давления в жидких и газообразных средах, распространяющиеся и в веществе звёзд;

~ **гравитационные** — согласно общей теории относительности, массивные объекты, испытывающие ускорение или изменение формы, излучают гравитационные волны. В настоящее время их существование экспериментами и наблюдениями не подтверждено;

~ **жизни** — 1. присущие всем видам периодические и непериодические изменения численности популяций 2. по мнению некоторых исследователей, зоны периодического возникновения жизни в Галактике;

~ **звуковые** — продольные колебания плотности атмосферы, улавливаемые человеческим ухом (20 Гц-20 кГц);

~ **ионизационные** — образующиеся как ударные при столкновении облаков нагретого ионизированного газа;

~ **ионно-звуковые** — состоящие из разрежений и сгущений ионов;

~ **магнитогидродинамические** — волны Альвена. Поперечные волны плотности, движущиеся вдоль направления магнитного поля;

~ **плотности** — см. **Альвена волны**;

~ **сейсмические** — возникающие в результате землетрясения при сдвиге литосферных плит. Разделяются на продольные (тип Р), попе-

речные (S), поверхностные (L). В твёрдом веществе распространяются Р и S волны, в жидком — только Р волны;

~ **приливные** — волны в земной коре и водной среде, вызванные приливообразующим действием Луны и Солнца

~ **ударные** — образующиеся в результате деформации фронта звуковой волны в среде, когда области с большим сжатием (температурой) догоняют области с меньшим сжатием;

Вольфа число — величина, показывающая число солнечных пятен и групп пятен. Является одной из основных характеристик солнечной активности;

время экологическое эволюционное — время перехода в новую область локального равновесия в результате неравновесного процесса смены видов (миллионы лет);

вспышка

~ **солнечная** — выброс вещества с поверхности Солнца со скоростями порядка 10^3 км/с и энергиями до 10^{32} эрг;

~ **хромосферная** — см. **вспышка солнечная**;

вспышки

~ **балл** — характеристика мощности солнечной вспышки в линии водорода H_{α} ($\lambda = 656$ нм). Цифры пропорциональны площади в миллионных долях площади солнечной полусферы: 1 — от 100 до 250; 2 — от 250 до 600; 3 — от 600 до 1200; 4 — более 1200. Буква после цифры обозначает яркость: F — слабая, N — нормальная, B — яркая;

~ **рентгеновский** — поток рентгеновского излучения от Солнца во время вспышки в диапазоне 12.5–1 кэВ. Обозначается M_f , если поток равен $10^{-5} - 10^{-4}$ Вт/м², и XX_f , если он превышает эти значения.

Г

гелиобиология — наука о солнечно-биологических связях, основы которой заложены в начале XX в. А.Л. Чижевским;

гелиопауза — зона на расстоянии 50–100 а. е. от Солнца, в которой солнечный ветер сливается с межзвёздной средой;

гелиосфера — область окосолнечного пространства, в которой плазма солнечного ветра движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью. Возникает из-за взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной плазмой и межзвёздным магнитным полем. Внешней её границей является гелиопауза;

геоид — эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли. В каждой её точке сила тяжести направлена по нормали к ней и совпадает со средним уровнем Мирового океана. Отклонение от эллипсоида Красовского $\sim \pm 100$ м;

геокомплекс — иногда употребляемое название любого природного комплекса, не имеющего точного таксонометрического критерия

геокорона — внешняя часть земной атмосферы, водородное гало. Расстояние от поверхности до 15 земных радиусов. При освещении Солнцем излучает в линии L_{α} .

геомагнетизм — 1) магнитное поле Земли; 2) раздел геофизики, изучающий распределение в пространстве и изменение во времени магнитного поля Земли, а также связанные с ним процессы на Земле и в магнитосфере;

геосистема — природная система, состоящая из взаимообусловленных компонентов, принадлежащих литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере, функционирующая и развивающаяся во времени как единое целое. Является понятием территориально неопределённым, отражающим системные свойства (целостность, взаимосвязь) разнородных элементов;

геосфера — концентрические, сплошные или прерывистые оболочки Земли, различающиеся между собой по химическому составу, агрегатному состоянию и физическим свойствам. Выделяют магнитосферу, атмосферу, гидросферу, литосферу, мантию и ядро. Эти основные геосферы иногда подразделяются на геосферы второго порядка или на геосферы, обусловленные их взаимодействием (например, биосферу);

геотехсистемы — инженерно-технические сооружения, созданные на месте природно-территориальных комплексов, геосистемы, включающие в себя одновременно элементы природы, а также различные технические объекты и комплексы технологических процессов;

геотопология — направление ландшафтно-экологических исследований, изучающее подразделения географической оболочки низших таксонометрических рангов, геотопы;

геофизика — комплекс наук о Земле, изучающих внутреннее строение, физические свойства и процессы, происходящие в геосферах;

геохор — подразделение географической оболочки, охватывающее группу пространственно объединённых природно-территориальных комплексов;

геоэкология — практический раздел экологии, наука о взаимодействии геосистем, биосистем и социально-производственных систем. Особое внимание обращает на антропогенные воздействия, разработку рекомендаций по рациональному природопользованию и охране природы;

~ **космическая** — изучение экосистем аппаратурой, установленной на искусственных спутниках Земли;

гетеросфера — часть атмосферы, располагающаяся выше гомопаузы (с высот около 120 км для Земли), состав которой определяется диффузией;

гомеостаз — (греч. *homoios* — подобный, *stasis* — неподвижность). Состояние подвижного равновесия гео- или экосистемы, поддерживаемое сложными приспособительными реакциями, постоянной функциональной саморегуляцией природных систем в соответствии с принципом Ле Шателье;

гомопауза — зона в атмосфере, над которой диффузия начинает преобладать над конвекцией при концентрациях молекул $\sim 10^{12}$ см⁻³. Для Земли начинается на высотах около 120 км;

гомосфера — область атмосферы, где составляющие перемешаны. Расположена ниже гомопаузы;

граница

~ **биосферы** — фактическая граница биосферы проходит от 6–7 км над поверхностью Земли до глубинной изотермы 100° на суше и максимальной глубины в 11034 м в океане;

~ (ы) **жизни биологические** — область параметров природной среды, внутри которой возможно существование и самовоспроизводство известной нам белковой жизни, которая весьма чувствительна к условиям существования

~ **кислородная** — переходная область между подземными водами, содержащими свободный кислород и водами, лежащими ниже, в которых свободный кислород отсутствует (глубины в несколько сотен, редко тысяча метров);

~ **экосистемы** — переходная полоса, в пределах которой изменяется баланс экологических компонентов, а следовательно, изменяются факторы среды и видовой состав биоты. Эта граница обычно бывает нечёткой в связи с тем, что это понятие не столько морфологическое, сколько функционально-системное;

Д

Дальтона минимум — снижение солнечной активности в период с 1800 г. по 1825 г., когда на Солнце отсутствовали пятна;

дегазация — выделение недрами планеты газов, могущих оказывать существенное влияние на процессы в её атмосфере (например, на состояние озонового слоя в атмосфере Земли);

дегидратация — обезвоживание, выделение воды из минералов, горных пород и почв;

дефляция — развеивание, разрушение горных пород под действием ветра, сопровождающееся переносом твёрдых частиц и их обтачиванием. Проявляется на планетах, имеющих атмосферу;

день полярный — промежуток времени, когда Солнце как минимум сутки не заходит за горизонт. Продолжительность полярного дня на полюсах Земли составляет 189 суток;

дигрессия — ухудшение состояния экосистем под воздействием факторов среды или антропогенной деятельности;

динамика

~ **экосистемы сезонная** — одна из форм циклических изменений в биотическом сообществе, связанная со сменой времён (сезонов) года;

~ **экосистемы циклическая** — обратимые изменения экосистем, вызванные непостоянными внешними факторами, с постепенным возвратом к практически исходному состоянию;

диссипация — явление ускользания газов из атмосфер небесных тел, вызванное тепловым движением молекул. В частности, водород, образующий корону Земли, является продуктом диссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, и дальнейшей диссипации атомов из атмосферы;

диссоциация — распад молекулы, радикала, иона на несколько частей. Имеет место в атмосферах молодых звёзд, межзвёздной среде, атмосферах планет;

Добсона шкала — шкала, используемая для оценки общего содержания озона в атмосфере. Единица шкалы соответствует одной тысячной количества озона в вертикальном столбе атмосферы, численно равного толщине слоя и выражающегося в атм · см;

дождь

~ **метеорный** — метеорный поток весьма большой интенсивности. Один из наиболее интенсивных метеорных потоков — Леониды, встреча с которым давала в 1799, 1833, 1866 и 1966 гг. рекордные числа метеоров;

~ **кислотный** — дождь (и снег), подкислённый (рН ниже 5,6) из-за растворения в атмосферной влаге промышленных выбросов;

дыра озоновая — обширные области в озоновом слое с заметно (до 50 %) пониженным его содержанием. Темпы её расширения составляют в последнее десятилетие около 4 % в год над Антарктикой и несколько меньше в арктических областях. Появление озоновых дыр связывают в основном с техногенной деятельностью;

Е

единица

~ **астрономическая** (а. е.) — среднее расстояние между Землёй и Солнцем. Определяется как величина радиуса невозмущённой круговой орбиты тела пренебрежимо малой массы, обращающегося вокруг Солнца с угловой скоростью относительно звёзд 0,017 202 098 950 радиан в сутки. 1 а. е. = $1,496 \cdot 10^{11}$ м = 500 световых секунд;

Ж

жизненность — степень стойкости живых организмов к нарушениям и резким изменениям окружающей среды. Её критериями служат: интенсивность размножения и выживания потомства, конкурентоспособность при межвидовых и внутривидовых отношениях, оптимальная численность особей, приспособленность к условиям абиотической среды. Весьма важны исследования жизненности при проведении экспериментов на околоземных орбитах и в открытом космосе;

З

загрязнение

~ **антропогенное** — загрязнение, возникающее в результате деятельности человека;

~ **биологическое** — проникновение в эко- или технические системы видов животных и растений, чуждых данным сообществам и обычно там отсутствующих;

~ **биотическое** — распространение определённых, как правило, нежелательных, с точки зрения людей веществ на территории, где они ранее не наблюдались;

~ **бытовое** — загрязнение, вызываемое канализационными стоками городов и других населённых пунктов;

~ **естественное** — загрязнение, возникшее в результате природных (как правило, катастрофических) процессов;

~ **механическое** — засорение среды агентами, оказывающими на неё лишь механическое воздействие без физико-химических последствий;

~ **околоземного пространства естественное** — осколки небесных тел (метеороидов, комет), космическая пыль, газ, заполняющие околоземное космическое пространство;

~ **околоземного пространства искусственное** — техногенные отходы: осколки космических аппаратов и ракет-носителей, различных составляющих их конструкций (в том числе ядерных реакторов), отходы топлива, собственной атмосферы ИСЗ на околоземных орбитах. Кроме того, загрязнение околоземного пространства электромагнитными полями (излучениями, в т. ч. радиоактивными) техногенного происхождения;

~ **радиоактивное** — форма физического загрязнения, связанная с попаданием в окружающую среду радиоактивных элементов;

~ **световое** — повышенный фон неба, вызванный искусственными источниками, усиленный особенно над большими городами дымкой антропогенного происхождения;

~ **тепловое** — вид физического загрязнения окружающей среды, характеризующийся периодическим и длительным повышением температуры выше естественного уровня;

~ **физическое** — загрязнение окружающей среды, проявляющееся отклонениями от норм её физических свойств;

~ **химическое** — изменение естественных химических свойств окружающей среды при попадании в неё веществ в концентрациях, превышающих норму;

~ **шумовое** — форма физического загрязнения в результате увеличения интенсивности и повторяемости шума сверх природного уровня;

закон

~ **минимума** (Ю. Либиха) — жизнённость организма определяется самым слабым звеном в цепи его экологических потребностей;

~ **необратимости эволюции** (Л. Полло) — эволюция необратима: организм (популяция, вид) не может вернуться к состоянию, уже ранее осуществлённому в ряду его предков;

~ **сохранения** — в применении к экологии закон сохранения имеет в своей основе биотический круговорот веществ;

~ **толерантности** (В. Шелфолда) — процветание организма ограничено зонами минимума и максимума определённых экологических факторов; между ними располагается зона экологического оптимума. Каждый вид характеризуется способностью переносить отклонения экологических факторов от оптимальных — толерантностью;

~ (ы) **общей экологии** (Б. Коммонера) — 1) всё связано со всем; 2) всё должно куда-то деваться; 3) природа знает лучше; 4) ничто не даётся даром;

~ **постоянства количества живого вещества** — по В. И. Вернадскому количество живого вещества биосферы для данной геологической эпохи постоянно;

~ **преломления космических воздействий** — космические факторы, оказывая воздействие на биосферу, подвергаются изменениям со стороны экосферы планеты;

~ (ы) **экодинамики** (Ю. Голдсмита) — 1) закон сохранения информационной и соматической структуры биосферы; 2) закон стремления к климаксу; 3) закон экологического порядка; 4) закон самоконтроля и саморегуляции живого;

землеведение космическое — совокупность исследований Земли из космоса с помощью аэрокосмических методов и визуальных наблюдений;

землетрясение — подземные удары и колебания поверхности Земли, вызванные главным образом тектоническими процессами. Ежегодно регистрируется несколько сотен тысяч землетрясений. Экологические катастрофы вызывает лишь малая их доля;

Земли фигура — форма геометрического тела, лучше всего удовлетворяющая форме Земли. Трёхосный эллипсоид Красовского: $a = 6378,2$ км, $b = 6356,9$ км, $f = 1/298,3$, $e = 0,08$. Его максимальное отклонение от геоида составляет ± 100 м;

Земля — третья планета Солнечной системы с большой полуосью орбиты около 150 млн км и периодом обращения 365,26 сут. Её масса составляет $5,98 \cdot 10^{24}$ кг, диаметр 12756 км, период осевого вращения 23 час. 56 мин. Окружена плотной атмосферой с плавающими в ней облаками из водяного пара, состоящей на 78,1% из азота, 20,9% кислорода, 0,9% аргона, 0,03% углекислого газа. Поверхность на две трети покрыта водой. Глубины до 11 км, высоты на суше до 9 км. Имеет металлическое ядро, состоящее из расплавленного железа и никеля, возможно с твёрдым центром. Температура в центре Земли — около 4000 °С. Ядро окружено силикатной мантией. Кора имеет толщину около 10 км под океанами и примерно 30 км там, где расположены континенты. Магнитное поле имеет напряжённость 0,31 Гс в зоне магнитного экватора и 0,62 Гс у геомагнитных полюсов. Магнитосфера радиусом $70 \cdot 10^3$ км с солнечной и $120 \cdot 10^3$ км с противоположной стороны, состоит, в основном, из электронов. Радиоизлучение Земли в дециметровом диапазоне является одним из мощнейших в Солнечной системе в результате техногенной деятельности человечества. Имеет один естественный спутник — Луну;

зима ядерная — резкое длительное общепланетное похолодание, вызванное экранированием солнечного излучения массами пыли и пепла, возникшими в результате ядерной войны или падения астероида;

зона — географическая территория, в пределах которой наблюдается однозначность показателей интенсивности какого-либо явления или их совокупности, либо эта интенсивность варьируется в пределах определённого интервала;

~ **авроральная** — область на Земле, в которой наблюдается максимальное количество ночных полярных сияний;

~ **бедствия экологического** — территории с очень сильным и устойчивым загрязнением (содержание загрязняющих веществ более чем в 10 раз выше ПДК), разрушительной потерей продуктивности,

практически необратимой трансформацией экосистем, почти полностью исключающей их из хозяйственного использования. Деграция земель превышает 50% территории; возможно лишь выборочное хозяйственное её использование. Структурно-функциональная целостность ландшафтов теряет устойчивость; нарушения носят трудно обратимый характер;

~ (ы) **географические** — природные зоны, относительно крупные подразделения географической оболочки, части географических поясов, обладающие общностью термических условий и увлажнения. Образуют одну из высших ступеней физико-географического деления земной поверхности;

~ **комфорта** — территория, обладающая оптимальным для человека сочетанием температуры, влажности воздуха, скорости ветра и поступающего на поверхность лучистого тепла. С точки зрения идеи распространённости жизни в космосе, положение Земли относительно Солнца и объём получаемой ей энергии соответствуют зоне комфорта для возникновения белковой жизни;

~ **кризиса экологического** — территории с сильным загрязнением (содержание загрязняющих веществ в 5–10 раз выше ПДК), резким снижением продуктивности экосистем. Деграция земель проявляется на 20–50% территории;

~ **риска экологического** — территории с повышенным загрязнением (содержание загрязняющих веществ в 2–5 раз выше ПДК), заметным снижением продуктивности экосистем. Деграция земель захватывает 5–20% территории. Однако нарушения носят ещё обратимый характер, поэтому ослабление антропогенных нагрузок может привести к улучшению экологической ситуации, повышению качества возобновляемых ресурсов, восстановлению структурно-функциональной целостности ландшафтов;

И

излучение

~ **ионизирующее** — поток частиц и жёстких квантов электромагнитного излучения, ведущее к ионизации атомов и молекул среды. В дозах, превышающих естественные, наносит вред живым организмам;

~ **солнечных пятен** — интенсивное радиоизлучение в шумовой солнечной буре, обладающее высокой степенью переменности и поляризованное по кругу;

~ **эффективное** — разность между излучением с земной поверхности и встречным излучением атмосферы. Один из элементов радиационного баланса земной поверхности;

изменение среды

~ **необратимое** — перемена в средообразующих компонентах или их сочетаниях, которая не может быть компенсирована в ходе природных восстановительных процессов, в том числе естественной сукцессии. Так, техногенная деятельность в околоземном пространстве может

привести к необратимым изменениям его параметров и, как следствие, к губительному воздействию на биосферу;

~ **обратное** — перемены в средообразующих компонентах или их сочетаниях, имеющие колебательный характер с восстановлением прежних условий;

изолинии — линии на картах, графиках и разрезах, проходящие по точкам с одинаковыми значениями какого-либо количественного показателя, характеризующего изображаемое явление;

изоповерхности — поверхности равного значения величин каких-либо характеристик, дающих представление об их пространственном распределении;

изотропия — сохранение свойств объекта или процесса независимо от направления (например, изотропное реликтовое излучение);

импакт — удар о планету космического тела, который может сопровождаться значительными разрушениями на её поверхности и резкими изменениями параметров атмосферы и околоземного пространства;

индекс

~ **активности солнечной** — числовой параметр, характеризующий количество и мощность активных образований на Солнце;

~ **вспышечный** — индекс активности Солнца, основанный на частоте вспышек;

~ **F10.7** — поток солнечного излучения на волне 10,7 см, выраженный в солнечных единицах потока;

~ **кальциевый** — выражаемый по суммарной площади кальциевых флоккулов, наблюдаемых в линии 393 нм;

~ (ы) **геомагнитные** — параметры амплитуды флуктуаций магнитного поля Земли: локальный 3-часовой *K*-индекс, трёхчасовой планетарный *K_p*-индекс, среднесуточный *A_p*-индекс;

~ **загрязнения** — термин, включающий понятия объёма вещества-загрязнителя (энергии процесса загрязнения) и степени его воздействия на экосистему, соотнесённые со временем и интенсивностью процессов;

индикаторы — природные объекты различного происхождения, характерные для определённых условий существования и функционирования;

инсоляция — количество энергии Солнца, падающее на единицу площади земной поверхности в единицу времени. Определяет величину солнечной постоянной;

ионизация (атмосферы) — процесс образования положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в атмосфере под действием главным образом коротковолнового солнечного излучения. К концу XX в. этот процесс частично определяется техногенным воздействием на атмосферу;

ионосфера — ионизированный газ (плазма) в верхней атмосфере Земли. Состоит из слоёв: D (H~ 70 км), E (H~ 90–120 км), F (выше H~ 130 км и вплоть до 400–1000 км);

К

касп полярный — воронкообразная структура в геомагнитном поле, через которую вдоль силовых линий возможно проникновение плазмы солнечного ветра в верхнюю атмосферу;

катастрофа экологическая — 1. Природная аномалия, приводящая к неблагоприятным (включая гибель населения) экологическим последствиям 2. Авария технического устройства, приводящая к резкому ухудшению экологических параметров среды и массовой гибели живых существ;

климакс — относительно стабильное состояние экосистемы;

климат — (греч. *klimatos* — наклон, имеется в виду наклон земной оси к плоскости эклиптики). Многолетний режим погоды в той или иной местности как результат процессов, непрерывно происходящих в атмосфере и деятельном слое;

климата изменения — длительные (свыше 10 лет) направленные или ритмические изменения климатических условий на Земле в целом, или в её крупных регионах;

коадаптация — взаимное приспособление в ходе эволюции;

колебания солнечные — мощные турбулентные движения возбуждают волновые колебания в атмосфере Солнца: 1) 5-минутные колебания в фотосфере и хромосфере — резонансные колебания верхних слоёв конвективной зоны; 2) колебания в солнечных пятнах с периодом около 3 мин.; 3) пульсация Солнца как звезды (А. Б. Северный, В. А. Котов, Т. Т. Цап, 1976) с периодом 2 час. 40 мин. и амплитудой 20 км. Также наблюдаются пульсации Солнца с периодами 20–40 мин. и 5 мин;

комета — тело малой плотности, состоящее из газа и пыли (в том числе радикалов CN, C₂, NH, OH), обращающееся вокруг Солнца по эллиптической орбите (иногда сильно вытянутой). Массы комет в среднем 10¹⁵ кг, время жизни около 100 оборотов вокруг Солнца. Периодические составляют около 4% от всех комет. Всего известно около 100 короткопериодических комет, имеющих периоды от нескольких лет до нескольких десятков лет. Кометы являются одним из источников пыли в Солнечной системе и околоземном пространстве, загрязняя его;

~ **долгопериодическая** — комета с вытянутой орбитой и периодом, большим 200 лет. Источником являются облака Оорта и Хиллса;

~ **искусственная** — облако паров натрия или другого вещества, выпускаемого с космического аппарата для определения его положения и различных научных экспериментов. Первый такой эксперимент проведён АМС «Луна-1» в 1959 г.;

~ **короткопериодическая** — комета с периодом обращения в несколько или несколько десятков лет, сопоставимым с периодами обращения планет. Основная масса их перешла на свои орбиты под влиянием приливного действия Юпитера. Есть предположение, что многие из них возникли не дальше 1 а. е. от Юпитера в поясе Койпера;

Коммонера законы — см. **законы общей экологии**;

комплекс — геосистема, отличающаяся высоким уровнем сопряжённости составляющих элементов по обмену веществом, энергией, информацией и, в силу этого, обладающая более высокой устойчивостью по отношению к окружающей среде, по сравнению с теми же элементами, которые функционируют изолированно, вне связей данного комплекса;

~ **природно-территориальный** — исторически и пространственно обособившаяся единая система, образованная множеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов атмосферы, гидросферы, литосферы и биосферы;

~ **природно-хозяйственный** — территория, характеризующаяся определённым видом хозяйственной деятельности;

конвекция — движение жидкости или газа в поле тяжести под действием потока теплоты, идущего снизу. Происходит: 1) в тропосфере Земли; 2) в океане Земли; 3) во внешних слоях Солнца (20–30 % его радиуса); 4) в центральных частях массивных звёзд;

конденсации корональные — области активной короны Солнца, в которых плотность плазмы примерно в три раза больше, чем в окружающих областях;

Конрада поверхность — граница раздела между гранитными и базальтовыми слоями земной коры на глубинах 5–35 км, на которой скорость продольных сейсмических волн скачкообразно увеличивается с 6,0 до 6,6 км/с;

координаты

~ **географические** — определяющие положение объекта на земной поверхности. Долгота отсчитывается от Гринвичского меридиана к востоку, широта — от плоскости земного экватора;

~ **геодезические** — определяемые положением точки на земном эллипсоиде. Геодезическая широта — угол между нормалью к эллипсоиду в этой точке и плоскостью земного экватора. Геодезическая долгота — угол между меридианом места и гринвичским меридианом;

~ **геомагнитные** — широта и долгота, определяющие положение точки на земной поверхности при рассмотрении явления земного магнетизма. Широта — угол между геомагнитным экватором и точкой в плоскости геомагнитного меридиана; долгота — двугранный угол между плоскостью геомагнитного меридиана точки на поверхности Земли и геомагнитного меридиана, проходящего через географический полюс;

~ **геоцентрические** — приведённые к центру Земли. Геоцентрическая широта — угол между земным экватором и направлением из места наблюдения к центру Земли;

~ **топоцентрические** — отнесённые к поверхности Земли;

кора земная — внешняя часть оболочки Земли толщиной 4–8 км над океанами и 30–80 км над материками. Образована сложной смесью осадочных, магматических и метаморфических пород. Возраст определяется радиоактивным методом и составляет около $4 \cdot 10^9$ лет;

Кордылевского облака — облака естественного космического мусора (межпланетной пыли), располагающиеся в точках либрации L_4 ,

L_5 системы Земля-Луна на расстоянии 60° впереди и позади Луны на её орбите;

корона солнечная — внешняя часть атмосферы Солнца, расположенная над хромосферой. Температура порядка 10^6 К, плотность около 10^{-16} г/см³. Наблюдается во время полных солнечных затмений и при помощи коронографа. Роль проводника тепла из фотосферы в корону берёт на себя магнитное поле. Ток, протекающий по магнитным силовым линиям, разогревает корону;

космос ближний — включающий в себя верхние слои ионосферы и магнитосферу;

кризис

~ **экологический** — нарушения взаимосвязей внутри экосистемы или необратимые изменения в биосфере, вызванные антропогенной деятельностью и угрожающие существованию человека как вида;

~ **экосистемы** — ситуация, возникающая в результате катастрофических природных и антропогенных факторов;

криосфера — (греч. *krios* — холод). Оболочка Земли неправильной формы в области взаимодействия атмосферы, гидросферы и литосферы с отрицательной или нулевой температурой и водой в твёрдой фазе или переохлаждённом состоянии. Нижняя граница до 4–5 км под земной поверхностью (Антарктида), верхняя — на высоте до 100 км, включая мезопаузу;

критерий экологический — признак, на основании которого производятся оценка, определение или классификация экологических систем, процессов и явлений. Может быть природозащитным, антропоэкологическим и хозяйственным;

культура экологическая — использование окружающей среды на основе познания естественных законов развития природы с учётом ближайших и отдалённых последствий изменения среды под влиянием человеческой деятельности;

Л

лаккомиты — поднятия на поверхностях планет, возникающие в результате вулканической деятельности последних. На Земле это, например, горы Машук и Бештау на Северном Кавказе;

Ламберта

~ **закон** — закон рассеяния света идеальной поверхностью, когда во всех направлениях рассеивается одинаковая доля падающего потока;

~ **поверхность** — поверхность, рассеяние света которой удовлетворяет закону Ламберта. Иногда встречается у астрономических тел;

ландшафт — относительно однородный участок географической оболочки (природно-территориальный комплекс), отличающийся закономерным сочетанием её компонентов и явлений, характером взаимосвязей, особенностями сочетания и связей более низких территориальных единиц. Является одним из видов геосистем;

лёд — вода в твёрдом состоянии. Известны: аморфный лёд и 10 видов его кристаллических модификаций. На Земле имеется в виде атмосферного, подземного и морского льда, ледников, айсбергов, снежного покрова;

~ **инфильтрационный** — образуется из снега в результате проникновения воды в его поры;

~ **конжеляционный** — образуется в результате замерзания жидкой или капельно-жидкой воды (наземные и подземные водоёмы);

~ **межзвёздный** — смесь застывших воды, формальдегида и аммиака, осевших на поверхность межзвёздных пылинок;

~ **рекристаллизационный** — образуется из снега в результате перекристаллизации и давления, без участия талой воды;

~ **сублимационный** — образуется в результате сублимации, то есть при прямом переходе водяного пара в лёд минуя жидкое состояние (например, образование инея);

Либиха закон — см. **закон минимума**;

ливень атмосферный — резкое усиление потока вторичных космических лучей, порождённых первичными космическими лучами или гамма-излучением;

Линдемана правило — см. **правило 10 %**;

литобиосфера — часть биосферы, захватывающая верхние слои литосферы до глубин в среднем 2–3 км. Область распространения живых организмов и биогенных осадочных пород;

литогенез — совокупность природных процессов образования и последующих изменений осадочных горных пород. Главные факторы литогенеза — тектонические движения, климат и органическая жизнь;

литосфера — наружная зона планеты. Земная литосфера включает в себя кору и верх мантии. Граница — на глубине около 70 км. Расколота на 10 больших литосферных плит, по границам которых расположено наибольшее число очагов землетрясений;

лучи

~ **корональные** — яркие и прямые лучи, наблюдающиеся над солнечными пятнами и факелами. В их основании яркость хромосферы возрастает;

~ **космические** — потоки заряженных частиц, попадающих на Землю из Космоса. Протонов 85 %, α -частиц — 1 %, электронов и тяжёлых ядер — менее 1 %. Скорости релятивистские. Космические лучи средней энергии имеют изотропное распределение по небесной сфере. Открыты в 1912 г.;

~ **солнечные** — потоки заражённых частиц (протонов, альфа-частиц, электронов) с энергиями 1 МэВ — 1 ГэВ, движущихся от Солнца вдоль его магнитных силовых линий;

Люксембурга (Люксембург-Горьковский) эффект (кроссмодуляция) — нагрев ионосферы радиоизлучением, который может вызвать тепловую параметрическую неустойчивость в ионосфере. В результате возникает аномально большое поглощение радиоизлучения;

М

магнетизм

~ **земной** — магнитное поле Земли, существование которого обусловлено действием постоянных источников, расположенных внутри планеты (гидромагнитное динамо), создающих основной компонент поля (99%), а также электрических токов в магнитосфере и ионосфере ($\approx 1\%$). Напряжённость убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 55,7 до 33,4 А/м;

~ **солнечный** — магнитные поля на Солнце, упорядочивающие движение солнечной плазмы, обуславливающие солнечные вспышки, существование протуберанцев и т. д. Средняя напряжённость магнитного поля в фотосфере 1 Э (79,6 А/м), в области солнечных пятен она может достигать нескольких тысяч Э. Периодические колебания солнечного магнитного поля определяют периодичность его активности. Источник магнитного поля Солнца — сложные движения плазмы в его недрах;

магнитопауза — граница между магнитным полем Земли и солнечным ветром на расстоянии 13–17 земных радиусов от планеты с подсолнечной стороны. На ней отклоняется прямой поток солнечных заряженных частиц;

магнитосфера — внешняя оболочка ионосферы планеты, образующаяся взаимодействием сверхзвукового потока горячей замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитным полем планеты. У Земли простирается на высотах 10^3 – $6 \cdot 10^4$ км на солнечной стороне и до 10^6 км — на ночной стороне. Мощность диссипации энергии — до $3 \cdot 10^{11}$ Вт;

мантия — внутренняя оболочка планеты. Мантия Земли расположена ниже границы Мохоровичича в интервале глубин 35–3000 км. Состоит из твёрдых силикатов, минералов, богатых магнием и железом;

~ **верхняя** — внешняя часть мантии от границы Мохоровичича до глубин порядка 900 км, включающая астеносферу и слой Голицына. Сложена, предположительно, пиролитом и, частично, эклогитом. В ней развиваются процессы, с которыми связаны тектонические, магматические и метаморфические явления в земной коре;

материк — континент, крупнейший массив земной коры, большая часть поверхности которого выступает над уровнем Мирового океана в виде суши, периферическая часть погружена под уровень океана. Мощность коры под материками составляет 25–70 км. На Земле в современную геологическую эпоху существует 6 материков;

материя межпланетная — корпускулярное и электромагнитное излучение Солнца, газо-пылевое облако, в которое погружена Солнечная система;

мезопауза — температурный минимум, разделяющий мезосферу и термосферу на высотах 80–90 км;

мезопик — температурный пик на высотах 20–25 км, разделяющий стратосферу и мезосферу. Обусловлен поглощением солнечной радиации озоном;

мезосфера — область земной атмосферы, расположенная непосредственно над стратосферой с температурой 210–270 К на высотах 20–100 км;

меридиан

~ **географический** — большой полукруг, проходящий через полюсы Земли и точку на её поверхности;

~ **главный** — см. **нулевой**;

~ **магнитный** — проекция силовой линии геомагнитного поля на земную поверхность. Сложные по форме геомагнитные меридианы сходятся в магнитных полюсах;

~ **небесный** — большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и зенит наблюдателя;

~ **нулевой (начальный, Гринвичский)** — проходящий через Гринвичскую обсерваторию и считающийся началом отсчёта долгот;

~ **основной** — центральный меридиан часового пояса;

~ **Парижский** — меридиан Парижской обсерватории. В XVII–XVIII вв. считался нулевым;

~ **центральный** — линия север-юг, разделяющая пополам видимый диск планеты или Солнца;

местообитание — пространственно ограниченная часть суши или водоёма с однородными экологическими условиями, занятая одним биоценозом, микроценозом или популяцией определённого вида;

метеор — световое явление в атмосфере на высоте 130–80 км, возникающее при попадании и сгорании в ней метеорного тела. Воспринимается как «падающая звезда»;

метеорит — остаток упавшего на Землю метеорного тела. В среднем в год выпадает около 2000 метеоритов, составляющих вместе с метеоритной пылью массу около 100 т. Метеориты делятся на три больших класса: железные, каменные и железо-каменные;

~ **Анихито** — самый большой из метеоритов, находящихся в музеях мира. Этот железо-каменный метеорит найден Р. Пири в 1897 г. в Гренландии;

~ **Гоба** — самый большой (9 м³, 60 т) из железных метеоритов. Найден в Намибии в 1920 г.;

~ **«марсианский»** — метеорит ALH 4001, найденный в Антарктиде. Попал на Землю с Марса в результате, как полагают, столкновения Марса с небольшим астероидом. Предположительно, в нём обнаружены окаменевшие остатки органических молекул;

~ **Сихотэ-Алинский** — крупнейший в XX в. 12 февраля 1947 г. в Уссурийскую тайгу упало около 100 т вещества железо-никелевого метеорита, распавшегося на куски. Они образовали более 100 кратеров;

~ **Тунгусский** — метеорит, упавший утром 30.06.1908 г. в районе реки Подкаменная Тунгуска, по поводу природы которого идут споры. Одной из вероятных считается гипотеза о том, что этот метеорит был ледяным ядром кометы, возможно, осколком ядра кометы Энке;

метеороид — в общем случае любое метеорное тело в Солнечной системе;

микроклимат — климат приземного слоя воздуха на небольшой территории;

Миланковича цикл — периодические изменения наклона оси вращения Земли и эксцентриситета её орбиты, связанные с долгосрочными колебаниями климата и воздействием ледниковых периодов;

миникометы — рыхлые ледяные тела, покрытые слоем пыли, размерами порядка 10 м, массой около 100 т. При попадании в атмосферу Земли с частотой около 10 в год взрываются, загрязняя её верхние слои. Энергия взрыва оценивается от нескольких до сотен килотонн;

Млечный Путь — 1) светящаяся полоса на небесной сфере, состоящая из неразрешимых глазом звёзд и туманностей; 2) название нашей Галактики;

мониторинг — (лат. *monitor* — надзирающий). Наблюдение и оценка состояния природной среды под влиянием антропогенных воздействий с целью рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Основным принципом мониторинга является его непрерывность;

~ **глобальный** — слежение за общемировыми процессами и явлениями в биосфере Земли и её экосфере, включая все их экологические компоненты и предупреждение о возникающих экстремальных ситуациях;

~ **локальный** — система слежения за влиянием на окружающую среду конкретных объектов хозяйственной деятельности;

~ **околоземного пространства** — наблюдения и контроль естественного и антропогенного загрязнения; выработка методов оценки состояния околоземного пространства как части природной среды; разработка прогноза возможных последствий возрастающей антропогенной нагрузки на околоземное пространство;

~ **окружающей среды** — слежение за состоянием окружающей природной среды и предупреждение о создающихся критических ситуациях;

~ **региональный** — слежение за процессами и явлениями в пределах какого-либо региона, где процессы и явления могут отличаться и природным характером и антропогенным воздействием от базового фона, характерного для всей биосферы;

Мохоровичича граница — резкая сейсмическая граница между корой и мантией Земли, на которой скачкообразно увеличивается скорость сейсмических волн с 6,7–7,6 до 7,9–8,2 м/с;

мощность источника воздействия на окружающую среду — количество вещества или энергии, поступающее в окружающую среду из какого-либо источника или изымаемое из окружающей среды в единицу времени;

мусор космический — осколки тел естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве. Источниками естественной составляющей являются астероиды, кометы и метеорные потоки, искусственной — обломки космических аппаратов, их ракет-носителей, элементов конструкций, остатки топлива и т. д.;

Н

нагрузка антропогенная — степень прямого или косвенного воздействия людей и их хозяйственной деятельности на природу в целом или на её отдельные экологические компоненты и элементы;

надёжность

~ **системы природной** — способность природной системы практически бесконечно функционировать без резких изменений структуры и функций;

~ **экосистемы экологическая** — способность экосистемы относительно полно самовосстанавливаться и саморегулироваться в течение сукцессионного или эволюционного периода её существования;

наклонение магнитное — угол между вектором напряжённости геомагнитного поля и горизонтальной плоскостью в рассматриваемой точке земной поверхности;

нарушение экологическое — отклонение от обычного состояния экосистемы любого иерархического уровня организации (от биогеоценоза до биосферы). Если оно недостаточно для необратимого разрушения экосистемы, то последняя способна самовосстанавливаться до относительно прежнего состояния в соответствии с принципом Ле Шателье;

ниша экологическая — место вида в природе, включающее как его положение в пространстве, так и функциональную роль в сообществе и положение относительно абиотических условий существования. Всю биосферу можно рассматривать как экологическую нишу человека;

ноосфера — «сфера разума», высшая стадия развития биосферы, когда разумная человеческая деятельность становится главным определяющим фактором её устойчивого глобального развития. Учение о ноосфере разработано В.И. Вернадским;

О**облако**

~ **Оорта** — сферическая область на расстоянии порядка $2 \times 10^4 - 10^5$ а. е. от Солнца, считающаяся местом рождения комет;

~ **(а) серебристые** — облака серебристого цвета на высоте 80–85 км над Землёй. Наблюдаются летом на широтах $50^\circ - 75^\circ$ с.ш. и зимой на $40^\circ - 60^\circ$ ю.ш. в период астрономических сумерек, когда Солнце погружено под горизонт на $6^\circ - 18^\circ$. Природа окончательно не выяснена;

~ **Хиллса** — облако кометных ядер, типа облака Оорта, расположенное на расстоянии $10^3 - 20 \cdot 10^3$ а. е. от Солнца. Имеются предположения, что оно содержит значительно больше кометных ядер (до 10^{14}), нежели облако Оорта;

оболочка

~ **биогеоценотическая** — совокупность биогеоценозов поверхности Земли толщиной 200–300 м на суше;

~ **географическая** — природный комплекс, возникший в слое взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы и сформировавшийся-

ся под действием солнечной энергии и органической жизни. Включает в себя нижние слои атмосферы, верхние слои литосферы, почти всю гидросферу и всю биосферу;

овал авроральный — области в двух полярных зонах над Землёй, в которых наблюдаются полярные сияния. Расположены ассиметрично относительно геомагнитных полюсов;

Одума законы — 1) организмы могут иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного экологического фактора и узкий в отношении другого; 2) организмы с широким диапазоном толерантности в отношении всех экологических факторов наиболее распространены; 3) если условия по какому-либо экологическому фактору не оптимальны, то диапазон толерантности может сузиться и в отношении других факторов; 4) многие факторы среды могут стать лимитирующими в критические периоды жизни организмов, особенно в период размножения;

озоносфера — слой повышенной концентрации озона в земной атмосфере, выполняющий роль защитного экрана от жёсткого космического (преимущественно УФ) излучения. Располагается между 7–8 (на полюсах), 17–18 (на экваторе) и 50 км с наибольшей плотностью на высоте 20–22 км над поверхностью Земли;

океан мировой — глобальная совокупность всех земных океанов и морей объёмом $1,4 \cdot 10^9$ км³. Занимает 70.8% земной поверхности;

окно

~ **оптическое** — область в спектре поглощения в земной атмосфере (290–760 нм), через которую видимый свет попадает на поверхность Земли;

~ **(а) прозрачности** — интервалы длин волн, в которых излучение не поглощается или поглощается незначительно при прохождении через земную атмосферу. В видимом диапазоне это оптическое окно в радиодиапазоне 1 мм ÷ 30 м;

опасность астероидно-кометная — опасность того, что астероиды и кометы, имеющие вытянутые орбиты с перигелием, близким к Солнцу, могут столкнуться с Землёй. Из астероидов к таким принадлежат малые планеты групп Амура, Аполлона, Атона;

оптимум экологический — значения одного или нескольких экологических факторов или их совокупности, наиболее благоприятные для существования данного вида или сообщества;

осень — время года, переходный климатический сезон между летом и зимой. В астрономическом понимании промежуток времени между моментом осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния;

отходы техногенные в космосе — совокупность обломков космических аппаратов (космический мусор), остатки топлива ракет-носителей и собственных атмосфер спутников;

охрана

~ **биосферы** — система мероприятий по устранению нежелательного антропогенного или стихийного влияния на функционально взаимосвязанные блоки биосферы (атмосферу, гидросферу, почвенный покров, литосферу, сферу органической жизни) по поддержанию вы-

работавшейся эволюционно её организованности и поддержание нормального функционирования;

~ **природы** — 1) совокупность международных, государственных, региональных и т. д. мероприятий направленных на рациональное использование, воспроизводство и сохранение природных ресурсов Земли; 2) комплексная дисциплина, разрабатывающая общие принципы и методы сохранения и восстановления природных ресурсов;

~ **околоземного пространства** — система международных мероприятий (научно-технологических, правовых, экономических, просветительных) по предотвращению попадания в околоземное космическое пространство техногенных загрязнений как в виде различных излучений, так и в виде мусора, изменяющих свойства околоземного пространства таким образом, что его воздействие на биосферу после этого наносит последней необратимый вред;

~ **среды (жизни)** — совокупность мероприятий, направленных на сохранение природы Земли в состоянии, соответствующем эволюционным потребностям современной биосферы и её живого вещества;

П

панбиосфера — вся гидросфера и часть литосферы где постоянно или временно присутствуют живые организмы;

панспермия — гипотеза, согласно которой жизнь в виде спор переносится в космосе с одной планеты на другую;

парабиосфера — слои атмосферы между 6–7 и 60–80 км над поверхностью Земли, куда живые организмы попадают случайно и могут временно существовать, но не жить и размножаться;

параллель

~ **географическая** — малый круг, плоскость которого параллельна плоскости земного экватора;

~ **суточная (небесная)** — малый круг небесной сферы с плоскостью, параллельной плоскости небесного экватора, по которому совершается суточное движение светила;

Персеиды — наиболее заметный и известный метеорный поток с радиантом в созвездии Персея. Действует в июле-августе, максимум 12 августа. Связан с кометой Свифта-Туттля;

петли корональные — вид корональных конденсаций, наблюдаемый в свете зелёной корональной линии и в рентгеновских лучах;

пиргелиометр — прибор для измерения в энергетических величинах полного количества солнечной энергии, падающего за определённое время на площадку на поверхности Земли;

плазма космическая — плазма в космическом пространстве и космических объектах. Выделяют: плазму ионосферы Земли ($n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$); плазму радиационных поясов Земли ($n \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$); планет; плазмосферу (см. ниже); плазму солнечного ветра ($n \sim 1-10 \text{ см}^{-3}$); плазму межзвёздного и межгалактического пространства ($n \sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ см}^{-3}$); плазму в звёздах; вырожденную плазму в белых карликах и нейтронных звёздах;

плазмопауза — область резкого спада концентрации плазмы в магнитосфере планеты;

плазмосфера — область на расстоянии от Земли, в 4–5 раз превышающем её радиус, из силовых линий дипольного магнитного поля и находящейся на них холодной плазмы ионосферного происхождения. Плотность частиц порядка 10^2 см^{-3} .

погода космическая — состояние околоземного космического пространства, обусловленное активностью Солнца, условиями в солнечном ветре, магнитосфере, ионосфере и термосфере Земли. Это понятие введено в 1994 г. В настоящее время космическая погода определяется и публикуется каждый день различными организациями, такими как ИЗМИРАН в России или NOAA Space Environment Center Boulder (Colorado) в США;

поле

~ **географическое** — ареал, в пределах которого проявляется воздействие данного географического объекта на другие объекты и явления;

~ **геомагнитное** — магнитное поле Земли, которое в первом приближении можно считать имеющим дипольный характер. Смещение северного геомагнитного полюса относительно географического составляет в настоящее время $11,5^\circ$ в сторону Тихого океана;

~ **межпланетное магнитное** — унесённое солнечным ветром магнитное поле Солнца. Магнитные силовые линии вследствие вращения Солнца имеют спиралевидную форму. Напряжённость обратно пропорциональна расстоянию от Солнца и в районе Земли составляет в среднем 10^{-5} Э. Поле имеет секторное строение, в соседних секторах напряжённости поля противоположны. В течение солнечного цикла в пространстве выделяются 2–4 (иногда 6) сектора;

полюсов движение — движение географических полюсов Земли относительно её поверхности. Вызвано несовпадением оси симметрии и оси вращения Земли, неоднородностью её строения и сезонностью метеорологических явлений. Носит периодический характер: с периодом 427–433 сут., связанным с периодом собственных колебаний земного шара и 1 год, связанным с сезонными изменениями, с максимальной амплитудой 0,3 км. Не изменяет небесных координат светил;

постоянная солнечная — количество энергии, попадающее на 1 см^2 поверхности на расстоянии 1 а. е. от Солнца за единицу времени. Составляет $1,4 \text{ кВт/м}^2$ или приблизительно $1,95 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$;

потенциал

~ **ландшафта природный** — количество вещества, энергии и информации, воспроизводимое ландшафтом в ходе естественных процессов функционирования и развития;

~ **ландшафта ресурсный** — часть вещества и энергии, которая отторгается в социально-экономическую сферу;

поток метеорный — 1) явление множественного падения метеоров в течение нескольких часов из одного радианта; 2) рой метеорных тел, движущихся по одной орбите вокруг Солнца. Обычно состоит из тел низкой плотности и является продуктом распада комет (например, в

1845 г. распалась комета Биелы, по её орбите движется метеорный поток Андромедиды);

почвы

~ **истощение** — обеднение почвы питательными веществами, ведущее к снижению её плодородия. Вызывается иногда естественными причинами, но большей частью является следствием техногенных воздействий;

~ **деградация** — истощение почвы до степени разрушения её структуры. Главной причиной является антропогенное воздействие. К примеру, в районах расположения космодромов и стартовых ракетных площадок почва на больших площадях деградирована в результате воздействия выпадающих на неё остатков ракетного топлива;

пояс

~ **Койпера** — пояс астероидов и кометных ядер за орбитой Нептуна. Пока в нём известно около полусотни объектов размерами в несколько сотен км, а ориентировочно их количество оценивается в $7 \cdot 10^4$.

~ **Казимирчак-Полонской** — один из резервуаров кометных тел, расположенный между орбитами планет-гигантов (между Ураном и Нептуном, к примеру, сохранилось до 0,5 % пленетезималей);

пояса радиационные — зоны магнитосферы планеты, в которых движутся частицы солнечного ветра, захваченные магнитным полем. Земной внутренний радиационный пояс (преимущественно протонный) находится на высоте в среднем 3000 км, внешний электронный — 20000–22000 км в районе экватора. Поскольку магнитная ось Земли наклонена к оси вращения, в районе Бразилии внутренний радиационный пояс спускается к поверхности планеты, образуя Южноатлантическую магнитную аномалию. На Западе носят название земных радиационных поясов Ван Аллена по имени их первооткрывателя. Наиболее мощные радиационные пояса в Солнечной системе у Юпитера и Сатурна;

правило

~ **десяти процентов** — среднемаксимальный переход с одного трофического уровня экологической пирамиды на другой 10 % энергии (или вещества в энергетическом выражении), как правило, не ведёт к неблагоприятным для экосистемы (и теряющего энергию трофического уровня) последствиям;

~ **одного процента** — изменение энергетики природной системы в пределах 1 % выводит систему из равновесного (квазистационарного) состояния;

предельно

~ **допустимая концентрация загрязняющих веществ (ПДК)** — максимальная концентрация загрязняющих веществ, не влияющая негативно на здоровье людей настоящего и последующих поколений при воздействии на человека в течение всей его жизни;

~ **допустимая площадь нарушения ландшафта (экосистемы)** — предел, до которого ещё возможна регенерация природной системы;

его превышение ведёт к разрушению системы и переходу её в новое состояние;

~ **допустимые выбросы (ПДВ)** — максимальный объём веществ в единицу времени, который не ведёт к превышению их ПДК;

прецессия

~ **геодезическая** — релятивистское прямое движение точек равноденствия по эклиптике со скоростью 1,9″ в год;

~ **лунно-солнечная** — явление конусообразного движения оси Земли вокруг оси эклиптики так, что ось Земли всегда остаётся наклонённой к плоскости эклиптики под углом 66°33′.

~ **общая** — суммарная лунно-солнечная и планетная прецессия, в результате которой точка весеннего равноденствия движется к западу со скоростью 50,27″ в год, и тропический год оказывается на 20 мин. короче звёздного. Период общей прецессии 25800 лет;

~ **планетная** — планеты в основном действуют не на положение оси Земли, а на её орбиту, изменяя положение плоскости эклиптики. Эта прецессия смещает точку весеннего равноденствия к востоку на 0,114″ в год;

приливы и отливы — явления изменения взаимного расположения масс внутри и на поверхности Земли под действием притяжения, в основном, Луны и Солнца. Наиболее заметны водные приливы и отливы. За солнечные сутки в данной местности происходят два прилива и два отлива. За лунные (24 часа 52 мин.) также два прилива и два отлива. Наибольший прилив во время полнолуний и новолуний, наименьший — во время первой и последней четверти;

принцип

~ **антропный** — разумная жизнь во Вселенной является необходимым следствием её фундаментальных свойств;

~ **Гюйгенса** — жизнь есть космическое явление, в чём-то резко отличное от косной материи;

~ **Ле Шателье-Брауна** — изменение любых переменных в системе в ответ на внешние воздействия идёт в направлении компенсации этих воздействий (отрицательная обратная связь);

~ **Онсагера** — наиболее вероятен тот тренд эволюции, на котором обеспечивается минимальная диссипация энергии, то есть эволюция всегда направлена на снижение рассеяния энергии и минимальный рост энтропии;

природопользование рациональное — система деятельности, призванная обеспечить наиболее эффективный режим воспроизводства и экономной эксплуатации природных ресурсов с учётом перспективных интересов развивающегося хозяйства и здоровья людей. В настоящее время человечество оказалось перед проблемой выработки экономического механизма природопользования, который обеспечил бы выполнение условия $(\alpha + \beta)N < P$, где α и β — расход природных ресурсов на одного человека для его личных и производственных нужд, N — численность населения, P — воспроизводимый объём природных ресурсов;

природы преобразование — антропогенное изменение сложившегося экологического равновесия для увеличения биологической продуктивности или хозяйственной производительности природных комплексов;

продуценты — зелёные растения, осуществляющие фотосинтез, а также бактерии, способные к хемосинтезу, являющиеся в пищевой цепи соиздателями органического вещества. *См.* **автотрофы**;

прозрачность атмосферы — способность атмосферы пропускать электро-магнитное излучение, зависящая от величины воздушной массы и содержания в воздухе молекул водяного пара и аэрозолей;

пространство

~ **географическое** — форма существования географических объектов и явлений в пределах географической оболочки; совокупность отношений между географическими объектами, расположенными на конкретной территории и развивающимися во времени;

~ **жизненное** — 1) средняя площадь, приходящаяся на одну особь популяции, обеспечивающая её нормальное существование в составе популяции; 2) территория, необходимая для удовлетворения всех нужд одного человека;

~ **межпланетное** — область космического пространства, состоящая из вещества, движущегося вокруг Солнца под действием его тяготения внутри его плазмы, пронизанная корпускулярным и электромагнитным излучением;

~ **околоземное космическое** — чаще всего под ним подразумевается область от слоёв нейтральной земной атмосферы (точнее, нижних орбит зоны пилотируемой космонавтики $\approx 160\text{--}200$ км) вплоть до лунной орбиты или, по некоторым представлениям — до границы сферы действия Земли (930 тыс. км) общим объёмом порядка $10^{15}\text{--}10^{18}$ км³. С точки зрения взаимодействия с биосферой большое значение имеет область, начинающаяся от озонового слоя;

противоизлучение — инфракрасное излучение атмосферы, направленное в сторону поверхности планеты;

протуберанцы — (от лат. *protubero* — вздуваюсь). Потоки солнечной плазмы, выбрасываемые с большими скоростями из Солнца. Более плотные и холодные, чем окружающее их вещество короны. Длина несколько сотен тысяч км при ширине не более 10000 км. Возникновение, развитие и движение тесно связаны с эволюцией групп солнечных пятен;

профиль эколого-топологический — комплексный профиль рельефа, отображающий сопряжённую смену биоценозов и экологических факторов в пространстве;

процессы

~ **географические** — процессы формирования, функционирования и развития геосистем. Сопровождаются изменением свойств и состава геосистем, их границ и взаимосвязей. Подразделяются на вещественные, энергетические или информационные, а также процессы взаимодействия природы и общества;

~ **экзогенные** — процессы, происходящие на поверхности Земли, обусловленные, главным образом, энергией солнечного излучения, силой тяжести и жизнедеятельностью организмов;

~ **эндогенные** — процессы, происходящие за счёт энергии, выделяемой внутри Земли при магматических, тектонических и метаморфических процессах;

пыль — совокупность мелких взвешенных в атмосфере планеты частиц размерами 10^{-4} – 10^{-6} м способных в отличие от дыма оседать при безветрии;

~ **межзвёздная** — мелкие твёрдые силикатные и графитовые частицы в межзвёздном пространстве, расположенные вместе с межзвёздным газом в плоскости Галактики. Форма несферическая. Внутреннее строение достаточно сложно: тугоплавкое ядро, оболочка из органических соединений, ледяная мантия. Размеры сравнимы с длиной волны излучения в видимой области. Вызывают покраснение проходящего света. Играют важную роль в формировании межзвёздных молекул;

~ **межпланетная** — смесь межзвёздной пыли с пылью, образованной кометами и остатками метеорной материи;

пятно солнечное — область пониженной примерно до 4500 К температуры в фотосфере Солнца, концентрирующая силовые линии магнитного поля (до 1000 Гс). Средний диаметр — до 10000 км. Первые упоминания о солнечных пятнах имеются в Китайских хрониках (II в. до н.э.). В Европе с 1610 по 1612 г. их наблюдали Д. Фабриций, Т. Гарриот, Х. Шейнер и Г. Галилей. Только последний понял, что открытие солнечных пятен опровергает устаревшие идеи Аристотеля о том, что небо неизменно ввиду его совершенства;

пятен солнечных число относительное — см. **Вольфа число**;

Р

равновесие

~ **природно-антропогенное** — вторичное экологическое равновесие, образующееся на основе баланса изменённых в процессе хозяйственной деятельности человека средообразующих компонентов и природных процессов;

~ **экологическое** — баланс естественных или изменённых человеком средообразующих компонентов и природных процессов, приводящий к длительному существованию данной экосистемы. Компонентное равновесие основано на балансе экологических компонентов внутри одной экосистемы. Территориальное равновесие возникает при некотором соотношении интенсивно и экстенсивно эксплуатируемых или неэксплуатируемых (заповедники) участков. Оно обеспечивает отсутствие сдвигов в экологическом балансе крупных территорий в целом;

~ **экологическое целесообразное** — природно-антропогенное равновесие, поддерживаемое на уровне, который даёт максимальный эколого-социально-экономический эффект в течение условно бесконечного времени. Его индикатором служит способность экосистем достигать в ходе сукцессии узловых сообществ;

радиация

~ **длинноволновая в атмосфере** — инфракрасное излучение земной поверхности, атмосферы и облаков в диапазоне 4–120 мкм;

~ **коротковолновая в атмосфере** — условное название прямой и рассеянной солнечной радиации в диапазоне 0,17–4 мкм, включая ближнее УФ, видимое и ближнее ИК-излучение;

~ **отражённая** — часть суммарной солнечной радиации, теряемая земной поверхностью в результате отражения;

~ **прямая** — доходящая до пункта наблюдения в виде пучка параллельных лучей, исходящих от Солнца. Изменяется в зависимости от высоты Солнца над горизонтом и прозрачности атмосферы. Максимальна на уровне моря при нормальных условиях;

~ **рассеянная** — составная часть суммарной солнечной радиации, претерпевшая изменения при прохождении атмосферы. Играет существенную роль в энергетическом балансе Земли, являясь при сплошной облачности единственным источником энергии приземных слоёв атмосферы;

~ **солнечная** — совокупность электромагнитного и корпускулярного излучения Солнца;

~ **суммарная** — совокупность прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность;

радионуклиды — изотопы элементов, испускающие радиоактивные излучения;

радиоокно — диапазон длин радиоволн (1 см — 30 м), в котором земная атмосфера прозрачна для радиоизлучения;

развитие устойчивое — развитие общества, которое удовлетворяет потребности настоящего времени и не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности;

размер экосистемы — пространство, при наличии которого возможно осуществление процессов саморегуляции и самовосстановления совокупности составляющих экосистему средообразующих элементов и компонентов;

рассеяние — явление неполного поглощения света средой, когда вторичное излучение выходит из среды под другими углами;

~ **атмосферное** — явление рассеяния света атмосферой планеты, обусловленное как истинным релеевским рассеянием, так и рассеянием на частицах пыли и аэрозолях;

~ **релеевское** — рассеяние света микронеоднородностями атмосферы, обратно пропорциональное четвёртой степени длины волны. Обуславливает голубой цвет земной атмосферы;

революция экологическая — ответная реакция человечества на кризисное состояние системы «биосфера-человек». Охватывает все стороны хозяйства и приводит к изменению взглядов человека на природу, её эксплуатацию. В истории выделяют три экологические революции. Современный экологический кризис характеризуется опасным загрязнением биосферы и околоземного космического пространства, приближением к максимуму использования энергии на поверхности Земли и резким нарушением экологического равновесия;

режим

~ **природно-антропогенный** — сложение природных и антропогенных факторов, создающее в сумме новые экологические условия жизни организмов и их сообществ;

~ **природный** — сочетание естественных средообразующих компонентов и воздействий, создающих экологические условия жизни организмов и их сообществ;

ресурсы

~ **возобновимые** — все природные ресурсы, находящиеся в пределах биосферного круговорота веществ, способные к самовосстановлению за сроки, соизмеримые с темпом хозяйственной деятельности человека;

~ **невозобновимые** — та часть природных ресурсов, которые никогда не могут быть заменены другими;

~ **неистощимые** — неиссякаемая часть природных ресурсов, недостаток которых не ощущается в настоящее время и не предвидится в будущем. Пример — солнечная энергия;

~ **окружающей среды** — ресурсная группа, включающая в себя все экологические ресурсы, которые непосредственно воздействуют на человека и являются объектами его хозяйства. Термин близок к понятию природных условий;

~ **природные** — 1) природные объекты и явления, используемые в настоящем, прошлом и будущем для прямого и непрямого потребления, способствующие созданию материальных богатств, воспроизводству трудовых ресурсов, поддержанию условий существования человечества и повышающие качество жизни; 2) тела и силы природы, общественная полезность которых положительно или отрицательно изменяется в результате деятельности человека. При этом изменение состояния этих тел и сил (явлений) природы в процессе их использования прямо или косвенно затрагивает интересы хозяйства сейчас или в обозримой перспективе;

ресурсов природных истощение — 1) несоответствие между безопасными нормами изъятия природных ресурсов из природных систем или недр и потребностями человечества; 2) уменьшение объёма природных ресурсов до такой степени, что оно ведёт к необратимым изменениям окружающей среды;

С

саморегуляция — способность экологической системы к восстановлению баланса внутренних свойств после какого-либо природного или антропогенного воздействия. Основана на принципе обратных связей (Ле Шателье);

связи солнечно-земные — зависимость геофизических и биологических процессов от состояния солнечной активности: основного 22-летнего и 11-летнего циклов;

синэкология — раздел экологии, исследующий взаимоотношения сообществ (биоценозов) со средой обитания;

сияние полярное — явление свечения неба в полярных областях Земли, вызванное излучением ионов атмосферы после воздействия на них частиц солнечного ветра (главным образом, после солнечной вспышки) и самих заряженных частиц при ускорении их геомагнитным полем в зонах магнитных полюсов;

слой

~ **Голицына** — нижняя часть верхней мантии Земли (Б.Б. Голицын, 1916 г.) на глубинах 400–900 км. Характеризуется резким ростом скорости сейсмических волн;

~ **озоновый** — слой в земной атмосфере на высотах от 18 до 80 км, в котором повышена концентрация озона O_3 и, соответственно, происходит поглощение ультрафиолетового излучения, его создающего. С конца 80-х гг. XX в. заметно утоньшается в полярных областях в результате, как считается, воздействия фреонов;

~ **пограничный** — слой атмосферы планеты, тепловые и динамические свойства которого определяются воздействием её поверхности;

~ **приземный** — пограничный слой воздуха земной тропосферы на высотах до 30–50 м от поверхности;

~ **D** — самая нижняя часть ионосферы Земли (около 60 км), ответственная за отражение радиоволн;

Солнца

~ **радиоизлучение** — электромагнитное излучение Солнца в диапазоне от миллиметровых до метровых волн, возникающее в области от нижней хромосферы до солнечной короны. Различают тепловое излучение «спокойного» Солнца, излучение активных областей в атмосфере над солнечными пятнами, спорадическое излучение солнечных вспышек;

~ **служба** — всемирная сеть солнечных станций и обсерваторий, осуществляющих непрерывные наблюдения Солнца и его активных образований;

~ **спектр** — непрерывный спектр излучения в оптическом диапазоне близок к спектру абсолютно чёрного тела с температурой около 5800 К и максимумом излучения вблизи 575 нм. На него наложено более 20 тыс. линий поглощения различных химических элементов;

Солнце — ближайшая к Земле звезда, центр нашей планетной системы. Является звездой главной последовательности класса G2V. Диаметр 1 392 000 км, масса $2 \cdot 10^{30}$ кг, средняя плотность $1,4 \text{ г/см}^3$. Внеатмосферная звёздная величина в системе $V = -26,77^m$. Светимость $3,9 \cdot 10^{26}$ Дж/с, мощность общего излучения Солнца $3,74 \cdot 10^{22}$ кВт. Эффективная температура поверхности порядка 5800 К. Солнце расположено на расстоянии 10 000 пк от центра Галактики в 15 пк к северу от её плоскости. Скорость движения Солнца относительно ближайших звёзд направлена в созвездие Геркулеса и составляет 19,5 км/с. Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики около 250 км/с, так что период его обращения составляет величину около 200 млн лет;

~ **динамическое среднее** — воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по эллиптике и совпадающее с истинным в момент прохождения перигелия;

~ **ложное** — в результате преломления света на кристалликах льда в атмосфере по обе стороны Солнца на расстоянии 22° от него на круглом гало возникают яркие пятна, весьма похожие на настоящее светило. Обычно возникают парами, отсюда название **паргелий**;

~ **спокойное** — Солнце в период минимума активности, когда на нём не наблюдается пятен;

~ **среднее** — воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по экватору. Его прямое восхождение совпадает с прямым восхождением истинного Солнца 4 раза в год;

социосфера — часть географической оболочки, входящая в неё наряду со сферой природных ландшафтов; включает в свой состав человеческое общество;

среда — 1) природные тела или явления, окружающие рассматриваемую экосистему и взаимодействующие с ней; 2) совокупность физических (природных) природно-антропогенных (культурных ландшафтов и населённых мест) и социальных факторов жизни человека;

~ **абиотическая** — силы и явления природы, происхождение которых прямо не связано с жизнедеятельностью ныне живущих организмов;

~ **антропогенная** — природная среда, изменённая деятельностью людей;

~ **биотическая** — силы и явления природы, обязанные своим происхождением жизнедеятельности ныне живущих организмов;

~ **внешняя** — силы и явления природы, её вещество и пространство, любая деятельность человека, находящиеся вне рассматриваемого объекта или субъекта, но необязательно непосредственно контактирующие с ним;

~ **географическая** — понятие, объединяющее природную и окружающую среду. Является частью географической оболочки, в той или иной мере освоенной человеком и вовлечённой в общественное производство;

~ **межпланетная** — вещество и поля, заполняющие Солнечную систему. Основными компонентами являются солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, частицы высокой энергии, пыль и нейтральный газ. Средняя плотность в районе земной орбиты 10^{-24} г/см³.

~ **окружающая** — 1) то же, что и внешняя среда, но находящаяся в непосредственном контакте с объектом или субъектом; 2) совокупность абиотической и социальной сред, совместно оказывающих влияние на людей и их хозяйство;

~ **окружающая природная** — 1) совокупность естественных и изменённых деятельностью людей абиотических и биологических факторов, оказывающих влияние на человека; 2) часть природы, которая воздействует непосредственно и опосредованно на человечество, его группы и отдельных людей; 3) комплекс абиотической и биотической сред, влияющих на человека и его хозяйство;

среды загрязнения — привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных веществ и соеди-

нений, или превышение многолетнего естественного уровня концентрации этих веществ и соединений. *См.* **загрязнение**;

стабильность

~ **биосферы** — способность биосферы противостоять внутренним возмущениям, включая антропогенные воздействия;

~ **экологическая** — способность экосистемы противостоять абиотическим и биотическим факторам среды, включая антропогенные воздействия;

стратоспауза — граница стратосферы и мезосферы на высотах около 60 км. После неё температура начинает уменьшаться с высотой;

стратосфера — зона атмосферы Земли, расположенная над тропосферой на высотах 15–60 км, характеризующаяся возрастанием температуры с высотой;

стресс — напряжение, выводящее систему на границу устойчивости или неустойчивое, неравновесное состояние;

~ **экологический** — вызванное деятельностью человека увеличенное поступление энергии или вещества, приводящее к подавлению функций экосистемы;

структура

~ **секторная** — явление в закрученных в архимедову спираль линиях межпланетного магнитного поля, состоящее в наличии в нём разнополярных секторов, разделённых токовым слоем. Токовый слой имеет волнообразную поверхность. При вращении Солнца Земля несколько дней находится то выше, то ниже токового слоя и попадает в межпланетное магнитное поле, направленное то к Солнцу, то от него;

~ **экосистемы** — естественное функционально-морфологическое членение экосистемы на подсистемы-блоки. В число структурных элементов входят популяции, консорции, синуэции и т. д.;

сукцессия — последовательная смена одних сообществ (организмов) другими. Антропогенная сукцессия возникает в результате хозяйственной деятельности человека;

~ **экологическая** — постепенное изменение экосистемы под влиянием внутренних или внешних условий;

Т

тектит — небольшое тело метеорного происхождения с аморфной стеклообразной структурой. По одной из гипотез, образовались при ударе крупного метеора или астероида о земную поверхность с выделением большого количества теплоты;

тектоносфера — обобщающее название наружной оболочки Земли, включающее литосферу и астеносферу;

тело

~ **метеорное** — частица, обращающаяся вокруг Солнца;

~ **родительское** — астероид, комета или другое тело, фрагментом которого является метеорное тело;

термоспауза — верхняя граница термосферы (около 300 км для Земли), на которой прекращается рост температуры;

термосфера — слой атмосферы планеты, располагающийся выше мезопаузы, в котором происходит рост температуры с высотой;

техносфера — часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком;

транзитность — прохождение вещества, энергии и информации через какую-либо систему без существенного накопления в ней (но с использованием части потока в системообразующих целях). Околоземное пространство транзитно по отношению к проходящей через него энергии, однако, эта энергия служит основой функционирования биосферы;

трансформация — антропогенное изменение биотического сообщества, приводящее к восстановительной сукцессии;

тропопауза — верхняя граница тропосферы (около 15 км), где градиент температуры равен нулю;

тропосфера — самый нижний (до 15 км) и плотный слой атмосферы Земли. Температура падает с высотой от 290 К до 240 К;

турбопауза — граница (110–120 км) турбулентной атмосферы (перемешивание обеспечивает постоянство молекулярной массы атмосферы) и слоёв, где нейтральные молекулы и атомы распределяются независимо в соответствии с барометрической формулой;

У

удар звуковой — звуковая ударная волна, возникающая при превышении летящим телом скорости звука в атмосфере;

уровень

~ **вредных веществ фоновый** — природная концентрация вредных веществ в окружающей среде;

~ **загрязнения** — абсолютная или относительная величина содержания в среде загрязняющих веществ;

~ **излучения фоновый** — создаваемый естественными излучениями земного и космического происхождения;

~ **критический** — концентрация загрязняющего вещества, ниже которой не происходит вредного воздействия в соответствии с современным уровнем знаний;

~ **радиоактивности** — суммарная интенсивность самораспада радиоактивных элементов в окружающей среде. Зависит от естественного фона радиоактивности и количества антропогенных загрязнителей среды обитания;

уровни геохор иерархические — расположение в порядке от высшего к низшему. Различают 5 основных иерархических уровней гео- и биохор: 1) гигахоры — главные элементы биосферы и географической оболочки: океаны и материки, биоклиматические пояса и биогеографические царства размером более 10^6 км²; 2) мегахоры — единицы природно-хозяйственного и биогеографического районирования размером 10^3 – 10^5 км²; 3) макрохоры — территория конкретных ландшафтов размером 10 – 10^2 км²; 4)–5) микрохоры и мезохоры — морфологические единицы ландшафта размером 10^{-1} – 10^{-2} км² и входящие в их состав биогеоценозы;

условия природные — совокупность географического положения территории, природных ресурсов и других компонентов природной среды;

ущерб экологический — эколого-социально-экономически значимое искусственное изменение среды в пределах обусловленного времени;

Ф

факелы — 1) яркие области в фотосфере Солнца, наблюдаемые вблизи его лимба; 2) яркие пятна на поверхностях планет и их спутников;

фактор

~ (ы) **абиотические** — факторы в экосистемах, разделяющиеся на солнечную и космическую радиацию, факторы литосферы и факторы гидросферы;

~ **антропогенный** — фактор, обязанный своим происхождением деятельности человека;

~ **атмосферный** — фактор, связанный с физическим состоянием или химическим свойством атмосферы;

~ **биогенный** — группа факторов, связанных как с прямым, так и с опосредованным влиянием живых организмов на среду в современную и прошлые эпохи;

~ **космический** — источником его служат процессы, идущие вне Земли;

~ **экологический** — любое условие среды, на которое живое реагирует приспособительными реакциями. Подразделяются на абиотические, биотические и антропогенные;

ФАР — фотосинтетическая активность радиации Солнца;

фитосфера — поверхностный слой над Землёй (до 150 м), где условия среды в значительной мере определяются зелёной растительностью;

флоккулы — 1) волокнистые образования в хромосферном слое вокруг центров активности — пятен. Наблюдаются только в свете фраунгоферовых линий в проекции на диск Солнца; 2) яркие эмиссионные области в хромосфере Солнца, расположенные над факелами хромосферы;

фон излучения естественный — суммарный природный поток ионизирующего излучения космического происхождения и за счёт земных радиоактивных элементов в окружающей среде. В период до начала ядерных испытаний составлял 0,05 Рентген/год;

фотосинтез — синтез органических веществ продуцентами с помощью световой энергии;

фотосфера — внешняя область звезды, спектр которой является спектром непрерывного излучения чёрного тела. Визуально воспринимается как поверхность звезды;

функция

~ **концентрационная** — функция живого вещества, заключающаяся в избирательном накоплении при жизнедеятельности организмов атомов веществ, рассеянных в природе;

Х

хвост

~ **кометный** — хвост кометы, направленный из головы кометы от Солнца. Его длина достигает в некоторых случаях 10^7 км, средняя плотность 10^{-18} г/см³. Классификация кометных хвостов по форме впервые разработана Ф. Бредихиным;

~ **ионный** — хвост кометы (называемый ещё газовым или плазменным), состоящий из ионизированных атомов и молекул, которые излучаются в результате резонансной флуоресценции. Под действием ветра и магнитного поля уносится от кометы, имея почти прямолинейную форму;

~ **магнитный** — часть магнитосферы планеты с её ночной стороны вытягивается под действием солнечного ветра в длинный хвост. У Земли его длина составляет величину до 1000 её радиусов;

~ **пылевой** — хвост кометы, состоящий из возгораемых из ядра пылевых частиц диаметром около микрона. Длина до 10^6 км. Под влиянием светового давления отклоняется в сторону, противоположную Солнцу, но не имеет такой прямолинейной формы, как газовый;

Хевисайда слой — устаревшее название слоя E в земной ионосфере на высоте около 150 км, где градиент температуры изменяет знак и начинает расти;

Хейла цикл — см. **цикл солнечный магнитный**;

хионосфера — слой атмосферы, в котором создаётся постоянный положительный баланс твёрдых осадков. Его нижняя граница при пересечении с горными вершинами образует снеговую линию;

Хирон — астероид с орбитой между орбитами Сатурна и Урана, открытый в 1977 г. как первый объект пояса Койпера. Имеется предположение, что эти объекты частично являются замёрзшими ядрами комет. В частности, Хирон имеет аномально большое (до 200 км) рыхлое ядро;

хромосфера — часть солнечной атмосферы между фотосферой и короной: нижняя до высоты 4000 км с температурой около 7500 К из нейтрального водорода, верхняя — до 12000 км с температурой около 10^6 К и состоящая из ионизированного водорода. Спектр хромосферы является эмиссионным;

Ц

цепь трофическая — взаимоотношения между организмами, через которые в экосистеме происходит трансформация вещества и энергии;

цикл

~ **жизненный** — период от рождения или появления оплодотворённого яйца до смерти;

~ **веществ в биосфере** — цикл основных элементов (биогенов), обеспечивающих жизнедеятельность в биосфере как едином целом —

большой цикл. Малые циклы — циклы веществ в одной экосистеме, замкнуты не полностью, поэтому связаны с большими циклами;

~ **солнечный** — 11-летняя периодичность солнечной активности. Его нарушения (полное отсутствие пятен) случались за эпоху телескопических наблюдений три раза. Последний — с 1900 г. по 1920 г.;

~ **солнечный магнитный** — основной период колебаний магнитного поля Солнца, равный удвоенному циклу числа солнечных пятен ~ 22 года, поскольку пятна реагируют только на напряжённость, а не знак магнитного поля;

циркуляция атмосферы

~ **общая** — перемешивание слоёв атмосферы, обусловленное различным их нагревом солнечным излучением;

~ **локальная** — перенос воздушных масс над сравнительно небольшой территорией или акваторией размером от сотен метров до десятков километров;

цунами — гигантские волны на поверхности океана, возникающих в результате подводных извержений вулканов, землетрясений, падений крупных астероидов. Могут приводить к глобальным бедствиям катастрофического характера;

Ч

Чандлера период — период колебания полюсов мира, около 430 суток. Колебания вызваны сезонными изменениями в распределении масс и движением вещества в недрах Земли. Ось вращения Земли ориентации в пространстве не изменяет;

численность (организмов) — 1) число особей данного вида на единицу площади или в популяции; 2) общее число особей живого на определённой площади или в единице объёма;

чувствительность — свойство живых организмов реагировать на действие факторов окружающей среды;

Ш

шапка полярная — зона, расположенная вокруг полюсов планеты. Земля и Марс имеют полярные шапки, состоящие из льда и инея и подверженные сезонным изменениям;

широты

~ **служба** — сеть обсерваторий (более 40 по всему миру), осуществляющих измерения географической широты, происходящие вследствие движения полюсов. Руководство осуществляется Международной службой движения полюсов;

шкала

~ **Добсона** — см. **Добсона шкала**;

~ **измерений природных процессов** — условные градации, принимаемые за единицу силы природных процессов;

~ **оценочная** — ряд непрерывно усиливающихся или ослабляющихся групп (баллов), с целью придания процессу или явлению количественной оценки (например, шкала Бофорта для скорости ветра,

Рихтера для землетрясений, Добсона для плотности озонового слоя и т. д.);

~ **палермская** — определяет количественно уровень значимости возможности потенциального столкновения с Землёй космического тела;

~ **pH** — выражение концентрации водородных ионов, или кислотность среды;

~ **туринская** — десятибалльная качественная шкала космической опасности со стороны астероидов и комет для Земли, принятая в Турине в 1999 г.;

Шперера

~ **закон** — зоны пятнообразования на Солнце в течение цикла активности смещаются к экватору;

~ **минимум** — снижение солнечной активности в период 1400–1510 гг.;

шум — одна из форм физического загрязнения, адаптация к которой невозможна;

Шэлфолда закон — см. **закон толерантности**;

Э

эволюция экосистемы (биогеоценоза) — процесс непрерывного, одновременного и взаимосвязанного изменения видов и их взаимоотношений, внедрения новых видов в экосистему и выпадения из неё некоторых видов, ранее в неё входивших, совокупного воздействия на абиотические экологические компоненты и обратного влияния этих изменённых компонентов на живые составляющие экосистемы;

экватор

~ **геомагнитный** — большой круг на поверхности Земли, плоскость которого перпендикулярна геомагнитной оси;

~ **небесный** — большой круг небесной сферы, по которому её пересекает плоскость земного экватора;

~ **планеты** — условная линия разреза планеты на две равные полусферы;

~ **тепловой** — линия, соединяющая точки с наиболее высокими у земной поверхности средними температурами воздуха;

~ **эклиптический** — большой круг небесной сферы, проходящий по эклиптике, являющийся отражением годичного движения Земли вокруг Солнца;

экзобиология — комплекс наук об организмах, живущих вне Земли;

экзосфера — внешняя часть верхней атмосферы, где для атомов высока вероятность покидания планеты. Самая наружная часть экзосферы Земли — геокорона — состоит из несоединяющихся атомов водорода и простирается до 10^5 км;

экогенез — развитие отношений между организмами и окружающей средой в процессе эволюции;

экология — (греч. *oikos* — дом, жилище, местопребывание + *logos* — слово, учение). Наука о взаимоотношении организмов и образу-

емых ими сообществ с абиотическими и биотическими экологическими факторами;

~ **глобальная** — изучает воздействие различных факторов на биосферу Земли в целом, в частности, взаимодействие биосферы Земли и околоземного космического пространства, которое является для неё окружающей средой;

~ **инженерная** — часть промышленной экологии, связанная с разработкой и применением технологических методов регулирования воздействия на окружающую среду;

~ **космическая** — изучает малые пространственно замкнутые системы длительного поддержания жизнедеятельности человека в космических аппаратах;

~ **космоса** — подразумевает у большинства авторов прежде всего изучение антропогенных воздействий на космическое пространство;

~ **ландшафтная** — изучает природно-территориальные комплексы с экологической точки зрения как биотопы, экотопы или местообитания, занятые биоценозами;

~ **общая** — наука об общих закономерностях взаимоотношений организмов и среды, включая человека как биологическое существо;

~ **прикладная** — разработка норм использования природных ресурсов и среды жизни, допустимых нагрузок на них. Изучение механизмов разрушения биосферы человеком, способов его предотвращения и разработка принципов рационального природопользования без деградации окружающей среды;

~ **физическая** — исследующая взаимосвязь биосферы с окружающей её средой методами физических наук;

~ **человека** — наука, рассматривающая биосферу как экологическую нишу человечества, изучающая природные, социальные и экономические условия как факторы среды обитания человека, обеспечивающие его нормальное воспроизводство и развитие;

экосистема — 1) комплекс, в котором между биотическими и абиотическими компонентами происходит обмен веществом, энергией, информацией. Является безразмерным понятием. В данных терминах глобальной системой является биосфера; 2) информационно саморазвивающаяся, термодинамически открытая совокупность вещества и энергии, единство и функциональная связь которых в пределах характерного для определённого участка биосферы времени и пространства обеспечивают превышение на этом участке внутренних закономерных перемещений вещества, энергии и информации над внешним обменом и на основе этого неопределённо долгую саморегуляцию и развитие целого под управляющим воздействием биотических и биогенных составляющих;

~ **водная** — экосистема, в биотопе которой преобладает вода в жидком состоянии;

~ **городская** — искусственная гетеротрофная экосистема;

~ (ы) **изоморфные** — экосистемы, пересечение свойств которых выявляет область общих элементов, что позволяет применять к ним единые методы описания структуры, состояния, поведения;

экосистемы живучесть — способность экосистемы выдерживать резкие колебания абиотической среды, массовые размножения или длительные исчезновения видов, антропогенные нагрузки;

экосфера — совокупность абиотических объектов и характеристик Земли, создающая на ней условия для возникновения жизни. Пространственно включает в себя тропосферу, всю гидросферу, верхнюю часть литосферы, свойства которых обусловлены остальными сферами планеты (включая ядро), а также солнечными и космическими факторами;

экран озоновый — см. **озоносфера**;

экспансия антропогенная — любые расширяющиеся со временем прямые и косвенные воздействия человека на природу;

экстинкция — ослабление света при его прохождении через какую-либо среду;

~ **атмосферная** — эффект поглощения и рассеяния света земной атмосферой. Возрастает от зенита к горизонту и вызывает покраснение небесных светил;

энергетика

~ **биосферы** — тепловой, энергетический баланс между биосферой и космическим пространством, энергетические процессы в экосистемах, антиэнтропийные процессы (направленные на упорядоченность потоков энергии) в живом веществе и энергетика отдельных живых организмов;

~ **космическая** — перспективное получение солнечной энергии на искусственных спутниках Земли с узконаправленной её передачей на земные приёмники;

~ **экологическая** — основанная на биологических источниках энергии;

энергия

~ **солнечная** — электромагнитная и корпускулярная энергия, входящая от Солнца и падающая на поверхность Земли. Величина её определяется **постоянной солнечной**;

~ **«чистая»** — любой вид энергии, получение и использование которого не приводит к химическому и радиоактивному загрязнению окружающей среды. Такой является солнечная энергия;

энергосистема — совокупность энергетических ресурсов всех видов, методов их получения, преобразования, распределения и использования;

Эпплтона слои — два слоя земной атмосферы на высоте 200 км (F_1) и 300 км (F_2).

этика экологическая — имеет предметом ценностные, этические проблемы взаимоотношения человека и природы. В частности, весьма актуальными являются в настоящее время этические проблемы освоения космоса;

эффект-парниковый — эффект поглощения инфракрасного излучения водяными парами и молекулами углекислого газа, за счёт которого поднимается температура атмосферы (на 40 К в земной атмосфере и на 300 К в атмосфере Венеры);

Я

ядро — центральная часть какого-либо образования;

~ **земное** — центральная часть Земли радиусом около 3400 км со средней плотностью порядка 10 г/см^3 , состоящая из расплавленного железа с примесью лёгких элементов;

~ **кометное** — звездообразное тело в голове кометы, состоящее из замороженных газов и пыли;

Список литературы

1. *Абросимов А.И., Артамонов В.В., Маслов И.А. и др.* Геостационарный радиационно-охлаждаемый телескоп // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000. № 18. С. 90–98.
2. *Агапов В.М.* Современное состояние зарубежных средств и систем контроля космического пространства: Материалы Международной конференции «Околосемная астрономия XXI в.». — Звенигород, 2001.
3. *Адушкин В.В., Козлов С.И., Петров А.В.* (ред.). Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие. — М.: Анкид, 2000. — 638 с.
4. *Азимов А.* Выбор катастроф. — СПб.: Амфора, 2000. — 510 с.
5. *Айзенберг Ю.В.* (ред.). Справочная книга по светотехнике. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 472 с.
6. *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. Т. 1, 2. — М.: Мир, 1975.
7. *Акимов Л.А.* О природе оппозиционного эффекта // *Вестник Харьковского ун-та*. 1980. № 204. С. 3–12.
8. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. — М.: Знание, 1983. — 64 с.
9. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Электризация космических аппаратов. — М.: Знание, 1985.
10. *Алавердов В.В., Левицкий Ю.И., Лукьященко В.И. и др.* Перспективы исследований проблем техногенного засорения околоземного космического пространства // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000а. № 18. С. 7–11.
11. *Алавердов В.В., Лукьященко В.И. и др.* Меры, принимаемые Российской Федерацией по снижению техногенного засорения космоса // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000б. № 18. С. 12–19.
12. *Алавердов В.В., Бодин Б.В.* Основные направления космической деятельности России в 2001–2005 гг. // *Земля и Вселенная*. 2001. № 1. С. 9–18.
13. *Александров Н.Л.* Полярные сияния // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. № 6. С. 75–79.
14. *Алексеев А.С., Величко И.И., Волков Ю.А., Ведерников Ю.А.* Ракетная концепция космической защиты Земли // *Космическая защита Земли*. Известия Челябинского научного центра. Спец. выпуск. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 55–77.
15. *Аллен К.У.* Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977. — 446 с.
16. *Анисимова О.В.* Печальная реальность. Не высока ли цена? — www.gambler.science, 21.12.2001.
17. *Антипова-Каратаева И.И. и др.* Сравнительное изучение фотометрической фазовой функции образцов реголита, доставленного АМС Луна-16 и Луна-20 // *Вестник Харьковского ун-та*. 1976. № 137. С. 3–8.

18. Анфимов Н.А., Васильев В.Н., Колюка Ю.Ф. и др. Дистанционная диагностика характеристик и технического состояния КА с помощью телескопов // Околосземная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 14–23.
19. Ардашев А.Ю., Дородницына О.А., Рыхлова Л.В., Шпитальник М.Ц. Оптические наблюдения высокоорбитальных космических объектов для контроля космического пространства // Околосземная астрономия (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998. С. 128–142.
20. Аристов Л.И., Владимиров А.Н., Кушин В.В. и др. Космическая экология: научно-технические аспекты разработки космических средств мониторинга загрязнения ОКП радиоактивным мусором // Инженерная экология. 2001. № 3. 6 с.
21. Арнольд В.И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. — 128 с.
22. Артамонов В.В., Витриченко В.А., Кондабаров А.В. и др. Наблюдения околоземных объектов с использованием разнесённых телескопов (НОРТ) // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 86–89.
23. Бабаджанов П.Б. Метеоры и их наблюдение. — М.: Наука, 1987. — 180 с.
24. Багров А.В. и др. Наблюдения зеркального отражения от геостационарного спутника // Астрономический циркуляр. 1983. № 1286. С. 3–4.
25. Багров А.В., Смирнов М.А. Распределение энергии в спектре ИНТ // Астрономический циркуляр. 1984. № 1327. С. 7–8.
26. Багров А.В., Смирнов М.А. Об определении формы небесных тел по фотометрическим наблюдениям // Научные информации Астросовета АН СССР. 1986. № 58. С. 152–161.
27. Багров А.В. Спектральные наблюдения ИНТ в Симеизе // Астрономический циркуляр. 1987. № 1478. С. 5–7.
28. Багров А.В., Смирнов М.А. Спектральные наблюдения геостационарных спутников // Наблюдения ИНТ. 1987а. № 83. С. 8–22.
29. Багров А.В., Смирнов М.А. Методика фотометрических и спектральных наблюдений ИНТ // Научные информации АС АН СССР. 1987б. № 64. С. 15–20.
30. Багров А.В. Перспективы развития наземной сети станций оптических наблюдений // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. С. 272–287.
31. Багров А.В., Выгон В.Г. Оптические наблюдения объектов на геостационарной орбите // Околосземная астрономия (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998а. С. 165–177.
32. Багров А.В., Выгон В.Г. Обнаружение крупных тел в метеорных и болидных потоках оптическими телескопами // Околосземная астрономия (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998б. С. 193–213.
33. Багров А.В., Выгон В.Г., Рыхлова Л.В., Шаргородский В.Д. Исследование состояния аварийного геостационарного спутника по данным фотометрических наблюдений // Околосземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 276–290.
34. Багров А.В. Околосземная астрономия — новая астрономическая дисциплина // Земля и Вселенная. 2001. № 6. С. 3–11.
35. Банников и др. Характер рассеяния света некоторыми видами покрытий ИНТ // Наблюдения ИНТ. 1994. № 88. С. 54.

36. *Барабанов С.И.* Наблюдения крупных тел в метеорных потоках за пределами атмосферы Земли // *Околосземная астрономия (космический мусор)*. — М.: Космосинформ, 1998. С. 214–230.
37. *Барабанов С.И., Неяченко Д.И., Николенко И.В.* Наблюдение метеороидов и элементов космического мусора с оптическими системами на основе ПЗС-камер // *Околосземная астрономия (космический мусор)*. — М.: Космосинформ, 1998. С. 231–244.
38. *Барабанов С.И., Зенькович А.Д., Микиша А.М., Смирнов М.А.* Наблюдения крупных тел в метеорных и болидных потоках // *Околосземная астрономия XXI века*. — М.: Геос, 2001. С. 158–168.
39. *Баранов В.Б.* Где находятся границы Солнечной системы // *Соросовский образовательный журнал*. 2000.
40. *Белошенков А.В., Куприянов В.В., Муртазов А.К.* Создание каталога кривых блеска «типичных» моделей ГСС методом моделирования на ЭВМ // *Наблюдения ИНТ*. 1994. № 88. С. 54.
41. *Бельчанский Г.И.* Экологическая ситуация и проблемы создания глобальной космической системы экологического мониторинга // *Исследования Земли из Космоса*. 1992. № 4. С. 57–65.
42. БИНТИ. 1983. № 2. С. 8.
43. БИНТИ. 1986. № 13. С. 15–16.
44. *Блинников С.И.* Угроза жизни из космоса. — *Astronet.ru*, 19.01.2002. — 5 с.
45. *Божокин С.В.* Свойства космической пыли // *Соросовский образовательный журнал*. 2002. № 12.
46. *Бордовицына Т.В., Дружинина И.В.* Математическое моделирование динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада космического аппарата в околосземном пространстве // *Околосземная астрономия (космический мусор)*. — М.: Космосинформ, 1998. С. 102–117.
47. *Боярчук А.А.* (ред.). Угроза с неба: рок или случайность. — М.: Космосинформ, 1999. — 220 с.
48. *Боярчук А.А., Багров А.В., Микиша А.М. и др.* Астрономический аспект проблемы космической защиты Земли: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 26–27.
49. *Братийчук М.В., Епишев В.П., Мотрунич Я.М.* Исследование формы поверхности спутника «Пагеос» по электрофотометрическим наблюдениям // *Астрономия и астрофизика (Киев)*. 1980. № 40. С. 78–89.
50. *Братийчук М.В. и др.* Исследование кривых блеска ИНТ цилиндрической формы // *Проблемы космической физики (Киев)*. 1981. № 16. С. 105–108.
51. *Братийчук М.В. и др.* Классификация результатов фотометрии ИНТ // *Проблемы космической физики (Киев)*. 1981. № 17. С. 60–62.
52. *Бронштэн В.А.* Гигантские метеориты XX в. // *Природа*. 1999. № 3.
53. *Бронштэн В.А.* Тунгусский метеорит. — М.: А. Д. Сельянов, 2000. — 308 с.
54. *Бруцек А., Дюран Ш.* (Ред.). Солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. — М.: Мир, 1980. — 254 с.
55. *Будыко М.И.* Глобальная экология. — М.: Мысль, 1977. — 327 с.

56. Будыко М.И. Энергетический баланс Земли. — Л.: Гидрометеоздат, 1978.
57. Будыко М.И. Глобальные климатические катастрофы. — М.: Гидрометеоздат, 1986. — 159 с.
58. Бугаенко О.И. и др. Результаты лабораторных фотометрических измерений искусственных планет // *Астрономия и астрофизика* (Киев). 1971. № 14. С. 33.
59. Бугровский В.В. Функциональное математическое моделирование в экологии. — Кызыл, 1997. — 93 с.
60. Бургасов М.П., Надирадзе А.Б. О принципиальной возможности использования солнечных батарей в качестве датчиков частиц космического мусора: Препринт. — М.: МАИ, 2002. — 8 с.
61. Вавилов А.М. Экологические последствия гонки вооружений. — М.: Международные отношения, 1988. — 208 с.
62. Васильев К.А., Шмельцов К.И. Проблемы космической экологии // *Инженерная экология*. 1995. № 6. С. 20–29.
63. Веверка Дж. Фотометрия поверхности спутников // *Спутники планет / Под ред. Дж. Бёрнса*. — М.: Мир, 1980. С. 203–243.
64. Веймарн А.Б., Найдин Д.П., Копаевич Л.Ф. и др. Глобальные катастрофические события и их роль при стратиграфических корреляциях осадочных бассейнов разного типа. — М.: Министерство природных ресурсов, 1998.
65. Велданов В.А. Численная оценка проникания модулей космических аппаратов в астероиды // *Космическая защита Земли. Известия Челябинского научного центра. Спец. выпуск*. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 173–177.
66. Верещагин С.И., Муртазов А.К., Ярошевский С.И. Модели для ожидаемого блеска СКО // *Научно-методические материалы*. — М.: в/ч 03444, 1983. № 1.
67. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. — М., 1991. — 271 с.
68. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. — М.: Рольф, 2002. — 576 с.
69. Вершков А.Н., Григорьев К.В., Киладзе Р.И., Сочилиня А.Е. Модель засорения окрестности геостационарной орбиты фрагментами взорвавшихся спутников // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000. № 18. С. 50–62.
70. Вершков А.Н., Григорьев К.В., Киладзе Р.И., Сочилиня А.Е. Моделирование взрывов на геостационарной орбите и анализ орбитальных элементов // *Околоземная астрономия XXI века*. — М.: ГЕОС, 2001. С. 107–116.
71. Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Панасенко О.А., Суворова А.В. Солнечные циклы в потоках энергии и массы гелиосферной плазмы // *Астрономический журнал*. 1999. Т. 76, № 7. С. 558–560.
72. Витязев А.В. Импакты в ранней и современной истории Земли // *Земля и Вселенная*. 2000. № 2. С. 9–17.
73. Владимирский Б.М., Кисловский Л.Д. Солнечная активность и биосфера. — М.: Знание, 1982. № 4.
74. Власова М.Н., Кричевский С.В. Экологическая опасность космической деятельности. Аналитический обзор. — М.: Наука, 1999. — 240 с.
75. Вокулер Ж. Фотометрия поверхностей планет // *Планеты и спутники / Под ред. А. Дольфюса*. — М.: Мир, 1974. С. 267–366.

76. Волков Г.Н., Куприянов В.В., Муртазов А.К., Остяков В.Г. Автоматизированная система для получения пространственных спектральных индикатрис рассеяния излучения поверхностей // Наблюдения ИНТ. 1994. № 88. С. 53.
77. Волощук Ю.И. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли // Астрономический вестник. 1995. Т. 29. С. 439–449.
78. Вопросы защиты космических аппаратов от метеорных и техногенных частиц // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 105–180.
79. Выгон В.Г., Багров А.В., Грошёв В.Я. Определение формы и ориентации низкоорбитального спутника Ferret-D по данным фотометрических наблюдений // Околосемная астрономия (космический мусор). — М., 1998, Космосинформ. — С. 143–157.
80. Выгон В.Г., Гришин Е.А., Шаргородский В.Д. Использование оптических станций модернизируемой Российской лазерной сети для наблюдения за космическим мусором в околоземном космическом пространстве // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 99–104.
81. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 6. С. 75–81.
82. Герасимов И.А., Мушаилов Б.Р. О проблеме происхождения и динамической эволюции астероидов и комет в Солнечной системе // Околосемная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 17–27.
83. Герелс Т. Фотометрия астероидов // Планеты и спутники / Под. ред. А. Дольфуса. — М.: Мир, 1974. С. 367–430.
84. Гибсон Э. Спокойное Солнце. — М.: Мир, 1977. — 408 с.
85. Гиляров М.С. (Ред.). Биологический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1986. — 831 с.
86. Гиндилис Л.М. Русский космизм и «Живая этика»: взаимосвязь космизм — экология // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. С. 142–147.
87. Голицын Г.С., Гинсбург А.С. Природные аналоги ядерной катастрофы // Климатические и биологические последствия ядерной войны / Под ред. Е.П. Велихова. — М.: Наука, 1987. С. 100–123.
88. Голубева Л.Ф., Шестопалов Д.И., Шкуратов Ю.Г. Сравнительный анализ некоторых оптических характеристик астероидов и Луны // Астрономический журнал. 1980. Т. 57. С. 1047–1065.
89. Горшков В.Г. Пределы устойчивости окружающей среды // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301, № 4. С. 1015–1019.
90. Горшков В.Г., Кондратьев К.Я. Принцип Ле Шателье в приложении к биосфере // Экология. 1990. № 1. С. 7–15.
91. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. — М: ВИНТИ, 1995. — 470 с.
92. Горькавый Н.Н. Проблемы экологии ближнего космоса и оценки эффективности искусственной очистки // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993. С. 142–146.
93. Горяшин В.Е., Еселевич М.В., Караваев Ю.С. и др. Оптикоэлектронный комплекс астрономических средств Саянской обсерватории, его использование для исследования техногенной обстановки в околоземном космическом пространстве: Материалы Международной конференции «Околосемная астрономия XXI века». — Звенигород, 2001.

94. Грибанов В. М., Острик А. В. Воздействие рентгеновского и нейтронного излучения мощного взрыва на астероид // Космическая защита Земли. Известия Челябинского научного центра. Спец. выпуск. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 170–173.
95. Григал П. В., Замышляев Б. В. и др. Оценки изменения загрязнения ближнего космоса фрагментами разрушенного в окрестностях Земли опасного космического объекта: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 85–86.
96. Григорьевский В. М., Колёсник С. Я. Отражение света космическими объектами с регулярной зеркальной поверхностью // Астрономический вестник. 1978. Т. XII. № 2. С. 107–119.
97. Григорьев В. И., Ростовский В. С. О возможности прогнозирования землетрясений поляриметрическим методом // Вестник Московского ун-та. Физика. Астрономия. 2000. № 4. С. 54–57.
98. Григорьев В. М. Современные проблемы солнечной физики и гелиостереоскопические эксперименты. — www.astronet.ru, 2002. — 20 с.
99. Гулак Ю. К. О возможности образования дискретных пылевых поясов вокруг Земли // Астрономический вестник. 1983. Т. XVII. № 4. С. 232–236.
100. Гуревич М. М. Фотометрия. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
101. Демченко Б. И., Диденко А. В. и др. Автоматизация наблюдений подвижных космических объектов. — Алма-Ата: Наука Каз.ССР, 1990. — 160 с.
102. Диденко А. В., Рспаев Ф. К. Многоцветные электрофотометрические наблюдения геостационарного спутника // Астрономический циркуляр. 1984.: № 1333. С. 6–8.
103. Диденко А. В. О стандартизации блеска ИНТ // Труды АФИ АН КазССР. 1984. Т. 44. С. 77–82.
104. Джонсон Т., Пильчер К. Спектрофотометрия и строение поверхности спутников // Спутники планет / Под ред. Дж. Бёрнса. — М.: Мир, 1980. — С. 267–305.
105. Дмитриев А. Н. Новые проблемы исследования необычных явлений окружающей среды // Следы космических воздействий на Землю. — Новосибирск: Наука, 1990. С. 3–22.
106. Дмитриев А. Н. Что происходит на нашей Земле // Сибирский экологический вестник. — Новосибирск, 1995. № 1.
107. Емельянов В. А., Левицкий Ю. Е., Лукьященко В. И. и др. Возможности оптико-электронных средств обнаружения и сопровождения малых опасных астероидов: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 49–50.
108. Емельянов В. А., Лукьященко В. И., Лясота О. В. и др. Способ контроля фрагментов космического мусора на геостационарных орбитах с наклонениями от 0 до 15° с помощью телекамеры, установленной на орбите высотой 34000 км // Околосолнечная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 291–301.
109. Емельянов В. А., Лукьященко В. И., Меркушев Ю. К., Успенский Г. Р. Результаты моделирования наблюдения малых фрагментов космического мусора вблизи ГСО бортовой телекамерой // Околосолнечная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 117–122.
110. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрономия и астрофизика. 1983. № 50. С. 89–101.

111. *Епишев В.П.* Исследование ориентации и поверхности ИНТ методом электрофотометрии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Одесса, 1985.
112. *Жагорин Г.И., Загорских В.И., Тарабара А.В., Тимофеев В.Н.* Система требований по экологической безопасности ракетно-космической техники // Сб. научных трудов ФГУП «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» / Под ред. С.Д. Куликова. — М., 2001. Вып. 3. С. 344–349.
113. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
114. *Железняков А.Б.* Интернет-база данных космических запусков. — www.zabor.com/launch/login.asp.
115. *Заворин А.В., Лебедев В.П. и др.* Потенциальные возможности радара некогерентного рассеяния ИСЗФ СО РАН по исследованию космических объектов // Околосземная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 243–247.
116. *Зайцев А.В.* Некоторые проблемы и последствия создания системы планетарной защиты // Космическая защита Земли. Известия Челябинского научного центра. Спец. выпуск. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 179–182.
117. *Зайцев А.В.* Концептуальный проект системы планетарной защиты «Цитадель»: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 35.
118. *Зайцев А.Л.* Радиолокационные исследования ближнего космоса с Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 79–85.
119. *Зайцев А.Л.* Радиолокационные исследования ближнего космоса с Земли. — www.cplire.ru, 02.12.2002.
120. Закон РФ «О космической деятельности» // Российская газета. 1993. 6 октября.
121. *Застенкер Г.Н., Зелёный Л.М.* Солнечные магнитные облака атакуют Землю. — www.gosaviakosmos.ru, 2003. — 8 с.
122. *Заусаев А.Ф., Пушкарев А.Н.* О вероятности столкновения астероида с Землёй // Астрономический вестник. 1994. Т. 27, № 5. С. 83–87.
123. Звездочёт. 2000. № 3. С. 11.
124. Звездочёт. 2000. № 9. С. 6.
125. *Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Строение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975. — 735 с.
126. *Зоткин И.Т.* Инструкция для наблюдений метеоров // Астрономический календарь. Постоянная часть. — М.: Наука, 1981. С. 377–400.
127. *Иванов-Холодный Г.С.* Солнечная активность и геофизические процессы // Земля и Вселенная. 2000. № 2. С. 30–36.
128. *Ивашкин В.В., Смирнов В.В.* Качественный анализ некоторых методов уменьшения астероидной опасности для Земли // Астрономический вестник. 1993. Т. 27, № 6. С. 46–54.
129. *Ивашкин В.В., Чернов А.В.* Оптимальное изменение орбиты сближающегося с Землёй астероида ударно-кинетическим воздействием космического аппарата: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 79.
130. *Изох Э.П.* Геологические данные о возрасте ударного кратера Жаманшин // Следы космических воздействий на Землю. — Новосибирск: Наука, 1990. С. 176–188.

131. *Израэль Ю. А.* Экология и контроль состояния природной среды. — Л.: Гидрометеиздат, 1979.
132. *Израэль Ю. Н.* Крупномасштабные геофизические и экологические последствия возможной ядерной войны // Климатические и биологические последствия ядерной войны / Под ред. Е. П. Велихова. — М.: Наука, 1987. С. 46–65.
133. *Ипатов С. И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. — М.: Эдиториал УРСС, 2000. — 318 с.
134. *Кагиров Р.* Астероиды изменили облик Земли около 3,9 млрд лет назад. — www.astronet.ru, 11.04.2002a. — 2 с.
135. *Кагиров Р.* Отводить астероиды подальше, изменяя их альbedo. — www.astronet.ru, 16.05.2002b. — 2 с.
136. *Калинин Э. Ю.* Проблема окружающей среды в русской мысли // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. — С. 179–190.
137. *Касименко Т. В., Шематович В. И.* Современные полуэмпирические модели атмосферы // Научные информации Астрономического совета. 1990. № 66. С. 69–85.
138. *Касименко Т. В., Рыхлова Л. В.* Космический мусор на орбитах LEO: анализ роста количества осколков в результате взрывов и разрушений // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. — С. 150–158.
139. *Касименко Т. В., Рыхлова Л. В.* Верхняя атмосфера Земли как чистильщик космического мусора // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. — С. 169–172.
140. *Касименко Т. В., Микиша А. М., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А.* Взрывы на геостационарной орбите // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. — С. 159–168.
141. *Касименко Т. В., Микиша А. М., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А.* Взрывы на околоземных орбитах и их связь с солнечной активностью и потоком метеороидов // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 247–257.
142. *Климов С. И., Родин В. Г., Григорян О. Р.* Изучение и контроль «космической погоды» // Земля и Вселенная. 2000. № 4. С. 9–18.
143. *Клыков Д. Ю., Шанов С. Ю.* Метеорное шоу августа. — Astronet.ru, 13.07.2002. — 5 с.
144. *Киселёв А. И., Медведев А. А., Меньшиков В. А.* Космонавтика на рубеже тысячелетий: итоги и перспективы. — М.: Машиностроение, 2001.
145. *Ковалевский И. В.* Энергетические аспекты солнечно-земных связей. — М.: Наука, 1976. — 52 с.
146. *Козлов А. И.* Радиолокация. Физические основы и проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 5. С. 70–78.
147. *Колёсник С. Я., Григорьевский В. М.* Определение формы Эроса // Астрономический циркуляр. 1978. № 1024. С. 5–8.
148. *Колёсник С. Я., Григорьевский В. М.* Новый метод определения фазового коэффициента асферичных астероидов // Астрономический циркуляр. 1979. № 1043. С. 6–7.
149. *Кононович Э. В., Мороз В. И.* Общий курс астрономии. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 544 с.

150. *Кормилицин В.И., Цицкишвили М.С., Яламов Ю.И.* Основы экологии. — М., 1994.
151. *Коробкин В.И., Передельский Л.В.* Экология. — Ростов-на-Дону: 2000.
152. *Короновский Н.В.* Магнитное поле геологического прошлого Земли // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 5. С. 56–63.
153. *Кочаров Г.Е.* Экспериментальная палеоастрофизика: достижения и перспективы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 11.
154. *Кочаров Г.Е.* Солнечная активность и термоядерная история Солнца за последние миллионы лет // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 1. С. 91–95.
155. *Кочаров Г.Е.* Естественные архивы солнечной активности и термоядерной истории Солнца за последние миллионы лет // Соросовский образовательный журнал. 2002.
156. *Кошелев В.А., Севастьянов В.В., Расновский Ю.В.* Обзор методов противодействия астероидной опасности и их эффективности: Труды Всесоюзного совещания «Астероидная опасность». — СПб.: 1992. С. 102–104.
157. *Кошкин Н.И.* Лабораторное моделирование кривых блеска астероидов // Астрономический вестник. 1988. Т. 22. С. 159–166.
158. *Кравцов Ю.А.* Земля как самоорганизующаяся климато-экологическая система // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 82–87.
159. *Кравцов Ю.А.* Физические аспекты моделирования изменений в климатической системе Земли // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 4. С. 38–44.
160. *Крейнин Л.Б., Григорьева Г.М.* Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации // Итоги науки и техники. Т. 13. — М.: ВИНТИ, 1979. — С. 86–97.
161. *Кричевский С.В.* Космическая деятельность: итоги XX века и стратегия экологизации // Общественные науки и современность. — М., 1999. С. 141–149.
162. *Кряжимский Ф.В., Большаков В.Н., Корюкин В.И.* Человек в свете экологических проблем // Экология. 2001. № 6. С. 403–408.
163. *Кузьминов В.К., Рембеза А.И., Хегай В.М.* Оценка возможности использования малых транспортных космических аппаратов для увода с геостационарной орбиты космических объектов, в том числе крупногабаритных элементов космического мусора // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 187–192.
164. *Куприянов В.В.* Вероятностный подход к решению обратной задачи спектрофотометрии // Наблюдения ИНТ. 1990. № 87. С. 120–127.
165. *Куприянов В.В., Муртазов А.К., Яковенко А.В.* Эйконольная модель спектральных коэффициентов яркости шероховатых диэлектрических поверхностей ИСЗ // Наблюдения ИНТ. 1994. № 88. С. 56.
166. *Курикса А.А., Панов С.Л.* Анализ условий получения радиолокационных изображений искусственных спутников Земли. — www.vimpel.ru, 27.12.2002.
167. *Курт В.Г.* Солнце и межзвёздная среда // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 1. С. 61–66.
168. *Курьшев В.И., Муртазов А.К., Верецагин С.И.* Моделирование фотометрических характеристик астрономических объектов // Известия вузов СССР. Приборостроение. 1985. Т. XXVIII. С. 81–85.

169. *Курьшиев В.И., Муртазов А.К.* Методы расчёта блеска ИКО (обзор) // Рукопись деп. в ВИНТИ «Астрономический вестник». 1986. № 6851. 27 с.
170. *Курьшиев В.И., Муртазов А.К.* Физическое моделирование фотометрических характеристик ИСЗ // Наблюдения ИНТ. 1987. № 83. С. 39–44.
171. *Курьшиев В.И., Муртазов А.К.* Физическое моделирование полей рассеяния ГСС // Наблюдения ИНТ. 1989. № 85. С. 28–32.
172. *Курьшиев В.И., Муртазов А.К.* Физическое моделирование спектральных характеристик астрономических тел // Наблюдения ИНТ. 1990. № 87. С. 103–112.
173. *Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В.* Оптические исследования в космосе. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 255 с.
174. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Статистическая физика. — М.: Наука, 1964. — 568 с.
175. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере и космическая пыль. Метеоры. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 250 с.
176. *Лебединец В.Н.* Пылевое облако Земли и атмосферный кислород // Астрономический вестник. 1991. Т. 25. С. 350–363.
177. *Левантовский В.И.* Механика космического полёта в элементарном выражении. — М.: Наука, 1974. — 487 с.
178. *Лесков Л.В.* Космическое будущее человечества. — М.: ИТАР-ТАСС, 1996.
179. *Лесков Л.В.* Будущее человека: стагнация, гибель или эволюция? // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. С. 56–75.
180. *Лиферов А.П., Муртазов А.К.* Глобальная экология. Земля и Космос // Система непрерывного образования. — Рязань: РИРО, 1998. С. 106–110.
181. *Логинов С.С., Пирогова А.М.* Анализ технических возможностей различных средств получения информации о техногенной обстановке в околоземном космическом пространстве // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 63–69.
182. *Лосев К.С.* Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. — М.: Космосинформ, 2001. — 400 с.
183. *Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н.* Вещество поверхности астероидов // Астрономический вестник. 1991. Т. 25, № 1. С. 5–26.
184. *Макарова Е.А., Харитонов А.В.* Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. — М.: Наука, 1972. — 288 с.
185. *Мартынов Д.Я.* Курс общей астрофизики. — М.: Наука, 1971. — 616 с.
186. *Масуми Ф.Н.* Изменение блеска некоторых стационарных спутников // Научные информации Астросовета АН СССР. 1982. № 55. С. 64–67.
187. *Мешков М.Н.* Радиолокационный комплекс контроля околоземного космического пространства «КОБАЛЬТ-РЛС» // Околоземная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 138–143.
188. *Мещеряков С.А.* К вопросу об оценке опасности орбитальных столкновений в области первого максимума засорённости // Околоземная астрономия (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998. С. 178–183.
189. *Мещеряков С.А.* О проблеме защиты МКС от столкновения с частицами космического мусора // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 302–307.

190. *Мещеряков С. А.* Расчётные методы оценки риска повреждения КА вследствие столкновения с орбитальными частицами и метеороидами // *Околоземная астрономия XXI века.* — М.: ГЕОС, 2001. С. 123–132.
191. *Микиша А. М., Смирнов М. А., Смирнов С. А.* Малоразмерные тела в околоземном космическом пространстве: опасность столкновения с Землёй и возможность предотвращения катастрофы // *Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1995. С. 91–103.
192. *Микиша А. М., Смирнов М. А., Шоломицкий Г. Б.* Наблюдения космического мусора телескопом с геостационарного спутника // *Околоземная астрономия (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1998а. С. 158–164.
193. *Микиша А. М., Смирнов М. А., Шоломицкий Г. Б.* Транспортировка астероида в околоземное космическое пространство // *Околоземная астрономия (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1998б. С. 264–277.
194. *Микиша А. М., Рышлова Л. В., Смирнов М. А.* Загрязнение космоса // *Вестник РАН.* 2001. Т. 71, № 1. С. 26–31.
195. *Микиша А. М., Смирнов М. А.* Выход в космос необходим для устойчивого развития цивилизации // *Земля и Вселенная.* 2000. № 5. С. 91–96.
196. *Михайлец В. М.* Моделирование кривых блеска ИСЗ на ЭВМ // *Рукопись деп. в ВИНТИ УжГУ.* 1982. № 2666.
197. *Мишон В. М.* Практическая геофизика. — Воронеж: Изд. Воронежского ун-та, 1996. — 248 с.
198. *Моисеев Н. Н.* Экология человечества глазами математика — М.: Молодая гвардия, 1988. — 252 с.
199. *Моисеев Н. Н.* Экология в современном мире // *Энергия.* 1996. № 6. С. 8–18.
200. *Мороз Л. В.* О веществе астероидов // *Астрономический вестник.* 1994. Т. 28, № 3. С. 3–22.
201. *Моррисон Д., Моррисон Н.* Фотометрия галилеевых спутников // *Спутники планет / Под ред. Дж. Бёрнса.* — М.: Мир, 1980. С. 403–417.
202. *Мосин А. П.* Регулярное отражение солнечного света выпуклым телом вращения с регулярной поверхностью // *Астрономический циркуляр.* 1986. № 1459. С. 3–5.
203. *Мосин А. П.* Об определении геометрических параметров геостационарного спутника по временным рядам фотометрических наблюдений // *Наблюдения ИНТ.* 1987. № 83. С. 55–58.
204. *Мунин П. И.* Информационный подход в экологии // *Проблемы региональной экологии.* 1999. № 4. С. 5–14.
205. *Мурина Т. А., Нежданова С. Н.* Моделирование оптических характеристик космического мусора // *Столкновения в космическом пространстве (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1995. С. 312–315.
206. *Муртазов А. К.* Измерения спектрального состава излучения, рассеянного покрытиями ГСС // *Наблюдения ИНТ.* 1989. № 85. С. 43–46.
207. *Муртазов А. К., Носова Н. Н., Прокофьева В. В.* Фотометрические измерения яркости геостационарного спутника в полосах В, V, R в момент изменения его ориентации // *Ракетно-космическая техника. Серия 2.* 1991а.

208. *Муртазов А. К., Носова Н. Н., Прокофьева В. В.* Определение ориентации и деталей конструкции геостационарного спутника по фотометрическим измерениям блеска // Ракетно-космическая техника. Серия 2. — 1991б.
209. *Муртазов А. К.* Результаты исследования оптических свойств покрытий ИНТ // Наблюдения ИНТ. 1994. № 88. С. 54.
210. *Муртазов А. К.* Глобальная экология. Оптические свойства материалов, образующих космический мусор // Система непрерывного образования. — Рязань, РИРО, 1998. — С. 111–115.
211. *Муртазов А. К.* Техногенная деятельность в космосе и её воздействие на биосферу: Материалы Международной конференции «Инженерная география. Экология урбанизированных территорий». — Ярославль, 1999. С. 125–129.
212. *Муртазов А. К.* Проблема космического мусора и его воздействия на природу // Рациональное природопользование в условиях техногенеза. — М.: Институт экологии, лингвистики и права, 2000а. С. 64–70.
213. *Муртазов А. К.* Оптические свойства поверхностей ИКО и техногенных отходов в космосе // Околосолнечная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000б. С. 262–268.
214. *Муртазов А. К.* Информационный подход к экологии околосолнечного пространства: Материалы Международной конференции «Околосолнечная астрономия XXI в.». — Звенигород, 2001а. С. 74–75.
215. *Муртазов А. К.* Экология околосолнечного космического пространства. 1. Взаимодействие с биосферой // Экологический анализ окружающей среды в целях её рационального использования и прогноза измерений. Монография / Под ред. А. В. Хабарова. — М.: ГУЗ, 2001б. С. 173–183.
216. *Муртазов А. К., Идеи В. И.* Вернадского и проблемы экологии околосолнечного космического пространства: Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Панорама философской мысли в России XX века». — Рязань: РГПУ, 2001в. С. 135–137.
217. *Муртазов А. К.* Космическая деятельность человечества как возможность выхода из глобального экологического кризиса: Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Панорама философской мысли в России XX века». — Рязань: РГПУ, 2001г. С. 127–128.
218. *Муртазов А. К.* Околосолнечное космическое пространство и проблемы охраны окружающей среды. — Рязань: РГПУ, 2001д. — 146 с.
219. *Муртазов А. К.* Загрязнённость околосолнечного пространства в период действия метеорных потоков: Материалы Международной конференции «Околосолнечная астрономия 2003». — Терскол, 2003. — 1 с.
220. *Назаренко А. И.* Построение высотно-широтного распределения объектов в околосолнечном космическом пространстве // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993а. С. 92–100.
221. *Назаренко А. И.* Моделирование эволюции распределения техногенных частиц и объектов // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993б. С. 114–126.
222. *Назаренко А. И., Чернявский Г. М.* Моделирование загрязнения космического пространства // Столкновения в околосолнечном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. С. 104–129.
223. *Назаренко А. И.* Моделирование техногенного загрязнения околосолнечного космического пространства // Околосолнечная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 80–91.

224. Назаренко А. И., Юрасов В. С. Моделирование техногенного загрязнения области геостационарных орбит // Околосемная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 92–97.
225. Назарова Т. Н. Микрометеоритное вещество вблизи Земли // Пыль в атмосфере и околосемном космическом пространстве. — М.: Наука, 1973. С. 8–13.
226. Немчинов И. В., Попов С. П., Тетерев А. В. Оценка характеристик волн и цунами, вызванных падением астероидов и комет в океаны и моря // Астрономический вестник. 1994. Т. 28, № 3. С. 81–99.
227. Немчинов И. В. и др. Численное моделирование столкновения астероида с Землей // Астрономический вестник. 1994. Т. 28, № 4. С. 81–99.
228. Нечай В. З., Ногин В. Н., Петров Д. В. и др. Ядерный взрыв вблизи поверхности астероидов и комет // Космическая защита Земли. Известия Челябинского научного центра. Спец. выпуск. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. С. 179–182.
229. Новиков Л. С., Петров Н. Н., Романовский Ю. А. Экологические аспекты космонавтики. — М.: Знание, 1986.
230. Новиков Л. С., Романовский Ю. А. Антропогенные воздействия на околосемную среду // Инженерная экология. 1999. № 3. С. 11–21.
231. Носова Н. Н. Анализ результатов ТВ-фотометрии ГСС с привлечением метода физического моделирования // Наблюдения ИНТ. 1990. № 86. С. 48–61.
232. Обрубов Ю. В. Взаимосвязь астероидов, комет и метеорных потоков // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 2. С. 107–112.
233. Обрубов Ю. В. Происхождение и эволюция метеорных роев // Соросовский образовательный журнал.
234. Олейников Ю. В., Шаталов А. Т. Стратегия выживания человечества // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. С. 148–153.
235. Онищенко Е. Е. Космические лучи и озоновые дыры. — www.scientific.ru, 16.01.2001.
236. Онищенко Е. Е. Роль случайности в закономерности изменений климата. — www.scientific.ru, 14.01.2002.
237. Онищенко Е. Е. Солнце во льдах. — www.scientific.ru, 2.12.2003.
238. Ораевский В. Н., Кузнецов В. Д. Солнечно-земная физика и фундаментальные космические исследования. — www.rosaviakosmos.ru.
239. Организация Объединённых Наций. Третья конференция ООН по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях (ЮНИСПЕЙС-III). А/conf.184/3. Апрель 1999. — 80 с.
240. Орлёнок В. В. Основы геофизики. — Калининград, 2000. — 446 с.
241. Ортенберг Ф. С., Трифионов Ю. М. Озон: взгляд из космоса. — М.: Знание, 1990. — 64 с.
242. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. — М.: Энергия, 1974.
243. Перов С. П. Почему меняется климат Земли: гипотеза солнечно-атмосферного резонанса // Интернет-журнал «Ломоносов». 2001. — 4 с.
244. Петров К. М. Общая экология. — СПб.: 1997.
245. Петрукович А., Зелёный Л. В объятиях Солнца // Наука и жизнь. 2001а. № 7.
246. Петрукович А., Зелёный Л. У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь. — 2001б. № 10. С. 57–62.

247. *Подгорный И.М.* Процессы на Солнце и их влияние на тела в Солнечной системе // *Околоземная астрономия XXI века.* — М.: ГЕОС, 2001. С. 380–387.
248. *Поляхова Е.Н.* Роль светового давления в астрономии и космических исследованиях // *Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1995. С. 173–251.
249. *Поляхова Е.Н.* Радиационная коррекция — практический метод воздействия на орбиту малоразмерного астероида, сближающегося с Землёй: *Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000».* — Евпатория. 2000. С. 77–78.
250. *Пригожин И.* Конец определённости. Время, хаос и новые законы природы. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. — 208 с.
251. *Протасов В.Ф., Молчанов А.В.* Словарь экологических терминов и понятий. — М.: Финансы и статистика, 1997. — 160 с.
252. А.М. Прохорова (Ред.). *Физический энциклопедический словарь.* — М.: Советская энциклопедия, 1983. — 928 с.
253. *Пудовкин М.И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // *Соросовский образовательный журнал.* 1996. № 10. С. 106–113.
254. *Пудовкин М.И.* Солнечный ветер // *Соросовский образовательный журнал.* 2000.
255. *Пудовкин О.Л.* Методологические основы системного анализа техногенной космической обстановки // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. № 18. С. 20–39.
256. *Пэнгл Р.* Методы системного анализа окружающей среды. — М.: Мир, 1979. — 214 с.
257. *Радзиевский В.В.* Фотогравитационная небесная механика. — Н. Новгород: Издатель Ю.А. Николаев, 2003. — 196 с.
258. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование. Словарь-справочник. — М.: Мысль, 1990. — 637 с.
259. *Рембеза А.И., Хегай В.М.* Оценка возможности использования малых транспортных космических аппаратов для увода с геостационарной орбиты космических объектов, в том числе крупногабаритных элементов космического мусора // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. № 18. С. 187–192.
260. *Ржига О.Н., Зайцев О.Л.* Возможности радиолокационного комплекса Центра дальней космической связи под Евпаторией по исследованию загрязнения космического пространства // *Околоземная астрономия (космический мусор).* — М., 1998. С. 118–127.
261. *Розаев А.Е.* О возможных родительских телах метеоритов Иннисфри, Лост Сити и Пршибрам // *Астрономический вестник.* 1994. Т. 28, № 6. С. 119–122.
262. *Румынский А.Н., Сазонов В.С.* Использование сильного взрыва для защиты Земли от астероидно-кометных тел // *Космонавтика и ракетостроение.* 2000. № 18. С. 206–212.
263. *Рыхлова Л.В.* Проблема заселённости космоса объектами искусственного происхождения // *Проблема загрязнения космоса (космический мусор).* — М.: Космосинформ, 1993. С. 7–21.

264. Рыхлова Л.В. Исследования загрязнённости околоземного пространства // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. С. 9–18.
265. Рыхлова Л.В. Проблемы околоземной астрономии // Околоземная астрономия. (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998. С. 8–16.
266. Сазонов В.С., Дмитриев Е.В. О предотвращении столкновения с Землёй опасных тел кометной природы с помощью инициирования на их поверхности эффекта сублимации // *Астрономический вестник*. 1998. Т. 32. С. 380–391.
267. Сазонов В.С. Проблема астероидно-кометной опасности и пути её решения // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000а. № 18. С. 193–205.
268. Сазонов В.С. О возможностях и практической реализации сублимационного способа уменьшения кометной опасности для Земли // *Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы*. — М.: Космосинформ, 2000б. С. 180–187.
269. Сватков Н.М. Основы планетарного географического прогноза. — М.: Мысль, 1974.
270. Светашкова Н.Т. Модель распределения спорадических метеороидов в околоземном пространстве // *Астрономический вестник*. 1994. Т. 28, № 6. С. 111–118.
271. Семёнов Ю.П., Баканов Ю.А., Синявский В.В. и др. Результаты исследований возможной роли ядерных энергетических и двигательных установок в решении проблемы защиты Земли от астероидной опасности: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 68–69.
272. Серафимов К. Глобальное экологическое воздействие через ближний космос // *Спис. Бълг. АН.* — София. 1991. Т. 37, № 2. С. 14–18.
273. Сивков С.И. Методы расчёта характеристик солнечной радиации. — Л.: Гидрометиздат, 1968.
274. Симоненко В.А. Космические столкновения как фактор эволюции и опасность для цивилизации. Возможности их предотвращения: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 25.
275. Симонов И.В. О целесообразности использования космических техногенных отходов для уменьшения астероидно-кометной опасности // *Доклады РАН*. 1997. Т. 355, № 2. С. 196–199.
276. Симонов И.В. Оценки ударной волны и фрагментации от большого удара: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли — 2000». — Евпатория, 2000. С. 87.
277. Смирнов М.А., Микиша А.М., Касименко Т.В., Рыхлова Л.В. Космический мусор и взрывы на околоземных орбитах // *Околоземная астрономия XXI века*. — М.: ГЕОС, 2001. С. 98–106.
278. Смирнов В.М., Семёнов А.С., Ребриков В.Н. Исследования метеорных и техногенных тел на станциях «Салют» и «Мир»: Материалы Международной конференции «Околоземная астрономия XXI в.». — Звенигород. 2001.
279. Снытко В.А., Семёнов Ю.М. Развитие учения о геосистеме // *География и природные ресурсы*. — Новосибирск, 1997. № 3. С. 17–23.

280. *Сокольский А. Г.* Об организации работ в СССР по программе «Астероидная опасность» и планы международного сотрудничества: Труды Всесоюзного совещания «Астероидная опасность». — СПб, 1992. С. 18–22.
281. *Солодов А. В.* (ред.). Инженерный справочник по космической технике. — М.: Воениздат, 1977. — 430 с.
282. *Стенчиков Г. Л.* Климатические последствия ядерной войны: численные эксперименты с гидродинамической моделью климата ВЦ АН СССР // Климатические и биологические последствия ядерной войны / Под ред. Е. П. Велихова. — М.: Наука, 1987. С. 66–99.
283. *Степановских А. С.* Общая экология. — М.: Юнити, 2000.
284. *Стожков Ю. И.* Космические лучи в атмосфере Земли // Интернет-журнал «Ломоносов». 2001. Ноябрь. — 4 с.
285. *Страйжис В. Л.* Фотометрические системы // Методы исследования переменных звёзд. — М.: Наука, 1971. С. 225–278.
286. *Стулов В. П.* Особенности движения крупных метеоритов в атмосфере // Околосземная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 338–347.
287. *Сывороткин В. Л.* Дегазация Земли разрушает озоносферу // Земля и Вселенная. 1998. № 1. С. 21–27.
288. *Сюняев Р. А.* (Ред.). Физика космоса. Маленькая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1986. — 783 с.
289. *Тарко А. М.* Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье // ДАН. 1995. Internet, 2000. — 4 с.
290. *Тауц Я.* Оптические свойства полупроводников. — М.: Мир, 1967.
291. *Тверской П. Н.* Курс геофизики. — Л.-М., 1936. — 654 с.
292. Техносфера и биосфера: социально-философские и политические аспекты взаимосвязи (материалы круглого стола) // Вестник Московского университета. Сер. 12. 1997. № 1. С. 3–41.
293. *Тирский Г. А.* Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 5. С. 76–82.
294. *Тирский Г. А.* Столкновение кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 5. С. 63–69.
295. *Тирский Г. А., Ханукаева Д. Ю.* Модель взаимодействия космических тел с неизотермической атмосферой // Околосземная астрономия XXI века. — М.: ГЕОС, 2001. С. 367–378.
296. *Томанов В. П., Кузьмин С. В., Аксеновский А. Г.* Захват межзвёздных комет // Астрономический вестник. 1994. Т. 28, № 2. С. 83–94.
297. *Трёшников А. Ф.* (Ред.) Географический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 432 с.
298. *Уманский С.* Ракеты-носители. Космодромы. — М.: Рестарт+, 2001.
299. *Уральская В. С.* Объекты внешней области Солнечной системы // Астрономический календарь-2000. — М.: Космосинформ, 1999. С. 186–193.
300. *Урсул А. Д., Урсул Т. А.* На пути к «устойчивому» освоению Вселенной // Земля и Вселенная. 1996. № 1. С. 39–46.
301. Федеральный закон «О внесении дополнений и изменений в Закон Российской Федерации „О космической деятельности“» // Российская газета. 1996. 10 декабря.
302. *Фёдоров В. Д., Гильманов Т. Г.* Экология. — М.: МГУ, 1980. — 464 с.
303. *Фёдоров В. М.* Космический аспект учения о биосфере // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. С. 116–123.

304. Физика космического пространства. Космическая экология. — МГУ: НИИЯФ, 1997. — Space Physics Environment. — www.scil.sinp.msu.ru.
305. *Фортос В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф. и др.* Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером: Что мы увидели // УФН. 1996. Т. 166, № 4. С. 391–422.
306. *Хабаров А.В., Градусов Б.П., Чупахин В.М., Козелкина З.В.* Научные основы программы «Экологическое возрождение России» // Антропогенное загрязнение природной среды и пути её оптимизации. — М., 1996. С. 3–18.
307. *Хабаров А.В.* (Ред.). Экологический анализ окружающей среды в целях её рационального использования и прогноза измерений. Монография. — М.: ГУЗ, 2001. — 361 с.
308. *Хуторовский З.Н.* Перспективные методы исследования антропогенного загрязнения ближнего космоса // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993. С. 32–46.
309. *Хуторовский З.Н., Каменский С.Ю., Бойков В.Ф., Смелов В.Л.* Риск столкновения космических объектов на низких высотах // Столкновения в околоземном пространстве. — М.: Космосинформ, 1995. С. 19–90.
310. *Хуторовский З.Н., Бойков В.Ф., Пылаев Л.Н.* Контроль космических объектов на низких высотах // Околоземная астрономия (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1998. С. 34–101.
311. *Цицин Ф.А.* Проблемы изучения кометно-астероидного материала за орбитой Юпитера // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: Космосинформ, 2000. С. 28–42.
312. *Черняев А.М.* Биосферно-экологический менталитет XXI века // Проблемы региональной экологии. 1999. № 3. С. 5–21.
313. *Чугунов Н.И.* Озоновый слой и миф об опасности из космоса // Наука и жизнь. 2000. № 9. С. 14–16.
314. *Чурюмов К.И.* О проблемах кометно-астероидной угрозы для человеческой цивилизации: реалии и спекуляции: Материалы Всероссийской конференции «Современная астрономия и методика её преподавания». — СПб, 2002а.
315. *Чурюмов К.И.* Природа комет // Одесский астрономический календарь — 2003. — Одесса. Астропринт, 2002б. С. 135–149.
316. *Шевченко В.В.* Современная селенография. — М.: Наука, 1980. — 288 с.
317. *Шематович В.И.* Математическое моделирование процессов образования и эволюции техногенных частиц в окружающем космическом пространстве // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993. С. 105–113.
318. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. — М.: ИЛ, 1963. — 452 с.
319. *Шестака И.С.* Комплексы малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. — 1994а. Т. 28, № 6. С. 70–82.
320. *Шестака И.С.* Астероидно-метеорные комплексы // Астрономический вестник. — 1994б. Т. 28, № 6. С. 83–93.
321. *Шестака И.С.* Комплекс метеоритообразующих тел (Иннисфри-Ридждейл) // Астрономический вестник. — 1994в. Т. 28, № 6. С. 94–100.
322. *Шингарева К.Б.* Полигоны, космодромы, космопорты. — www.1september.ru, 2000.

323. *Шифрин Г.А.* Альтернатива использования лазеров для ликвидации загрязнения геостационарной орбиты космическим мусором: Материалы 3 Международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». — Рязань, 2000. С. 236–237.
324. *Шкловский И.С.* Вселенная. Жизнь. Разум. — М.: Наука, 1987. — 320 с.
325. *Шкловский И.С.* Сверхновые звёзды. — М.: Наука, 1976. — 440 с.
326. *Школенко Ю.А.* Расширяющаяся планета // Стратегия выживания: космизм и экология. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. С. 76–87.
327. *Шоломицкий Г.Б.* Инфракрасное небо и космические исследования // Земля и Вселенная. 1994. № 1.
328. *Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции. — М.: УРСС, 2001. — 328 с.
329. *Яглом А.М., Яглом И.М.* Вероятность и информация. — М.: Наука, 1973. — 511 с.
330. *Adushkin V. V., Nemchinov I. V.* Consequences to Impacts of Cosmic Bodies on the Surface of the Earth // Hazards Due to Comets and Asteroids / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London: University of Arizona Press, 1994. P. 721–778.
331. *Agle D. C., Savage D.* Earth&Asteroid Play Orbital Cat and Mouse Game // Near-Earth Object Program. — www.nasa.gov, 2003.02.01. — 3 p.
332. *Ambrosio V., Burchi R. et al.* Laboratory Photometry of Asteroids and Atmosphereless Bodies // Astronomy. & Astrophysics. 1985. V. 44. P. 427–430.
333. *Anz-Meador P.* HAPS Debris Separation Velocity Distribution // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Issue 2. — 3 p.
334. Aurora Viewing Tips. — www.sec.noaa.gov.
335. *Bagrov A. V., Perov N.I.* On a Problem of Searching for Galactic Meteors: Proceedings of International Conference «Astronomy and Geodesy in New Millenium». — Kazan, 2001. P. 49–53.
336. *Barucci M.A., Fulchignoni M.* The Dependence of Asteroid Light Curves on the Orientation Parameters and Shapes of Asteroids // Moon and Planets. — 1984. V. 27. P. 47–57.
337. *Barucci M.A., Fulchignoni M., Salvatori R.* Asteroid Photometry Simulated in the Laboratory: Phase Functions of Some Meteorites Used as Irregular Asteroid Models // Lunar and Planetary Sciences. 1984. V. 15. P. 35–36.
338. *Barucci M.A., Fulchignoni M.* A Pre-Galileo View of Asteroid 29 Amphitrite // Lunar and Planetary Sciences. 1985. V. 15. P. 33–34.
339. *Barucci M.A., Doressoundiram A., Tholen D. et al.* Spectrophotometric Observations of Edgeworth-Kuiper Belt Objects // Icarus. 1999. V. 142. P. 476–481.
340. *Belkovich O.I.* Is the Problem of Sporadic Meteoroids Space Distribution Solving Correct?: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
341. *Belkovich O.I., Bagautdinova A.R.* Expected Distribution of Interstellar Meteoroids in the Vicinity of the Earth's Orbit: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
342. *Benitez N., Maiz-Apellaniz J., Canelles M.* Evidence for Nearby Supernova Explosions // Physical Review Letters. V. 88. P. 081101. 2002.

343. *Bernhard R.P., Christiansen E.L., Kerr J.H.* Space Shuttle Meteoroid and Orbital Debris Impact Damage // Science and Technology Series. Space Debris. 2000. V. 103. P. 29–34.
344. *Bland P.A., Artemieva N.A.* Efficient disruption of small asteroids by Earth's atmosphere // Nature. 2003. V. 424. P. 288–290.
345. *Brand K.W., Spagnolo F.A.* Lambert Diffuse Reflection From General Quadric Surfaces // Journal of Optical Society of America. 1967. V. 57. P. 452–457.
346. *Buratti B.J., Veverka J.* Photometry of Rough Surfaces. Role of Multiple Scattering // Icarus. 1985. V. 61. P. 320–328.
347. *Cappelary J.O., McLaughlin W.I.* Telescopic Observations of Lunar Missions // Space Flight. 1971. V. 13. P. 363–367.
348. *Carusi A. et al.* Near-Earth Objects: Present Search Programs // Hazards Due to Comets and Asteroids / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London: University of Arizona Press, 1994. P. 129–135.
349. *Chapman C.R.* Interpretation of Spectra for 277 Asteroids // Meteoritics. 1979. V. 24. P. 364–379.
350. *Chapman C.R., Morrison D.* Cosmic Catastrophes. — N.Y.: Plenum Press, 1989. — 302 p.
351. *Chapman C.R., Morrison D.* Impact on the Earth by Asteroids and Comets: Assessing the Hazard // Nature. 1994. V. 367. P. 33–40.
352. *Christiansen Eric L.* International Space Station. Meteoroidal / Orbital Debris Shielding // Cosmonautics and Rocket Engineering. 2000. № 18. P. 166–180.
353. *Clark Phillip S.* Space Debris Incidents Involving Soviet / Russian Launches // British Interplanetary Society's Soviet Astronautics Meeting. — 1994. June, 4. — 15 p.
354. Closest Approaches to the Earth by Minor Planets. — www.harvard.edu, 2001.
355. *Cornilleau-Wehrlin N.* // Science. 2001. V. 291. P. 1466.
356. *Ekstrand V., Drolshagen G.* Comparison of Meteoroid and Space Debris Fluxes to Spacecraft in Earth Orbit: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
357. *Emmons R.H., Rogers C.L., Preski R.L.* Photometric Observations of Artificial Satellites for Determining Optical and Physical Characteristics // The Astronomical Journal. 1967. V. 72. P. 939–944.
358. First Satellite Breakup of 2000 // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Issue 2. — 1 p.
359. *Flury W.* Collision Probability and Spacecraft Disposition in the Geostationary Orbit // Adv. Space Res. 1991. V. 11, № 12. P. 67–79.
360. *Frank L., Sigwarth J.B., Yeates C.M.* A Search for Small Solar-System Bodies Near the Earth Using a Ground-Based Telescope // Astronomy & Astrophysics. 1990. V. 228. P. 522–530.
361. *Freitas R.A., Valdes F.* A Search for Objects Near the Earth-Moon Lagrangian Points // Icarus. 1983. V. 53. P. 453–477.
362. *French B.M.* Traces of Catastrophe. — Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. — 120 p.
363. *Frolich C., Lean J.* Solar Constant // Geoph. Res. Let. 1998. V. 25. P. 4377–4380.

364. *Giles A. B., Hill K. M.* Optical Observations of Geostationary Spin-Stabilities Satellites // *Astronomy and Space Science*. 1988. V. 147.
365. *Goldstein R. M., Goldstein S. J.* Flux of Millimetric Space Debris // *The Astronomical Journal*. 1995. № 110. P. 1392–1396.
366. *Granitsky L. V., Cheremisin A. A., Bartenev V. A., Il'inykh A. M.* Monitoring of Space Debris in the UV Spectral Range // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 1998. V. 11. Issue 12. P. 1142–1146.
367. *Grun A. F., Zook H. A., Fechtig H., Giese R. H.* Collisional Balance of the Meteoritic Complex // *Icarus*. 1985. V. 62. P. 224–227.
368. *Guilamnon J. C.* New Space Paints // 3rd Eur. Symp. Spauer Mater. Space Envir. — Noordwijk, 1985. 1–4 Oct. Proc. — Paris, 1985. P. 939.
369. *Hamilton C.* Terrestrial Impact Craters. — www.iki.rssi.ru/solar/eng/tercrate.htm, 2003.
370. *Hapke B. H.* A Theoretical Photometric Function for the Lunar Surface // *Journal of Geophysical Research*. 1963. V. 68. P. 4571–4586.
371. *Hauglustaine D., Gerard J. C.* Energy for Optical Atmospheric Screen // *Annals for Geophysics*. 1990. V. 8, № 2. P. 87–90.
372. Impact Cratering on Earth // *Earth Impact Database*. — 10.03.2003.
373. Intergovernmental Panel of Climate Change, *Climate Change 1995* / Ed. by J. T. Houghton et al. — Cambridge University Press, 1995.
374. *Irvine W. M.* The Shadow Effect of Diffuse Reflection // *Journal of Geophysical Research*. 1966. V. 71. P. 2931–2937.
375. *Jackson A., Bernhard R.* Large Solid Rocket-Matter Particle Impact on Shuttle: Proceedings of Seventh International Space Conference of Pacific-Basin Society. — Nagasaki, 1997.
376. *Jenniskens P.* Meteor Stream Activity — II. Meteor Outbursts // *Journal of Astronomy and Astrophysics*. 1995. V. 295. P. 206–235.
377. *Keller G., Adatte T., Stinnesbeck W. et al.* Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. - March 2, 2004. - 10.1073.
378. *Kessler D. J. et al.* A Computer Based Orbital Debris Environment Model for Spacecraft Design and Observations in Low Earth Orbit // *NASA Technical Memorandum 104825*. 1996.
379. *Khavroshkin O. B., Tsyplakov V. V.* Meteoroid Stream Impacts on the Moon: Information of Duration of Seismograms: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
380. *Kissel K. E.* Diagnosis of Spacecraft Properties and Dynamical Motions by Optical Properties // *Space Research*. 1969. V. 9. P. 53.
381. *Kokarts G.* Effects of Solar Variations on the Upper Atmosphere // *Solar Physics*. 1981. V. 74. N. 2. P. 295–320.
382. *Kruchynenko V. G.* Thermal Explosions of Meteoroids in the Earth's Atmosphere: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
383. *Lanczi E. R.* Photometry of Precessing Torses // *Journal of Optical Society of America*. 1966. V. 56. P. 873–877.
384. *Lanczi E. R.* Photometry of Precessing Cylinders // *Journal of Optical Society of America*. 1967. V. 56. P. 202–206.
385. *Larimer J. W.* Meteorites: Relics From the Early Solar System // *The Origin of the Solar System* / Ed. by S. F. Dermot. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1976. P. 347–394.

386. *Leeman W.P.* Impacts with Space Debris. 1997.
387. *Liemohn H.B.* Optical Tracking of Deep-Space Probes // *Icarus*. 1968. V. 9. P. 217–220.
388. *Liemohn H.B.* Optical Observations of Apollo-8 // *Sky and Telescope*. 1969. V. 37. P. 156–160.
389. *Lindblad B.A.* Visual and Radar Observations of the Perseid Meteor Stream 1953–83: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
390. *Lu Q.-B., Sanche L.* // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87.
391. *Lui J.X., Marsden B., Jewitt D.C. et al.* A new dynamical class in the outer Solar System // *Bulletin of American Astronomical Society*. 1997. V. 29. P. 1020.
392. *Mattews M.S.* The Asteroid Conference in Tucson // *Sky and Telescope*. 1971. V. 42. P. 22–24.
393. *McBride M.* The Importance of the Annual Meteoroid Streams to Spacecraft and Their Detectors // *Advances of Space Research*. 1997. V. 20. P. 1513–1516.
394. *McCue G.A., Williams J.G., Morford J.M.* Optical Characteristics of Artificial Satellites // *Planet. Space Sci.* 1971. V. 19. P. 851.
395. *Melosh H.J., Nemchinov I.V., Zetzer Yu.I.* Non-Nuclear Strategies for Deflecting Comets and Asteroids // *Hazards due to comets and asteroids* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London. University of Arizona Press, 1994. P. 56.
396. *Morrison D., Chapman C.R., Slovic P.* The Impact Hazard // *Hazards due to comets and asteroids* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London: University of Arizona Press, 1994. P. 59–91.
397. *Murray N., Weingartner J.C., Capobianco P.* On the Flux of Extra-Solar Dust in Earth's Atmosphere. — astro-ph/0309805. 29 Sep 2003. V. 1. — 62 p.
398. *Murtazov A.K.* Physical Basis of Circumterrestrial Space Ecology: Proceedings of International Conference «Astronomy and Geodesy in New Millenium». — Kazan, 2001. P. 217.
399. *Murtazov A.K.* Ecology and Circumterrestrial Space // *Astronomical&Astrophysical Transactions*. 2003a. V. 22. P. 651–656.
400. *Murtazov A.K.* Identification of Circumterrestrial Space Natural and Technogenic Debris by Its Optical Properties: Proceedings of International Conference «Comets, Asteroids, Meteors, Meteorites, Astroblemes, Craters» / Ed. by Prof. K.I. Churyumov. — Vinnytsia, 2003b. P. 325–328.
401. NASA's Near-Earth Object Programm. — www.neo.jpl.nasa.gov.
402. *Oberg J.E.* Minuteman Third Stage Destroyed by Space Debris // *Space News*. 1998. V. 9–7. P. 344 (1998).
403. *Oetking P.* Photometric Studies of Diffuse Reflecting Surfaces with Applications to the Brightness of the Moon // *Journal of Geophysical Research*. 1966. V. 71. P. 2505–2513.
404. *Orbital Debris*. National Academic Press. — Washington D.C., 1995.
405. *Orbital debris Quarterly News*. A Publications of the Orbital Debris Program Office. — NASA Johnson Space Center. Houston, Texas 77058.
406. *Ostro S.J.* Asteroid Radar Research. — www.echo.jpl.nasa.gov, 2002. — 2 p.
407. *Perov N.I.* Migration of Comets in Gravitational Fields of the Galaxy, the Sun, the Planets and Their Satellites: Proceedings of International Conference «CAMMAC-2002». — Vinnytsia, 2002a. P. 47.

408. *Perov N.* The Universal Model of Migration of Comets: Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors Conference (ASM 2002, 29 July-2 August 2002, Technical University Berlin). — Berlin, 2002b. P. 375–379.
409. *Phipps C.* Laser Deflection of NEOs: Proc. Near-Earth-Object Interception Workshop. — Los Alamos, 1992. P. 256–260.
410. *Pierrazzo E.* // *New Scientist*. 1997. V. 155.
411. *Plane J.* The Impact of Extra-terrestrial Dust on the Upper Atmosphere: Abstracts of International Conference «Meteoroids 2001». — Sweden: Kiruna, 2001.
412. *Pope G.G.* Structural Materials in Aeronautics: Prospects and Perspectives // *Z. Flugwiss. und Weltraumforsch.* 1985. V. 9. P. 269.
413. *Portree D.S.F., Loftus J.P.* Orbital Debris and Near-Earth Environmental Management: A Chronology // *NASA Reference Publications*. — on 1320. Dec. 1993.
414. Potentially Hazardous Asteroids Close Approaches To The Earth. 2001–2178. — www.harvard.edu, 2001.
415. Program "For Environmental Safety of Rocket and Space Activity». — Socio-Ecological Union, 2000. — 16 p.
416. *Preski R.G.* Determining of Optical Properties of Artificial Satellites by Passive Ground-Based Photometry // *IAAA Paper*. 1968. № 742. P. 109.
417. *Rabinowitz D.L., Bowell E., Shoemaker E.M., Muinonen K.* The Population of Earth-Crossing Asteroids // *Hazards due to comets and asteroids* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London: University of Arizona Press, 1994. P. 285–312.
418. *Raymond S.N., Fraser O.J.* A Strategy for Finding Near Earth Objects with the SDSS Telescope // *astro-ph/0401438*. 2004. — 12 p.
419. *Rambauske W.R., Gruenzel R.R.* Distribution of Diffuse Optical Reflection Around Some Stereometric Surfaces // *Journal of Optical Society of America*. 1965. V. 55. P. 315.
420. *Raup D., Sepkoski J.*: Proceedings of the National Academy of Science USA. 1984. V. 81. P. 801–805.
421. *Rex M., Salawitch R.J., von der Gathen P. et al.* Arctic ozone loss and climate change // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31.
422. *Roberts G.* The Optical Appearance of Artificial Satellites // *Monthly Notices of Astronomical Society of South Africa*. 1965. V. 29. P. 129–139.
423. *Rossi A.* Collision risk with space debris in Low Earth Orbit: Abstracts of International Conference CELMEC III. — Italy: Monte Porzio Catone, 2001.
424. *Schildknecht T., Musci R., Ploner M. et al.* Optical Observation of Space Debris in the Geostationary Ring: Third European Conference on Space Debris. — Germany, Darmstadt, 2001.
425. *Science*. 1999. V. 286. P. 2319.
426. Solar Power Conversion Systems // *Space Power*. 1986. V. 6. P. 11.
427. Space Environment Center Web Pages. — www.sec.noaa.gov.
428. *Takute R., Matsuda S.* Development of New Solar Cells and Their Satellite Applications // *Space Commun. and Broadcast*. 1986. V. 4. P. 101–119.
429. *Tedesco E.F., Williams J.G., Matson D.L., Veeder G.J.* A Three-Parameter asteroid Taxonomy // *The Astronomical Journal*. 1989. V. 97, № 2. P. 580–606.
430. *The Origin of the Solar System* / Ed. by S.F. Dermot. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1979. — 668 p.

431. *Theall J., Christiansen E., Johnson N. et al.* Meteoroid and Orbital Debris Protection: Achievable Protection Levels for Space Stations in LEO // *Orbital Debris Quarterly News*. 1998, December. — 1 p.
432. Today's Ozone from Earth Probe TOMS. — www.sec.noaa.gov.
433. *Toon O.B., Zahnle K. et al.* Environmental Perturbations Caused by Asteroid Impacts // *Hazards Due to Comets and Asteroids* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson-London: University of Arizona Press, 1994. P. 791–826.
434. *Tousey R.* Optical Problems of the Satellites // *Journal of Optical Society of America*. 1957. V. 47. P. 261–267.
435. *Usoskin I.G., Solanki S.K., Schuessler Manfred et al.* A Millennium Scale Sunspot Number Reconstruction: Evidence For an Unusually Active Sun Since the 1940's // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91. P. 211101. — 4 p.
436. *Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System* / Ed. by H. Rickman, M.J. Valtonen — Dordrecht etc.: Kluwer Acad. Publ., 1996. — 508 p.
437. *Yeates C.M.* Initial Finding From a Telescopic Search for Small Comets Near Earth // *Planet. Space Sci.* 1989. V. 37. P. 1185–1196.
438. *Yurasov V.S.* Classification and Identification of Geostationary Space Objects by Using Coordinate and Photometric Observations // *Fourth US / Russian Space Surveillance Workshop*. — US Naval Observatory. Washington DC. Oct. 2000.