

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Б.И. Лучков

НАША ЗВЕЗДА

*Рекомендовано к изданию УМО
«Ядерные физика и технологии»*

Москва 2007

УДК 523.9
ББК 22.652
Л 87

Лучков Б.И. **НАША ЗВЕЗДА.** — М.: МИФИ, 2007. — 100 с.

Книга, предназначенная для школьников, студентов и учителей, посвящена физике Солнца. В ней рассматриваются вопросы источника солнечной энергии, синтеза элементов в термоядерных реакциях, протекающих в солнечном ядре, эволюции Солнца, проявления солнечной активности, исследования Солнечной системы. Приводятся как фундаментальные, строго установленные положения солнечной физики (термоядерные реакции, стандартная модель Солнца, циклы солнечной активности), так и результаты новых исследований, касающиеся проблемы солнечных нейтрино, природы солнечных вспышек, открытий на периферии Солнечной системы. Дан краткий очерк солнечной (наземной и космической) и термоядерной энергетик (рукотворное Солнце), которые в XXI в. придут на смену тепловым электростанциям, как экологически более чистые, неисчерпаемые и безопасные источники энергии.

Издание подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент доц. А.Б. Колдобский

ISBN 978-5-7262-0849-7

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ИСТОЧНИК ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ	7
ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ	13
pp-Цикл	14
CN-Цикл	16
ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА	17
Стандартная модель Солнца	17
Солнечные нейтрино	19
ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО	20
Нестационарность солнечного реактора	22
Новые свойства нейтрино	23
ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ	25
Эволюционный путь Солнца	27
СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА	29
Изотопный состав углерода и азота	30
Возраст Солнца	30
Периферия Солнечной системы	32
СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ	35
Солнечные циклы	36
Маундеровский минимум	38
А судьи кто?	41
Новые результаты	42
СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ	44
Темные пятна и активные области	44
Хромосферные вспышки	45
Тайна солнечных вспышек	46
Гамма-излучение солнечных вспышек	48
Орбитальный телескоп ГАММА-1	49
Мощные солнечные гамма-вспышки	51
СОЛНЕЧНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМНУЮ ПОГОДУ	55
Погодные аномалии начала века	55
Переносчики солнечного влияния	56
Радиационный пояс «входит в игру»	58

ЦИКЛОНЫ И УРАГАНЫ	59
Тропические ураганы	59
Модели и теории	61
«Стратегия сдерживания»	62
Связь с солнечной активностью.....	63
Эль Ниньо	68
Возможность направленного воздействия.....	70
КЛИМАТ И ПОГОДА XXI ВЕКА	71
Климат и погода.....	72
Модельные предсказания.....	72
Что век грядущий нам готовит?.....	74
Солнечное дыхание	78
СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	80
Энергетические запросы Земли.....	80
Экология энергий.....	81
Наземные солнечные установки.....	84
Космические солнечные станции.....	88
Шаги развития солнечной энергетики	89
РУКОТВОРНОЕ СОЛНЦЕ	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	97

ВВЕДЕНИЕ

Наша звезда Солнце — источник жизни на Земле. Она дарит нам свет, тепло, заготовило впрок ископаемые запасы нефти, угля, газа. Она управляет земной погодой, на которую мы часто неосмотрительно жалуемся, забывая о том, что дано другим планетам. Миллиарды лет Солнце поддерживает хрупкое равновесие нашего климата между раскаленной пустыней (как на Венере) и замороженным миром (как на Юпитере). Животворное значение Солнца было осознано древними цивилизациями, в мифологии которых оно стало главным божеством, могучим и мудрым творцом природы. Солнце — первый объект пристального внимания человека, первое небесное тело, затронувшее его пробудившееся сознание.

Солнце и сейчас один из важнейших объектов наблюдения, все еще полный загадок. Эта рядовая звезда Галактики является главной движущей и регулирующей силой Солнечной системы — планет, астероидов, комет, магнитных полей, потоков плазмы. Влияние Солнца распространяется не только на известные планеты (их суммарная масса в тысячи раз меньше массы звезды), но простирается на расстояния, намного превышающие орбиту самой удаленной из них. Только сейчас наблюдениям стали доступны тела, расположенные дальше, и мы еще в точности не знаем, что представляет собой периферия Солнечной системы.

Физика самого Солнца, в целом достаточно известная, тоже не лишена «белых пятен». В основном это относится к активности Солнца — периодической переменности солнечной «погоды», проявлением которой служат темные пятна на его видимой поверхности, мощные вспышки, и больших масс газа, плазмы и потоков частиц (рис. 1). На какое-то время Земля подвергается атаке солнечных извержений, что несомненно сказывается на нашей жизни. Земля — малая песчинка под боком у гиганта, испускающего не только «мирный» свет, но и коварные плазменные потоки. За Солнцем надо постоянно наблюдать, Солнце надо изучать.



Рис. 1. Фото Солнца в максимуме активности с корональным выбросом (SMM, NASA). Для сравнения показана Земля

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О НЕЙ

Солнце — одна из ста миллиардов звезд Галактики Млечный Путь. Солнце относится к звездам Главной последовательности — тем, которые «живут» за счет ядерного «горения» водорода и которые составляют большую часть звездного населения Галактики (85 %). В распределении звезд по массе Солнце занимает среднее положение ($M_c = 2 \cdot 10^{30}$ кг): есть звезды с массой $10^2 M_c$ (сверхгиганты) и звезды с массой $10^{-2} M_c$ (карлики). Полная светимость, то есть мощность излучения, Солнца составляет $L_c = 3,8 \cdot 10^{26}$ Вт, — в основном в видимой части спектра с небольшой долей инфракрасного и ультрафиолетового излучения. И по своей светимости Солнце тоже «средняк»: встречаются звезды (самые яркие сверхгиганты), светимость которых в 10^5 раз выше солнечной, и звезды (самые слабые карлики) со светимостью в 10^4 раз меньше.

Солнце — почти идеальный плазменный шар (немного сплюснутый с полюсов) с радиусом $R_c = 7 \cdot 10^5$ км, очень неравномерный по плотности и температуре. Средняя плотность солнечного вещества $1,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, тогда как в центре она доходит до $150 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Столь же неравномерна и его температура: в центре $T_c = 15 \cdot 10^6$ К, на поверхности (фотосфере) $T_n = 5800$ К. На самом деле никакой поверхности у Солнца нет. Фотосферой называют сравнительно тонкий слой (толщиной 500 км), в пределах которого фотоны солнечного излучения испытывают последнее рассеяние, после чего проходят остаточный газ (солнечную атмосферу) практически без взаимодействия. Рассеяние на фотосфере создает для внешнего наблюдателя видимость солнечного края. Состав Солнца типичен для звезд Главной последовательности: 73 % водорода, 25 % гелия, 2 % углерода, азота и кислорода (по массе). Доля более тяжелых элементов меньше 0,1 %.

Спектральный класс Солнца, определяемый температурой поверхности и составом, — G2 (желтый карлик).

Солнце — одиночная звезда, что встречается довольно редко. Большинство звезд Галактики входит в состав двойных, тройных и более кратных звездных систем, вплоть до звездных скоплений, насчитывающих тысячи звезд. Однако есть предположение, что и у Солнца имеется компаньон, образующий с ним широкую (размером в несколько парсек) парную систему. Согласно этой гипотезе звезда-компаньон — красный карлик (таких звезд вблизи от Солнца очень много), ей даже дано имя — Немезида. Период обращения пары Солнце-Немезида около 25 млн. лет и, как считается, сейчас они находятся на большом удалении друг от друга. Если это предположение верно, где-то через 10 млн. лет Немезида приблизится к Солнцу и ее можно будет воочию увидеть. Возможно, она будет замечена и раньше этого срока как движущаяся звезда на фоне неподвижных звезд. Но ее смещение крайне мало (из-за медленной скорости и большого расстояния от нас) и увидеть его в современные телескопы невозможно. Требуется значительное улучшение их «разрешающей способности».

Солнце расположено довольно далеко от центра Галактики (это большая удача для нас), на расстоянии 8 кпк, что составляет приблизительно половину радиуса галактического диска, и почти в центре диска по высоте. Солнце вместе с Солнечной системой движется в Галактике по орбите вокруг ее центра со скоростью 250 км/с, совершая полный оборот за 200 млн лет.

Итак, ни по положению, ни по своим свойствам Солнце никак не выделено — рядовая звезда в Галактике. И все же некоторая особенность есть. Эта рядовая звезда очень удобна для возникновения жизни на ее третьей планете — Земле: не слишком яркая и не очень слабая, не входит в кратные системы с их опасной переменностью, приливными силами и перетеканием вещества, расположена в месте, где плотность звезд мала, их столкновения редки и радиационный фон мал. У нее под боком нет опасных соседей, таких как пульсары, эруптивные и вспыхивающие звезды. Ее система планет весьма спокойная. Тяжелые планеты (Юпитер, Сатурн, Нептун) находятся достаточно далеко, их приливное воздействие на Солнце невелико. Если бы они располагались на орбитах Меркурия и Венеры, на Солнце действовали бы большие приливные силы, и оно не вело бы себя так спокойно, его активность была бы в этом случае выше, что вряд ли способствовало развитию жизни где-либо в Солнечной системе.

Благодаря указанным особенностям звезды Солнечная система является собой прекрасное место для обитания и неспешной эволюции жизни.

ИСТОЧНИКИ ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ

За счет чего светит Солнце? Что питает его активность? Какой энергетический источник нагревает солнечные недра до миллионов градусов и в течение миллиардов лет поддерживает световой поток на высоком постоянном уровне? На эти вопросы, поставленные

* Парсек (пк) — принятая единица расстояния в астрономии, 1 пк = $3,1 \cdot 10^{18}$ см = 3,26 св. лет, 1 кпс (килопарсек) = 10^3 пк.

в середине XIX в. (после открытия закона сохранения энергии), было высказано несколько гипотез.

Юлиус Майер, автор закона сохранения энергии в механических и тепловых процессах, считал, что Солнце и все звезды разогреваются в результате падения на них комет. В его время такая гипотеза была законной, но позднее, когда стали известны частота столкновений комет, их массы и выделяющаяся энергия, этот источник оказался совершенно недостаточным для объяснения солнечной светимости.

Герман Гельмгольц и Уильям Томсон предполагали, что звезды разогреваются и излучают вследствие постоянного гравитационного сжатия. Эта вполне разумная гипотеза встречается, однако, с серьезной трудностью, которую проще всего понять на примере Солнца. Энергия, выделившаяся в результате сжатия первичного газопылевого облака до размеров сегодняшнего Солнца, равна гравитационному потенциалу $V = G M_c^2 / R_c$, где G — константа гравитации, M_c и R_c — соответственно масса и радиус Солнца. Так как светимость L — величина постоянная (по данным геологии и палеонтологии, показывающих неизменность земного климата на протяжении миллиардов лет), из V и L можно определить «гравитационный» возраст Солнца: $t_{гр} = V/L = 30$ млн лет. Это намного меньше истинного возраста нашей звезды 4,7 млрд лет, определенного по радиоактивному анализу (см. раздел «Возраст Солнца»). Выходит, одного гравитационного источника недостаточно. Очевидно, его роль очень важна при начальном разогреве сжимающегося облака, что можно показать с помощью теоремы вириала для замкнутой системы:

$$E_n + 2 E_k = 0, \quad (1)$$

где E_n , E_k — потенциальная и кинетическая энергии вещества звезды. Полагая для простоты, что звезда состоит из водородной плазмы, и выражая $E_k = (3/2) kT \cdot 2N$, $N = M_c/m_p$ (k — константа Больцмана, m_p — масса протона) и $E_n = -G M_c^2 / R_c$, из (1) находим температуру $T = 4 \cdot 10^6$ К, которая близка к средней температуре Солнца (в центре $15 \cdot 10^6$ К, на фотосфере $6 \cdot 10^3$ К). Из теоремы следует и другой любопытный факт: излучая, звезда будет сжиматься и в результате еще больше нагреется, что соответствует ожидаемой эволюции звезд. И все же, кроме гравитационного источника, ответственного за первичный разогрев, должен существовать какой-то основной механизм, который и обеспечивает свечение звезд в течение миллиардов лет.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЧАСТИЦЫ

В природе существуют четыре фундаментальных взаимодействия, проявляющие себя в микро- и макромире (на шкале расстояний от 10^{-16} см до 10^{28} см): сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. В табл.1 приведены основные характеристики взаимодействий. Два из них, сильное и слабое, обладающие коротким радиусом действия ($< 2 \cdot 10^{-13}$ см), определяют свойства микромира. Сильное взаимодействие ответственно за связанные состояния атомных ядер, реакции между ними и элементарными частицами, альфа-распад и спонтанное деление ядер. Бета-распад ядер, «слабые» распады элементарных частиц и реакции лептонов (частиц, не имеющих сильного заряда) с ядрами и элементарными частицами — это проявления слабого взаимодействия. Электромагнитное и гравитационное взаимодействия проникают до больших расстояний: их радиус действия практически бесконечен, а потенциал изменяется как $1/r$. Электромагнитное взаимодействие ответственно за образование атомов и молекул, за электрические и магнитные явления. Все многообразие макромира от астероидов до скоплений галактик обусловлено гравитационным взаимодействием.

Таблица 1

Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Переносчик	Безразмерная константа	Радиус действия
1. Сильное (между кварками) Ядерное (между нуклонами)	глюон ($m = 0, s = 1$) мезоны ($m > 140$ МэВ, $s = 0$ и 1)	< 1 1-10	10^{-13} см $2 \cdot 10^{-13}$ см
2. Электромагнитное	фотон ($m = 0, s = 1$)	0,09	бесконечный
3. Слабое	тяжелые бозоны W ($m = 81$ ГэВ, $s = 1$) Z ($m = 92$ ГэВ, $s = 1$)	0,4	10^{-16} см
4. Гравитационное	гравитон ($m = 0, s = 2$)	10^{-40}	бесконечный

m — масса, s — собственный момент (спин).

Не понятно, почему природа ограничилась только четырьмя взаимодействиями, но это установленный факт. Все поиски пятой фундаментальной силы не увенчались успехом.

Константы взаимодействий, как видно из таблицы, убывают от сильного к гравитационному, определяя долю участия каждого в различных процессах. Так, сильное взаимодействие проявляется только на уровне элементарных частиц и атомных ядер, где оно доминирует. Слабое взаимодействие, намного уступая сильному по величине, оказывается более «радикальным», так как допускает нарушение многих незыблемых для сильного взаимодействия величин. Электромагнитным образом взаимодействуют все заряженные частицы. Гравитационное взаимодействие настолько слабо, что в мас-

штабе микромира его можно не учитывать. Но в макромире именно оно управляет жизнью планет, звезд, галактик, всей Вселенной.

Элементарные частицы — мельчайшие кирпичики вещества — несмотря на свое название, представляют собой довольно сложные объекты. Они обладают множеством внутренних свойств: массой, размером, собственным механическим моментом (спином), зарядами, ответственными за разные взаимодействия, в которых они участвуют. По величине спина различают барионы — частицы с целочисленным спином (0, 1, 2, ... в единицах \hbar) и фермионы — имеющие полуцелый спин ($1/2, 3/2, \dots$ в тех же единицах). Их поведение в ансамблях частиц сильно различается: бозоны собираются в тесный коллектив (бозеконденсат), в то время как фермионы, будучи единичниками, предпочитают селиться по одиночке, занимая отдельные ячейки состояния. Над фермионами тяготеет запрет Паули: два порядочных фермиона не могут селиться вместе — находиться на одном и том же квантовом уровне.

Различают следующие группы элементарных частиц: адроны, лептоны, переносчики взаимодействий.

Адроны — тяжелые частицы, принимающие участие во всех трех типах взаимодействий (гравитационное не рассматривается ввиду его слабости). Адроны разделяются на барионы — частицы с сильным (барионным) зарядом — и мезоны, у которых барионный заряд равен нулю, но тем не менее сильное взаимодействие проявляется. Барионов и мезонов огромное множество. Все они — составные частицы, «построенные» из еще более простых «кирпичиков», получивших название кварков. Адроны объединяются в группы — мультиплеты. Хорошо известен нуклонный дублет, который состоит из протона и нейтрона, частиц, входящих в состав атомных ядер.

Лептоны — это в среднем более легкие частицы, не взаимодействующие сильным образом. Их размер и структура неизвестны, поэтому до сих пор они считаются точечными. Лептонов только шесть: электрон, мюон и тау-частица с отрицательным электрическим зарядом, электронное, мюонное и тау-нейтрино — их лептонный заряд равен 1. Еще шесть антилептонов (с лептонным зарядом, равным -1): позитрон, электрически положительно заряженные мюон и тау-частица, три антинейтрино. Нейтрино и антинейтрино, не имеющие электрического заряда, участвуют только в слабом взаимодействии. В этом их особенность, приводящая к огромной проникающей способности нейтринных потоков и трудности их регистрации.

Лептоны и кварки находятся на одинаковом уровне «простоты» — бесструктурны, точечны. Они истинно фундаментальны. Их роднит еще и то, что все они фермионы и их одинаковое число. Кварков, как и лептонов, шесть (u, d, s, c, b, t — кварки), столько же антикварков.

Переносчиками взаимодействия являются глюоны, осуществляющие связь между кварками; фотоны (гамма-кванты), передающие электромагнитное взаимодействие; векторные бозоны (W^+, W^- и Z^0), ответственные за слабое взаимодействие; гравитоны, обмен которыми объясняет всемирное притяжение. Гравитоны пока экспериментально не обнаружены (по причине чрезвычайной малости взаимодействия), но никто не сомневается в реальности их существования. Все переносчики — бозоны: первые три со спином

* $\hbar = h/2, h = 6,626 \cdot 10^{-27}$ эрг·с — константа Планка.

1, спин гравитона равен 2 (и в этом отличии все особенности и трудности теории гравитации — общей теории относительности Эйнштейна).

Ядерное взаимодействие, удерживающее нуклоны в ядрах и проявляющееся в ядерных реакциях, строго говоря, не является фундаментальным. Оно представляет собой «отголосок» глюонной связи кварков, входящих в состав протонов, нейтронов и других адронов, при столкновении ядер и элементарных частиц. Его принято описывать как обмен разными типами мезонов (для этого, надо полагать, они и придуманы природой).

Великие астрофизики XX в. Артур Эддингтон и Джеймс Джинс, каждый по-своему, искали главный источник энергии: первый — в реакциях аннигиляции вещества, в которых масса превращается в энергию (в соответствии с эйнштейновским соотношением $E = mc^2$), второй — в реакциях радиоактивного распада. Аннигиляционный источник позволил бы звезде излучать в тысячи раз больше, чем при гравитационном сжатии, сняв, таким образом, противоречие с возрастом Солнца. Однако реакции аннигиляции, которые позднее действительно были открыты, происходят между частицами и античастицами, а солнечная водородная плазма, состоящая только из частиц (протоны, электроны), аннигилировать «не имеет права». Этому препятствуют законы сохранения барионного (для протонов) и лептонного (для электронов) зарядов. И все же Эддингтон угадал главное — температурную зависимость источника звездной энергии, его «включение» при очень высокой температуре — задолго до окончательного решения проблемы. Именно он по праву считается идейным отцом звездного термоядерного синтеза. Что же касается «распадного» механизма, то по мере изучения стало ясно, что он весьма слаб (особенно для звезд, в составе которых относительно мало радиоактивных элементов) и никак не может быть основным энергетическим источником. Энергия, выделяемая в радиоактивных распадах, нагревает внутренние части планет до тысяч градусов (пример — расплавленное ядро Земли), но она явно не масштаба энергии звезд с их миллионградусными центральными «топками».

Советский физик Л.Д. Ландау в 1937 г. предложил идею аккреционного источника, согласно чему каждая звезда имеет плотную нейтронную сердцевину, как бы персональную нейтронную звезду, падение (аккреция) вещества на которую является эффективной тепловой машиной, преобразующей в энергию до 30 % массы. Его статья, опубликованная в журнале *Nature*, вызвала огромный интерес. Аккреционный механизм снимал все трудности звездной энергетики, но все же оказался экзотическим и уступил место более

простому термоядерному источнику. В жизни ученого, который был арестован (нередкое событие в 30-х гг.), аккреционная гипотеза сыграла важную роль. Протесты мировой научной общественности, узнавшей о судьбе ученого, и заступничество академика П.Л. Капицы спасли Ландау жизнь.

Ни одна из предложенных за 100 лет гипотез не справилась с загадкой происхождения звездной энергии. Но верная идея термоядерного источника, высказанная в 1929 г. Р. Аткинсоном и Ф. Хоутермансом, подхваченная и развитая в работах многих физиков (Георгий Гамов, Эдвард Теллер, Карл Вейцеккер и др.), нашла окончательное выражение через 10 лет в блестящих работах Ханса Бете по звездным термоядерным циклам.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Элементарные частицы, взаимодействующие сильным образом, и атомные ядра участвуют в ядерных реакциях, как атомы и молекулы — в химических реакциях. Сталкиваясь между собой, они могут превращаться в другие ядра и частицы. Однако есть одно отличие: в химических процессах действует закон сохранения веса (точнее, массы), открытый еще М.В. Ломоносовым, в то время как в ядерных превращениях выполняется более общий закон сохранения полной энергии. Полная энергия взаимодействующих частиц включает в себя их энергии покоя Mc^2 (где M — сумма масс взаимодействующих частиц) и кинетические энергии. Закон сохранения полной энергии отражает эквивалентность массы и энергии, открытую А. Эйнштейном, и дает возможность как увеличивать кинетическую энергию системы — за счет уменьшения суммарной массы частиц (называемой дефектом массы), так и получать частицы большей массы — за счет уменьшения суммарной кинетической энергии. Закон сохранения полной энергии — воплощение мечты средневековых алхимиков о получении золота из ртути, но только для этого нужны недоступные в средние века ускорители заряженных частиц. На самом деле принципиального различия между ядерными и химическими реакциями нет. Дефект масс в «химии» вовсе не равен нулю — просто он очень мал (порядка 10^{-9} от массы участвующих атомов), что и приводит на практике к закону сохранения массы. Дефект масс в ядерных превращениях заметно больше: 10^{-3} — 10^{-2} от массы ядер.

Возможность ядерной реакции определяется величиной Q (энергия реакции), равной разности масс вступающих и образующихся в реакции частиц. Если $Q > 0$, дефект массы положительный и суммарная кинетическая энергия возрастает. Такие реакции, называемые экзо-энергетическими, можно использовать для получения энергии (их химический аналог — реакции горения). Если $Q < 0$, реакция эндо-энергетическая, в ней можно получить новые частицы и ядра (например, золото), но надо затратить на это энергию сталкивающихся частиц. Как источник энергии эндореакции не годятся. Примером экзорекций являются термоядерные реакции синтеза, сравнительно легко осуществляемые на современных ускорителях (но не приводящие к

положительному выходу энергии из-за больших затрат на ускорение частиц) и протекающие в естественных условиях в недрах звезд.

Кроме сохранения энергии и импульса в ядерных реакциях должны сохраняться электрические и барионные заряды. Сохранение барионного заряда для ядер фактически означает, что суммарное число нуклонов должно остаться неизменным: нуклоны могут перегруппироваться в ходе реакции, но их число остается тем же, что было до реакции. В ядерных реакциях действуют и другие законы сохранения (четности, изотопического спина и др.), но для понимания термоядерных реакций, протекающих в звездах, они не нужны.

Термоядерные реакции, как уже говорилось, это реакции с выделением энергии ($Q > 0$). Если бы ядра не имели электрического заряда, такие реакции протекали бы при любых, даже нулевых, кинетических энергиях. Но все ядра положительно заряжены и между ними возникает кулоновская сила отталкивания. Чтобы сблизиться до расстояний действия ядерных сил ($r_{\text{я}} = 2 \cdot 10^{-13}$ см), надо преодолеть кулоновское отталкивание. Этого можно достичь, нагревая вещество до температуры, когда средняя кинетическая энергия $E_{\text{к}} = 3kT / 2$ станет равной потенциальной кулоновской энергии $E_{\text{п}} = Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2 / r_{\text{я}}$. Даже для ядер водорода ($Z = 1$) это означает нагрев до температуры $T = 10^7$ К. Для ядерных реакций синтеза более тяжелых ядер требуются температуры 10^8 - 10^9 К, что осуществить под силу только звездам.

Принятая единица энергии в ядерной физике — 1 эВ (электрон-вольт). Это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В; 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Для протекания термоядерных реакций нужны энергии частиц в десятки и сотни кэВ (1 кэВ = 10^3 эВ, 1 МэВ = 10^6 эВ).

Массы частиц в ядерной физике принято выражать не в граммах, а в энергетических единицах, например, в МэВ/ c^2 .

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Основной элемент на Солнце — водород, его весовая доля составляет ~ 70 %. Остальное — гелий (около 30 %), углерод, азот и кислород (вместе ~ 2 %). Других элементов пренебрежимо мало.

Первым указанием на реакции синтеза, в которых выделяется энергия, было то, что масса четырех ядер водорода ${}^1\text{H}$ больше суммы масс ядра ${}^4\text{He}$ и двух позитронов (e^+), так что возможен процесс (разрешен законами сохранения энергии и электрического заряда):



где выделяющаяся энергия $Q = 4m_p - m_{\text{He}} - 2m_e = 26,8$ МэВ (m_p , m_{He} , m_e — массы протона, гелия и позитрона). Удельное энерговыделение (калорийность) процесса (2) очень высокое — почти на порядок больше, чем в реакции деления урана, которая обеспечи-

ваает работу атомного реактора. По сравнению же с химическим топливом (нефть, газ) калорийность ядерного водородного топлива превышает в миллионы раз. Только, чтобы «зажечь» его, нужна очень высокая температура (порядка 10^7 К), которая заставляет ядра водорода (протоны) двигаться быстрее и сближаться до малых расстояний, где действуют ядерные силы. Энергия выделяется за счет перестройки ядер: вместо свободных протонов образуются ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, и часть их массы (около 1 %) освобождается в виде кинетической энергии продуктов реакции.

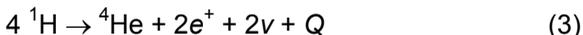
Однако процесс (2) лишь голая идея, так как непонятно, как его осуществить. Радиус ядерных сил очень мал ($\sim 2 \cdot 10^{-13}$ см) и вероятность нахождения четырех протонов в столь малом объеме ничтожна даже в центрах звезд, где самая большая плотность вещества. Сталкиваясь и сближаться до столь малых расстояний, преодолевая кулоновское отталкивание, частицы могут лишь попарно за счет их большой кинетической энергии. Кстати, становится понятным, почему главный источник «включается» при высокой температуре, а при низкой «работает» только гравитационный. И все-таки, как осуществить процесс (2)?

Решение нашел Ханс Бете. В классических работах 1938 — 1939 гг. он (вместе с Ч. Кричфилдом, У. Фаулером, К. Вейцзекером) детально рассмотрел два термоядерных цикла: протон-протонный (pp) и углеродно-азотный (CN) — и загадка источника звездной энергии была решена.

pp-Цикл

Основная ветвь pp-цикла состоит из трех последовательных реакций (рис. 2). Первая реакция — образование дейтона (тяжелого изотопа водорода) ${}^2\text{H}$ при столкновении двух протонов — главное и самое трудное звено цикла. В ней участвует слабое взаимодействие и потому реакция очень медленная. Каждый протон в центральной зоне Солнца вступает в эту реакцию в среднем за время $\sim 10^{10}$ лет. Только благодаря огромному их числу (10^{57}) это «узкое место» pp-цикла удается преодолеть. Как только образуется дейтон, вторая и третья реакции идут без особых затруднений (за время ~ 10 с и 10^6 лет соответственно). Подведя итог всему циклу, для

чего надо избавиться от промежуточных частиц (${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$), получаем:



(гамма-кванты входят в энергию реакции Q). Процесс (3) — это процесс (2), исправленный на закон сохранения лептонного заряда: лептоны всегда рождаются парами (электрон — антинейтрино, позитрон — нейтрино). Так как масса нейтрино крайне мала ($< 1 \text{ эВ}/c^2$), добавление нейтрино не изменяет энергию реакции. В физическом плане это добавление крайне важно — Солнце должно испускать не только световой, но и нейтринный поток.

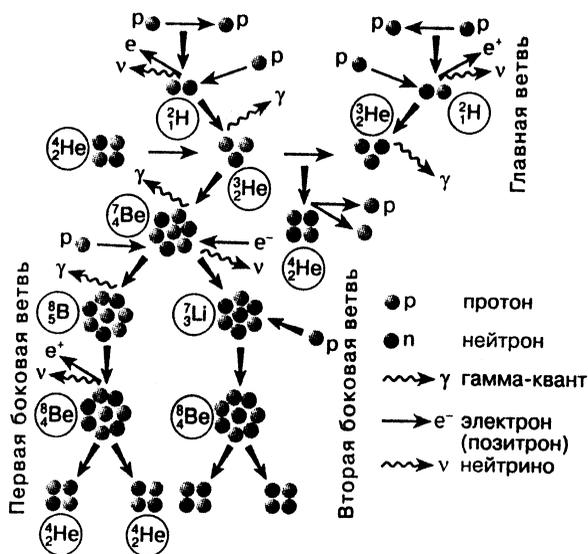


Рис. 2. Схема протон-протонного цикла

Кроме главной ветви есть две побочные, вероятность которых в сотни раз меньше. В этих реакциях образуются изотопы лития (Li), бериллия (Be), бора (B). Нейтрино, возникающие в побочных ветвях, имеют большую энергию, чем нейтрино pp-реакции (особенно в распаде ${}^8\text{B}$, спектр которых тянется до 14 МэВ). Поскольку нейтрино практически не взаимодействуют с веществом и уносят свою энергию из звезды, это приводит к меньшему реальному выделению энергии в побочных реакциях.

CN-Цикл

Процесс (3) реализуется также на ядрах С, N, O посредством реакций синтеза и радиоактивного распада (рис. 3). Ядро ^{12}C , с которого начинается и которым заканчивается цикл, служит ядерным катализатором. Ту же роль могло бы играть ядро ^{14}N (азотно-кислородный цикл), но из-за большего электрического заряда ядра азота требуются высокие температуры, что возможно только в массивных звездах.

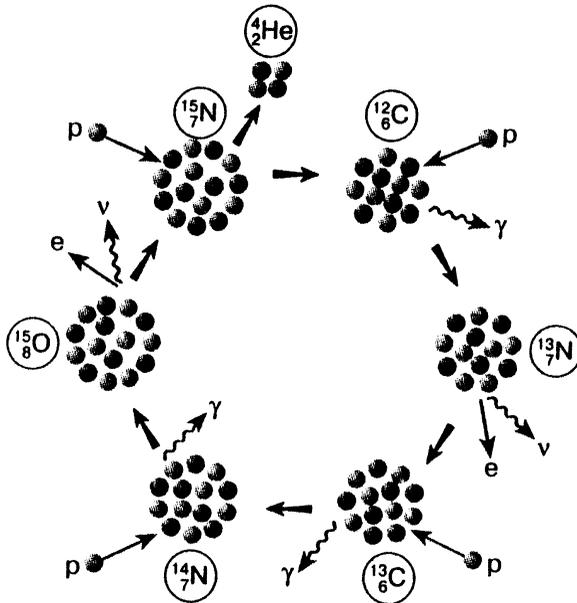


Рис. 3. Схема углеродно-азотного цикла

Итог CN-цикла — тот же процесс (3), но приводящий к другим энергетическим спектрам нейтрино. Реакции CN-цикла идут при более высоких температурах, чем pp-цикл. Разные звезды «выбирают» наиболее удобный для них термоядерный цикл. Так, по расчету, на Солнце 95 % энергии вырабатывается pp-циклом и только 5 % — CN-циклом. В более массивном и горячем Сириусе (голубой гигант) CN-цикл дает все 100% звездной энергии.

В 1967 г. Ханс Бете получил Нобелевскую премию, как сказано в решении Нобелевского комитета, за «его вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, относящиеся к источникам энергии звезд».

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА

К настоящему времени получены веские свидетельства в пользу термоядерного источника. Он нашел применение (и, следовательно, подтверждение) в многочисленных расчетах звездных моделей. Принимая во внимание гидростатическую и тепловую устойчивости звезд, а также используя уравнения переноса энергии, оказалось возможным заглянуть в звездные недра и создать модели всех типов звезд — от молодых, как Солнце, живущих за счет «сжигания» водорода, до старых, перешедших на гелиевое, углеродное и более тяжелое ядерное горючее (красные гиганты) и даже исчерпавших все топливные запасы (белые карлики, нейтронные звезды). Модели показывают, как эволюционируют звезды, как они переходят из одного типа в другой. В частности, они указывают на то, что при определенных условиях (невыполняемых, к счастью, на Солнце) такой переход имеет вид грандиозного взрыва, когда звезда ярко вспыхивает и некоторое время наблюдается как Сверхновая. Успехи звездного моделирования — подтверждение реальности термоядерного источника, но все же не прямое.

Каково внутреннее устройство Солнца? Модели нашей звезды, входящей в группу молодых звезд Главной последовательности, начали создаваться еще 40 лет назад и к настоящему времени представляют хорошо разработанный тип моделей. Рассмотрим наиболее известную из них.

Стандартная модель Солнца (СМС)

Согласно СМС звезда состоит из трех зон, отличающихся температурой, плотностью и процессом переноса энергии (рис. 4). Центральная зона, ограниченная размером $\sim 0,1 R_C$, наиболее плотная и нагретая часть звезды (плотность 150 г/см^3 , температура в центре $1,5 \cdot 10^7 \text{ К}$). Передача тепла от центра к границе зоны осуществляется слабой конвекцией (всплывание более нагретых сло-

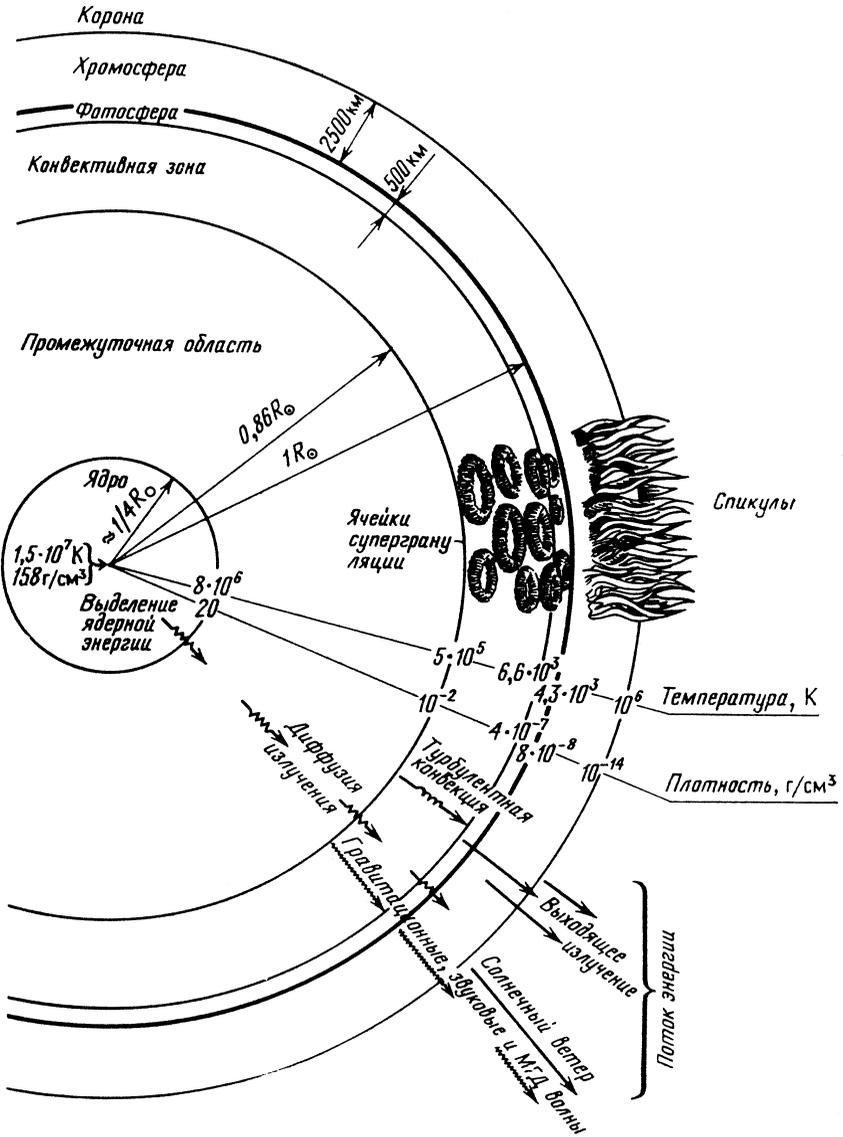


Рис. 4. Внутреннее строение Солнца согласно СМС

ев). Центральная зона — солнечный термоядерный реактор, где в реакциях pp- и CN-циклов выделяется энергия, проходящая затем через всю звезду и излучаемая в виде светового потока. Температура постепенно убывает от центра к краю звезды (фотосфере), в результате чего уже в следующей зоне — статической радиационной — температура падает до 10^6 К, что недостаточно для ядерного «горения». Тепло передается далее за счет процесса многократного поглощения и излучения атомами рентгеновских квантов. Происходит медленная (миллионы лет) диффузия теплового потока, пока он, остывая, не дойдет до внешней границы радиационной зоны, которая находится на радиусе $\sim 0,8 R_{\odot}$. Здесь механизм передачи энергии изменяется: на смену «спокойному» радиационному переносу приходит более эффективный в этих условиях конвективный перенос — нагретые массы солнечного вещества устремляются вверх. Это конвективная зона с бурлящей, как при кипении, плазмой, вырывающейся на фотосферу. Все проявления солнечной активности (см. раздел «Солнечная активность») обусловлены процессами, происходящими в конвективной зоне.

Согласно СМС наша звезда представляет собой тело с сильной концентрацией к центру массы и температуры. Средний по звезде химический состав приблизительно такой же, как на поверхности, за исключением центральной зоны, где доля гелия повышена за счет горения водорода.

СМС представляет внутреннее строение звезды с точностью, доступной для расчетов. Модель, конечно, допускает определенные идеализации: звезда считается сферически симметричной, без вращения и магнитного поля, что для Солнца вполне допустимо. В результате получают радиальные профили плотности, давления и температуры, зависимости от радиуса, химического состава и других параметров, знание которых позволяет определить внешние проявления звезды. Оптическая светимость Солнца, масса, радиус, поверхностный состав закладываются в расчет, как граничные условия. Новое, что вытекает из модели, — поток и энергетический спектр нейтрино, образуемых в термоядерных циклах. Это дает возможность прямой проверки термоядерного источника энергии.

Солнечные нейтрино

Солнце находится на расстоянии $r = 1 \text{ AE} = 150$ млн км, являясь единственной звездой, стационарный поток нейтрино от которой

может быть измерен. Потоки от других звезд (даже самых близких, $r \sim 1 \text{ пк} = 2 \cdot 10^5 \text{ АЕ}$) за счет фактора $1/r^2$ будут на много порядков меньше и их измерение невозможно.

Поток солнечных нейтрино легко оценить на основании процесса (3): на каждую порцию $Q = 26,8 \text{ МэВ}$ солнечного излучения, выражаемого светимостью L , приходится два нейтрино. Их поток на Земле составит $I_\nu = 2L / (4\pi r^2 \cdot Q) = 6 \cdot 10^{10} \text{ в/}(см^2 \cdot с)$. Точный расчет нейтринного потока должен учитывать изменения температуры и плотности солнечного вещества согласно СМС, и темпов реакций pp- и CN-циклов. Впервые расчеты были проведены в 1970-х гг. в связи с начавшимся экспериментом по измерению солнечных нейтрино. Результатом расчетов стали предсказанные парциальные потоки и энергетические спектры нейтрино от реакций pp- и CN-циклов. Знание энергий нейтрино очень важно, так как детекторы, используемые в экспериментах, более эффективно регистрируют нейтрино высоких энергий ($> 1 \text{ МэВ}$), чем низких энергий ($< 1 \text{ МэВ}$).

Сейчас, после 30 лет измерений, можно с уверенностью сказать, что солнечные нейтрино обнаружены и, следовательно, термоядерная природа звездной энергии доказана. Но, как часто бывает в крупных экспериментах, измерения дали и совершенно новое — измеренный поток нейтрино оказался существенно меньше, чем расчеты по СМС. Возникла проблема — как объяснить дефицит солнечных нейтрино? В чем причина того, что детектор на Земле регистрирует поток нейтрино в несколько раз меньший, чем испускается в центре звезды?

ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

К настоящему времени выполнены четыре эксперимента по регистрации солнечных нейтрино: пионерский эксперимент Homestake (Р. Дэвис, США), а также Kamiokande (Япония), SAGE (Россия — США), Gallex (Италия — Германия). Новые эксперименты проводятся еще на двух детекторах: Superkamiokande (Япония) и Sudbury (Канада — США). Все эксперименты, уникальные и чрезвычайно сложные, проводились в глубокой шахте или тоннеле, чтобы уменьшить фон космических лучей, и продолжались годами. Детектор нейтрино представляет собой многотонную установку, насыщенную современными высокочувствительными датчиками, быстрой (10^{-9} с) электроникой. Требуется высокая степень очистки вещества детектора от радиоактивных примесей. В качестве при-

мера, в детекторе Superkamiokande — огромном баке (высота 45 м, диаметр 35 м), наполненном 50 тыс. т сверхчистой воды, — используется 13 тыс. фотоумножителей, которые выделяют слабую вспышку света, испущенную электроном, испытавшим взаимодействие с солнечным нейтрино (рис. 5).

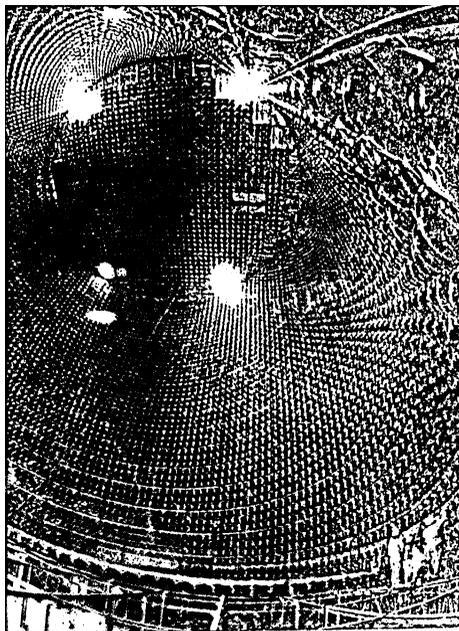


Рис. 5. Вид нейтринного детектора Superkamiokande (до заполнения водой)

Для регистрации нейтрино использовались радиохимический метод (Homestake, SAGE, Gallex) и метод черенковских вспышек в воде, вызываемых продуктами нейтринных реакций (Kamiokande, Superkamiokande, Sudbury). Черенковские детекторы, обладая высоким энергетическим разрешением и способностью измерять направление прихода нейтрино, оказались наиболее продуктивными. Со своей стороны радиохимические детекторы (особенно SAGE и Gallex, использующие галлий-германиевую реакцию регистрации) позволили значительно расширить энергетический диапазон регистрируемых нейтрино вплоть до малоэнергичных, возникающих в реакции $p-p$ цикла.

Данные всех экспериментов, давая веские доказательства существования потока солнечных нейтрино, указывают на его несоответствие с ожидаемым по СМС. Измеренные потоки оказались меньше расчетных в 1,5 — 3 раза. Этот дефицит может быть вызван целым рядом причин — от неточного знания темпа ядерных реакций до новых свойств нейтрино.

Нестационарность солнечного реактора

Самый простой способ «зажать» производство нейтрино на Солнце — понизить температуру центральной зоны примерно на 1 млн град. (~ 7 %). Термоядерные реакции так сильно зависят от температуры, что даже такое малое похолодание снимет проблему нейтринного дефицита. Однако СМС этого не допускает, если речь идет о постоянном уменьшении центральной температуры. Но если изменение временное, то средняя солнечная светимость останется на прежнем уровне. Просто был временный спад в работе солнечного реактора, который при усреднении за большой интервал времени существенно не изменил параметры звезды. Гипотеза о нестационарности солнечного реактора была высказана при анализе первых результатов, когда был замечен нейтринный дефицит. Нашлась и причина спадов работы реактора.

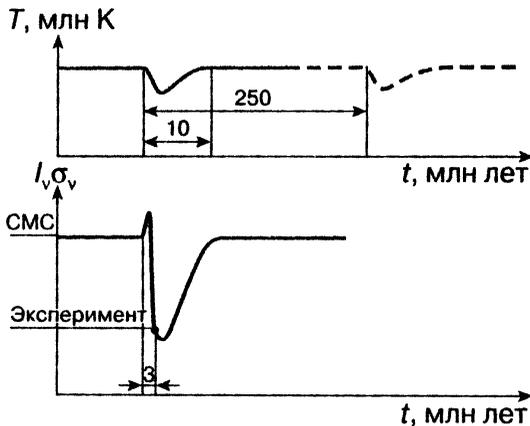


Рис. 6. Зависимость от времени центральной температуры Солнца и потока нейтрино в модели нестационарного термоядерного реактора

Вследствие реакций синтеза в центре Солнца скапливается гелий — зола, забивающая «топку» и снижающая темп «горения». Солнце, как любая звезда, — саморегулирующая система: когда доля гелия затормозит отвод тепла из центральной зоны, в ней автоматически изменится процесс теплопередачи. Медленная конвекция сменится бурным перемешиванием, в результате чего гелий будет вынесен и заменен водородом. Произойдет временное охлаждение центра (рис. 6). Расчет показал, что нейтринный поток упадет в несколько раз, но вернется на стационарный уровень через 10 млн лет, когда температура центра снова возрастет. Подобные спады в работе реактора должны повторяться каждые 250 млн лет. Согласно этой гипотезе мы живем во время после спада — поток нейтрино ослаблен и еще не вернулся на постоянный уровень.

Что подтверждает этот сценарий? Геофизика показывает, что наш климат очень чувствителен к любым изменениям работы солнечного реактора. Понижение центральной температуры и снижение темпа термоядерных реакций через некоторое время приведут к охлаждению солнечной поверхности и уменьшению светимости на ~ 20 %. Среднегодовая температура на Земле упадет на ~ 5 %, что заметно изменит климат планеты. Наступит глобальное оледенение — граница льдов спустится до средних широт. Согласно геофизическим данным на Земле было четыре великих оледенения, следующих с интервалами 200 — 300 млн лет и последнее из них, четвертичное оледенение, произошло 3 млн лет назад! Мы, оказывается, живем в ледниковую эпоху, в тот ее период, когда под влиянием парникового эффекта, вызванного накоплением CO_2 в атмосфере, ледники временно отступили. Вот так проблема термоядерных реакций в Солнце и поток солнечных нейтрино переплелись с нашей земной жизнью. Поток солнечных нейтрино должен вернуться на свой постоянный уровень, даваемый СМС, через несколько миллионов лет.

Новые свойства нейтрино

И все же, несмотря на привлекательность, гипотеза нестационарности солнечного реактора оказалась иллюзорной, уступив место более сложной гипотезе «нейтринных осцилляций». Зато последняя была подтверждена точным экспериментом, проведенным в наши дни, а не через миллионы лет. В эксперименте Sudbury (США, Канада) было показано, что нейтрино спонтанно переходят

из одного типа в другой. Рождаясь в термоядерных реакциях как ν_e , они на пути от центра Солнца к земному детектору становятся ν_μ и ν_τ , которые в других нейтринных детекторах не регистрировались.

Солнечные нейтрино открыли новое явление в физике элементарных частиц – переходы между разными типами нейтрино (нейтринные осцилляции), теоретически предсказанные замечательным физиком, академиком Бруно Понтекорво. Сейчас это явление детально исследуется в земных лабораториях, в нейтринных пучках от ускорителей и ядерных реакторов.

Результаты эксперимента Sudbury касаются не только проблемы солнечных нейтрино. Они затрагивают основы физики элементарных частиц. Из факта «нейтринных осцилляций» неизбежно следует, что лептонный заряд, отличающий различные типы нейтрино, не является строго сохраняющейся величиной. Отсюда — по крайней мере, два важнейших вывода: 1) все типы нейтрино имеют ненулевую массу покоя, 2) барионный заряд (квантовая характеристика частиц, участвующих в сильном взаимодействии) тоже не должен сохраняться, чему до сих пор не было ни одного экспериментального свидетельства.

И все же, возвращаясь к солнечным нейтрино, считать вопрос окончательно решенным пока рано, так как только нейтринные осцилляции не могут объяснить всех экспериментальных фактов, в частности, зависимости нейтринного потока от солнечной активности (рис. 7).

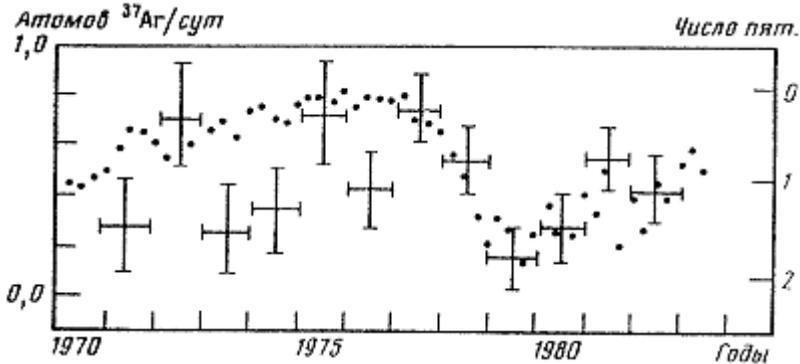


Рис. 7. Вариации потока солнечных нейтрино по данным детектора Homestake (левая шкала) и числа солнечных пятен (точки, правая шкала)

Это свойство потока солнечных нейтрино может быть объяснено наличием у нейтрино другого важного свойства — магнитного момента, величина которого пока точно не установлена. В настоящее время проводятся эксперименты на ядерных реакторах с целью найти хотя бы верхний предел магнитного момента этой загадочной частицы.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ

Вслед за «горением» водорода в ядре звезд солнечного типа начинается его «сжигание» в сферическом слое вокруг центра, где остается лишь гелий, не вступающий в реакции при температурах ниже 10^8 К. Звезда с Главной последовательности переходит в область красных гигантов — раздутых и покрасневших (из-за уменьшения температуры поверхности) звезд. Когда в результате постоянного сжатия температура центра станет 10^8 К, произойдет гелиевая вспышка, в которой ядра гелия, вступая в реакции термоядерного горения, образуют углерод и кислород. Итоговая запись тройной гелиевой реакции, в которой синтезируется углерод, выглядит так:



Энергия реакции $Q = 3m_{\text{He}} - m_{\text{C}} = 7,2$ МэВ, где m_{He} и m_{C} — массы ядер гелия и углерода. Синтез элементов, сопутствующий термоядерным реакциям, ведет к образованию все более тяжелых ядер. При еще более высокой температуре происходят углеродная и кислородная вспышки, в результате которых светимость звезды продолжает расти и она все больше распухает. Продуктами горения углерода и кислорода в центральной зоне будут ядра магния, фосфора, серы и других элементов средней части Периодической системы. Наконец, при температуре выше $4 \cdot 10^9$ К идут все энергетически выгодные процессы термоядерного синтеза — образуются элементы вплоть до «железной группы» (Fe, Ni, Co), представляющей самые устойчивые ядра, с максимальной энергией связи на один нуклон. На этом термоядерное «горение» в ядре красного гиганта заканчивается, но не прекращается синтез элементов. Новые, все более тяжелые элементы, образуются теперь не в реакциях, идущих с выделением энергии и потому нужных звезде, а в некоторых побочных, энергия для которых берется из общего запаса, накопленного ранее. Такие энергозатратные процессы идут медленно, и

потому элементов, тяжелее «железной группы», в природе очень мало.

Что же происходит со звездой, исчерпавшей все запасы термоядерного топлива? Строго говоря, такого никогда не произойдет: топливо (водородное, гелиевое, углеродное и т.д.) будет исчерпано только в центре, где температура была достаточно высокой. В средних и приповерхностных слоях звезды сохраняются огромные запасы ядерного горючего, которые только ждут своего часа (когда температура возрастет), чтобы вспыхнуть и не пропасть даром. Но для ядра звезды может действительно наступить момент, когда все легкие ядра в нем «сожжены», вещество состоит в основном из ядер железной группы и термоядерная энергия больше не выделяется. Эволюционная фаза красного гиганта на этом заканчивается, он должен превратиться в звезду совершенно другого типа.

Этот переход неоднозначный. «Выбор пути» зависит от массы звезды. Если она сравнительно небольшая ($< 1,4 M_{\odot}$), звезда, сбросив внешние слои, гравитационно слабо связанные с центральным ядром, станет белым карликом — компактной звездой размером с планету (10^{-3} солнечного радиуса) и чрезвычайно высокой плотности (10^5 — 10^8 г/см³). Это, по сути, ядро красного гиганта на последней стадии эволюции, в котором топливо полностью выгорело и выделение энергии прекратилось. Но за счет накопленного тепла и благодаря малой поверхности звезда еще долго ($\sim 10^8$ лет) будет излучать, постепенно угасая, пока не станет черным карликом — невидимым звездным огарком. Сброшенный внешний слой красного гиганта, первое время образующий газовую туманность, постепенно растворится в окружающем пространстве.

Более драматичен эволюционный путь массивной звезды ($M > 1,4 M_{\odot}$) — она станет Сверхновой — колоссальным взрывом, вызванным потерей звездной устойчивости в результате прекращения термоядерных реакций и резкого уменьшения в центральной зоне давления газа, противостоящего силе притяжения. Произойдет гравитационный коллапс (неудержимое падение вещества на центр), быстрый разогрев всей звезды и детонация ядерного «топлива», сохраненного на периферии. Огромные массы вещества выбрасываются в окружающее пространство, образуя характерную расширяющуюся туманность, состоящую из газа, плазмы, магнитных полей и потоков частиц. В центре туманности — плотный остаток ядра вспыхнувшей звезды — нейтронная звезда или черная дыра. Нейтронная звезда образуется в том случае, если масса

коллапсара не превышает $\sim 4M_{\odot}$ (расчет по ОТО). Более массивная звезда превращается в черную дыру — ненаблюдаемый объект, излучение которого не может вырваться из гигантского гравитационного потенциала, и потому ставшего невидимкой для внешнего наблюдателя. Эти компактные образования, релятивистские звезды, привлекают большое внимание из-за своих парадоксальных свойств. Нейтронные звезды, существование которых в 1930-х гг. было теоретически предсказано В. Бааде, Ф. Цвикки и Л. Ландау, в наблюдательном плане — вполне «респектабельные» объекты. Они регистрируются как пульсары — источники пульсирующего излучения, чаще всего в интервале радиоволн, но иногда в более высоких энергиях (оптика, рентген, гамма-излучение). Черные дыры предсказаны Эйнштейном, а само понятие введено в 1938 г. Робертом Оппенгеймером. Они до сих пор являются загадкой. Есть десятка два объектов, подозреваемых в том, что они звезды, сжавшиеся в результате коллапса до «невидимого состояния», кандидаты в эволюционные черные дыры. Однако нет полной гарантии, что они действительно такие. Крайне сложно наблюдать «невидимки»! Судить об их присутствии можно только по косвенным признакам, например, по притяжению обычных звезд, находящихся рядом. Так выделяют черные дыры в двойных звездных системах.

Ограничимся сказанным и не будем больше касаться этой интересной темы просто потому, что к Солнцу она не имеет прямого отношения. Гравитационный потенциал нашей звезды мал, релятивистская поправка не превышает 10^{-6} . Известно три наблюдаемых эффекта, рассмотренные Эйнштейном еще при создании ОТО, связанные с релятивистской поправкой: смещение перигелия Меркурия (22 угл. с за 100 лет), отклонение луча света вблизи солнечного края (19 угл. с) и красное смещение линий излучения в спектре Солнца. Указанные поправки очень малы, но были измерены. Они в точности совпали с предсказанными значениями. К настоящему времени проверен десяток релятивистских эффектов у звезд с более высоким гравпотенциалом — и все они находятся в полном согласии с ОТО.

Эволюционный путь Солнца

Солнце — молодая звезда, находящаяся на начальном этапе эволюции. Запасов водорода хватит, чтобы безбедно жить за счет

термоядерного «горения» еще 100 млрд. лет. Но уже через 10 млрд лет внешний вид звезды сильно изменится. Размер увеличится, цвет сместится в красную сторону спектра — звезда станет красным гигантом. Как будто владыка чем-то недоволен. Но гневаться Солнце может только потому, что водорода в центре останется совсем немного и придется пускать в ход периферические запасы, а потом «сжигать» накопившийся гелий.

Страшнее внешних проявлений будет в сотни раз возросшая светимость звезды, которая превратит в ад планеты вплоть до Юпитера. Человечеству надо будет перебираться на спутники тяжелых планет. Вместе с увеличением светимости сильно возрастет активность Солнца. На смену солнечным вспышкам наших дней придут более мощные вспышки, разрушительные последствия которых будут очень велики.

Солнце никогда не станет Сверхновой, но даже «мирный» переход красного гиганта в фазу белого карлика будет воспринят как вселенская катастрофа. Сброшенные внешние слои взорвутся по Солнечной системе раскаленным смерчем, воздействуя на атмосферы планет, испаряя океаны и полярные шапки. Да и сам белый карлик при своем появлении будет далеко не мирной звездой — горячей, сильно переменной, с частыми термоядерными взрывами на поверхности. Вряд ли удастся пережить грядущие потрясения. Лучше заранее покинуть Солнечную систему и поселиться, если позволят средства, у ближайшей звезды, где найдется подходящая для жизни планета. К тому времени технические возможности межзвездных перелетов и информация о планетных системах будут, конечно, доступны.

Возможно, заглядывать так далеко рановато: реальная угроза увеличения солнечной светимости возникнет только через миллиарды лет. Но уже сейчас появляются проекты спасения Земли! В журнале «Astrophysics and Space Science» американские астрономы предложили план, заключающийся в том, чтобы заранее постепенно смещать земную орбиту в сторону от Солнца. Для этой цели предлагается использовать один из астероидов пояса Койпера (см. раздел «Периферия Солнечной системы»), расположенного за Плутоном. Если астероид толкнуть внутрь Солнечной системы (очевидно, с помощью направленного взрыва) так, чтобы проходил близко от Земли, то своим притяжением он начнет смещать Землю, раз за разом увеличивая ее орбиту. При правильном выборе траектории он будет проходить мимо Земли с периодом ~ 6000 лет и

за положенный срок сместит земную орбиту на безопасное расстояние. Произойдет постепенный плавный переход Земли на все большее удаление от разгорающейся звезды, так что освещенность планеты практически не изменится и земной климат сохранится. У этого фантастического проекта есть и существенные минусы. Что станет с Луной? Не будет ли она нами потеряна? Жаль лунных ночей, но что поделаешь. Что будет с собственным вращением Земли? Расчеты показывают, что его скорость возрастет и сутки сократятся до нескольких часов. Тоже не хорошо, хоть и не смертельно. Более опасно — не полетит ли астероид в результате неточности взрыва не так, как надо, например, прямо на нас? Смогут ли земляне управлять астероидами с такой же точностью, как сейчас мячиками для гольфа?

Основной вывод, к которому приводят СМС и эволюционный путь, состоит в том, что Солнце — достаточно мирная, спокойная звезда. Ее медленная эволюция дает нам возможность приспособиться к изменениям и выбрать наилучшую стратегию выживания.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Энергия, вырабатываемая Солнцем, питает всю Солнечную систему. По современным представлениям центральная звезда, планеты и малые тела (астероиды, кометы, метеориты) возникли одновременно из сжимающегося, в результате потери гравитационной устойчивости, газопылевого облака. Есть указание, что сжатие облака способствовала вспышка близкой Сверхновой, определившая также химический состав элементов. Солнце и все тела Солнечной системы имеют полный набор атомов и ядер, существующих в природе. Нам опять повезло — мы живем не у звезды первого поколения, состав которой очень беден, так как еще не успели образоваться многие элементы, а возле молодой звезды n -го поколения, вобравшей в себя все обилие Периодической системы. Первоначально тела Солнечной системы, включая и саму звезду, имели одинаковый химический и изотопный состав. Планеты и астероиды этот состав сохранили, Солнце, где уже 4,7 млрд лет идут реакции термоядерного синтеза, его существенно переработало. На основе этого было получено еще одно доказательство термоядерного источника энергии.

Изотопный состав углерода и азота

В реакциях и распадах CN-цикла участвуют изотопы углерода и азота. Хотя эти реакции протекают в центре Солнца, благодаря перемешиванию вещества, особенно сильному в конвективной зоне, за прошедшие миллиарды лет переработанный состав по С и N должен был появиться на фотосфере. Это можно увидеть по линиям углерода и азота в спектре солнечного излучения, что позволяет современная спектроскопия. С другой стороны, мы хорошо знаем изотопный состав С и N на Земле, где он первичен и не изменился за прошедшее время. Сравнение показало, что солнечный и земной составы существенно различаются. Чтобы объяснить различие, проделали следующий компьютерный эксперимент. Зная температуры реакций CN-цикла, провели его моделирование в условиях центральной зоны Солнца (температура, давление, плотность), взяв в качестве начального земной состав:

$$^{14}\text{N}/^{12}\text{C} = 3, \quad ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 90, \quad ^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 270 \quad (5)$$

(указаны весовые отношения изотопов). «Включив» реакции CN-цикла на условные 100 млн лет, получили измененный состав:

$$^{14}\text{N}/^{12}\text{C} = 20, \quad ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 4, \quad ^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 3000, \quad (6)$$

который в точности соответствует сегодняшнему солнечному составу. Термоядерный источник наглядно проявил себя.

Возраст Солнца

Возраст Солнца можно определить по распаду радиоактивных ядер, но, строго говоря, не из состава солнечного вещества (оно до сих пор недоступно, ни один космический аппарат на Солнце не летал), а по анализу лунных пород и метеоритов. Здесь опять используется предположение, что вся Солнечная система возникла одновременно с центральной звездой.

Радиоактивный распад происходит по простой, проверенной многими экспериментами формуле:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

где N_0 — начальное число ядер, $N(t)$ — их количество через время t , λ — постоянная распада, не зависящая от внешних условий и определяемая только свойствами ядра. Радиоактивный распад является уникальными часами, которым не требуется постоянный за-

вод, которые никогда не уходят и не отстают. К тому же природа создала большое разнообразие «радиоактивных часов» — на разные временные шкалы и различные условия хронометража. Экспериментально было показано, что формула (7) справедлива при длительных измерениях, продолжительностью в сотни периодов распада $\tau = 1/\lambda$.

Самый простой способ измерения возраста состоит в определении начального N_0 и конечного $N(t)$ числа радиоактивных ядер с известной постоянной λ в изучаемом образце. Можно поступать по-другому: находить не число оставшихся радиоактивных ядер, а число накопленных дочерних, равных числу распавшихся $N_{\text{рас}} = N_0(1 - e^{-\lambda t})$. Были использованы оба метода.

Определение возраста Солнца свелось к нахождению самых древних, первичных пород. Оказалось, на Земле они не сохранились — вследствие постоянной тектонической и сейсмической активности, разрушавшей старые минералы. Более древними оказались породы, доставленные с Луны. Но наиболее точный результат был получен по анализу метеоритов, оказавшихся лучшими хранителями первичных пород.

Надежные измерения дал уран-свинцовый метод, который по временной шкале наиболее соответствовал измеряемому возрасту Солнца. Рассматривались цепочки распадов, начинающиеся с изотопов урана ^{238}U и ^{235}U и заканчивающихся стабильными изотопами свинца. Первый (среднее время жизни $\tau = 6,5$ млрд лет) дает цепочку распадов, приводящих к ^{206}Pb , второй ($\tau = 1$ млрд лет) — к ^{207}Pb . Как эталон сравнения брался нерадиоактивный (не связанный с распадом) изотоп ^{204}Pb . Измеренные количества трех изотопов свинца, полученные для метеоритов разного состава (железистых, хондритов и ахондритов), определили время накопления, которое оказалось равным $t_{\text{мет}} = 4,55$ млрд лет.

Для получения окончательного результата надо ввести небольшую поправку. Дело в том, что $t_{\text{мет}}$ представляет собой время накопления свинца в твердых минералах. Не исключено, что какое-то время вещество Солнечной системы было в жидкой или газообразной форме. Для измерения этого времени отвердевания была использована «короткая шкала» радиоактивности (по изотопам йода ^{129}I и плутония ^{244}Pu). Время отвердевания метеоритов оказалось сравнительно коротким $t_{\text{от}} = 100$ млн лет, а полный возраст Солнца, стал

$$t_{\text{с}} = t_{\text{мет}} + t_{\text{от}} = (4,7 \pm 0,1) \text{ млрд лет.} \quad (8)$$

Проведенные измерения, полученные надежным и физически ясным способом, один из главных результатов космохронологии, науки о временных вехах нашего мира.

Другая важная веха — возраст Галактики, равный $t_f = 15$ млрд лет, тоже получена с помощью радиоактивного распада — по ядрам уран-ториевой шкалы. Этот результат, однако, не столь надежен из-за некоторых модельных предположений. Сравнения t_f и t_c показывает, что к моменту рождения Солнца Галактика уже существовала 10 млрд лет — достаточный срок для образования, эволюции и взрыва массивных звезд, которые и обогатили межзвездный газ всеми химическими элементами. Получено также независимое свидетельство эволюционной молодости нашей звезды. Солнце прожило только 5 % своего ресурсного времени, определяемого запасами водородного топлива. Измеренный возраст Солнца стал одним из точных солнечных параметров, положенных в основу СМС.

Периферия Солнечной системы

Большой интерес вызывают не только исследования самого Солнца и внутренних частей Солнечной системы, но и ее далеких границ. Как далеко простирается влияние нашей звезды?

Девятая планета Плутон находится на радиусе 39,5 АЕ, и нет никакой уверенности, что она действительно «крайняя» и за ее орбитой ничего нет. Скорее всего, это лишь временная граница Солнечной системы, за которой простирается неисследованное «дикое поле», которое, по мере проникновения в него космических аппаратов, раскрывает свою завесу и приобщается к солнечному хозяйству. Орбиту Плутона пересекли четыре космических корабля: два «Пионера» и два «Вояджера» (США, НАСА), и, двигаясь со скоростью 10 — 20 км/с, продолжают углубляться в «дикое поле». Со всеми, кроме «Пионера-11», поддерживается связь. Их радиосигналы идут на Землю 8 — 11 ч — так далеко они ушли. На 2001 г. они находились на расстояниях: «Вояджер-1» — 81,6 АЕ, «Пионер-10» — 78,1 АЕ, «Вояджер-2» — 64,4 АЕ и продолжают передавать сообщения о параметрах солнечного ветра, солнечной радиации и собственном состоянии.

Плутон — пока самая далекая планета. Открытая в 1930 г. американским астрономом К. Томбо (по отношению в движении ближайшего соседа — Нептуна) эта дальняя родственница Земли ока-

залась несколько странной. Она легчайшая из планет, масса в 500 раз меньше, чем у Земли. В то время, как остальные планеты движутся по практически круговым орбитам, орбита Плутона заметно эллиптическая (эксцентриситет $\varepsilon = 0,25$). И в довершение всего наклон орбиты к эклиптике (плоскости солнечного экватора) намного больше, чем у других планет (17°). Указанные особенности списывали на удаленность планеты — что поделаешь, она такая особенная, потому что очень далекая.

Сейчас, когда средства наблюдения стали намного точнее, к странностям Плутона добавились новые, которые показали, что не все так просто. За орбитой Нептуна было открыто большое число объектов (типа астероидов), совокупность которых получила название пояса Койпера. Среди них встречаются и тела, испускающие газы и пыль, похожие на кометы. Физическая природа объектов плохо изучена (по причине большой удаленности), но можно утверждать определенно — их очень много. Насчитывают более 300, а по косвенным оценкам — многие тысячи. Пояс Койпера — вторая совокупность малых планет в Солнечной системе, причем более многочисленная, чем известный пояс астероидов, расположенный между Марсом и Юпитером. Плутон и его спутник Харон — самые крупные объекты пояса Койпера, но в остальном ничем не отличающиеся от них.

Установлено, что отношение орбитальных периодов Нептуна и Плутона равно в точности $2/3$. Гравитационное воздействие массивного Нептуна на крошку Плутона, сильное само по себе, резонансно возрастает при целочисленном отношении периодов. Можно заключить, что Плутон — это осколок первичного протопланетного вещества, захваченный и удерживаемый Нептуном, его «кавказский пленник». И, как оказалось, не один: с тем же отношением орбитальных периодов найдено еще несколько малых тел, составивших группу так называемых «плутино».

Вновь обнаруженные особенности не могут не повлиять на статус Плутона как равноправной планеты. Скорее всего, он таковой не является. Но не так важно, как его называть. Важнее другое: то, что считалось краем Солнечной системы — вовсе не ее конец. Проникающая способность современных телескопов позволяет исследовать отдаленные объекты, о существовании которых раньше не подозревали, и обнаруживает их большое разнообразие. По косвенным данным (которые всегда предшествуют прямым наблюдениям) на еще большем радиусе может находиться планета с

массой в несколько юпитерианских масс (!) и периодом обращения в миллионы лет. Периферия Солнечной системы способна преподнести немало сюрпризов. Вот почему НАСА пересмотрело свои планы и отдало приоритет эксперименту «Pluto-Kuiper Express», главная цель которого — исследование Плутона и объектов пояса Койпера (запуск аппарата в ближайшее время).

В 2005 г. американская группа сообщила о наблюдении слабой звездочки, перемещающейся на фоне неподвижных звезд, что указывало на ее близкое расположение. Это, конечно, не звезда, а новый объект Солнечной системы. Его стали наблюдать во многих обсерваториях и по измеренному смещению быстро нашли все параметры орбиты, по которым точно определяется расстояние от Солнца, размеры и масса. Выяснилось, что он наблюдался еще в 2003 г. и тогда ему было дано название UB-313. По размерам и массе «новичок» намного крупнее астероидов и вполне годится в планеты — диаметр 3000 км, масса более двух масс Плутона. Однако его орбита, вытянутый эллипсоид ($\epsilon = 0,46$), очень отличается от планетных орбит. В апогее он уходит на расстояние 97 АЕ от Солнца, в перигее, где его наблюдают сейчас, находится на ~ 50 АЕ. По этому параметру объект, скорее, следует считать крупным астероидом. И все же по началу его признали планетой и дали имя Ксена.

В 2006 г. очередная сессия Международного астрономического союза (МАС) обсуждала вопрос о статусе Ксены, а заодно и Плутона, и всех «плутино». Была выработана новая классификация планет и астероидов, по которой Плутон и Ксена попали в разряд крупных астероидов и, таким образом, число планет Солнечной системы сократилось до восьми, но увеличилось число астероидов. С этим решением сразу же не согласились многие видные астрономы, не присутствовавшие на сессии. Вопрос о составе Солнечной системы «повис в воздухе» и будет решаться на новой сессии МАС.

Независимо от того, какой статус будет приписан Ксене, ее открытие, несомненно, важный шаг в изучении ближнего космоса. Солнечная система не исчерпывается старыми планетами и за орбитами Нептуна и Плутона может находиться «много чего нового». Периферия Солнечной системы — это не только далекие планеты и астероиды, но и солнечный ветер, прослеживаемый до расстояния ~ 100 АЕ, и Облако Оорта — сферический резервуар комет, заполняющих пространство 10^3 — 10^5 АЕ от Солнца. Фактически на таком удалении, равном половине расстояния до ближайших звезд,

должно закончиться воздействие Солнца на окружающее пространство. Дальше простирается межзвездная среда, область приложения совсем других сил. Таким образом, настоящие наши знания касаются лишь очень малой части (по объему одной миллиардной) той области, которую называют гелиосферой. Можно представить, сколько открытий ждут первопроходцев этой космической Ойкумены.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Солнечной активностью (СА) называют совокупность явлений, наблюдаемых на фотосфере, в атмосфере и короне звезды — от грануляции (ячеистой структуры) солнечного диска и темных пятен до мощных хромосферных вспышек и гигантских выбросов солнечной плазмы. Все это — проявление гидродинамических процессов, происходящих во внешней конвективной зоне, где бурлящие потоки плазмы вырываются на свободу, перенося энергию, добытую в термоядерном солнечном реакторе. СА не постоянна, как солнечная светимость, она проявляется циклами, отражающими переменный характер процессов в конвективной зоне.

ПРОЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Новый цикл солнечной активности начинается с появления темных пятен в обоих полушариях на средних широтах ($\pm 30^\circ$) (пятна старого цикла могут быть еще видны вблизи экватора). Число пятен возрастает, появляются пары пятен с разной полярностью магнитного поля, происходит их дрейф в сторону экватора. Пятна недолговечны, время их жизни имеет большой разброс (от часов до десятков дней). По мере возрастания числа пятен они группируются в активные области, где соседствуют разнополярные пятна. Их число, достигнув некоторого максимума, со временем начинает убывать. Цикл завершается, когда на средних широтах появляются новые молодые пятна.

Солнечную активность характеризуют числами Вольфа $W = 10g + f$, где g — число групп пятен и одиночных пятен, f — полное число пятен. Анализ солнечных данных стал проводиться с 1749 г., тогда же начался отсчет циклов СА. Среднее время между двумя минимумами составляет 11,1 лет, однако длительность циклов сильно варьирует (от 7 до 17 лет).

Кроме темных пятен внешним проявлением СА являются фотосферные факелы — светлые волокнистые образования вокруг пятен, факельные площадки, простирающиеся от фотосферы до верхней хромосферы, где их размер достигает 15 тыс. км, водородные флоккулы, создающие розовое свечение хромосферы, протуберанцы — облака вещества, поднимаемые в корону и удерживаемые длительное время (до месяцев) магнитными силовыми линиями. В протяженной короне, очень разреженной внешней области солнеч-

ной атмосферы, в максимуме СА увеличивается число корональных конденсаций (температура T до 10^7 К), более ярких, чем окружающая корона ($T = 2 \cdot 10^6$ К). Большое разнообразие деталей на фотосфере, в атмосфере и короне показывает сложный характер поведения горячей плазмы, ее неустойчивости, генерации в ней колебаний разных типов (звуковых, плазменных, ионных).

Наиболее яркое проявление СА — хромосферные вспышки, наблюдаемые как резкое повышение свечения активной области, длящееся десятки минут, практически во всех диапазонах электромагнитных волн (от длинноволнового радио-излучения до гамма-квантов высокой энергии). Энергия вспышки 10^{28} — 10^{32} эрг.

Солнечные циклы

Так Солнце ведет себя в течение многих лет (рис. 8) с хорошо известной цикличностью, усредненное по всем циклам значение периода которой равно 11 лет. В минимуме число пятен не более десятка и мощных вспышек почти нет, в максимуме — пятна исчисляются сотнями, лик светила напоминает человека, больного оспой, а в группах пятен часто и непредсказуемо происходят вспышки. В настоящее время установлено, что СА связана с поведением горячей плазмы в конвективной зоне. Восходящие из глубины бурные потоки водородно-гелиевой плазмы, увлекаемые еще и вращением солнечного шара (период на экваторе — 25 дн.), порождают общее магнитное поле Солнца и локальные магнитные поля групп пятен, которые превышают общее поле в тысячи раз. Генерация магнитных полей описывается динамо-механизмом, предложенным американским физиком Е. Паркером еще в 1950-х гг. Согласно теории, 11 лет — это время переполюсовки общего магнитного поля Солнца, когда его магнитные полюса, расположенные вблизи гелиографических, меняются местами, а удвоенный, 22-летний, интервал будет периодом возврата магнитного поля в исходное состояние. Со временем теоретические расчеты существенно продвинулись, но до сих пор носят качественный характер и многие явления в конвективной зоне, хромосфере и солнечной короне остаются непонятными, не вытекающими из общей концепции динамо-механизма.

Почему цикл длится 11 лет и наблюдается большой разброс отдельных циклов? Как объяснить нагрев короны, температура которой $2 \cdot 10^6$ К, расположенной над более холодной фотосферой (температура $6 \cdot 10^3$ К)? Можно ли представить, чтобы холодное тело передавало тепло горячему?

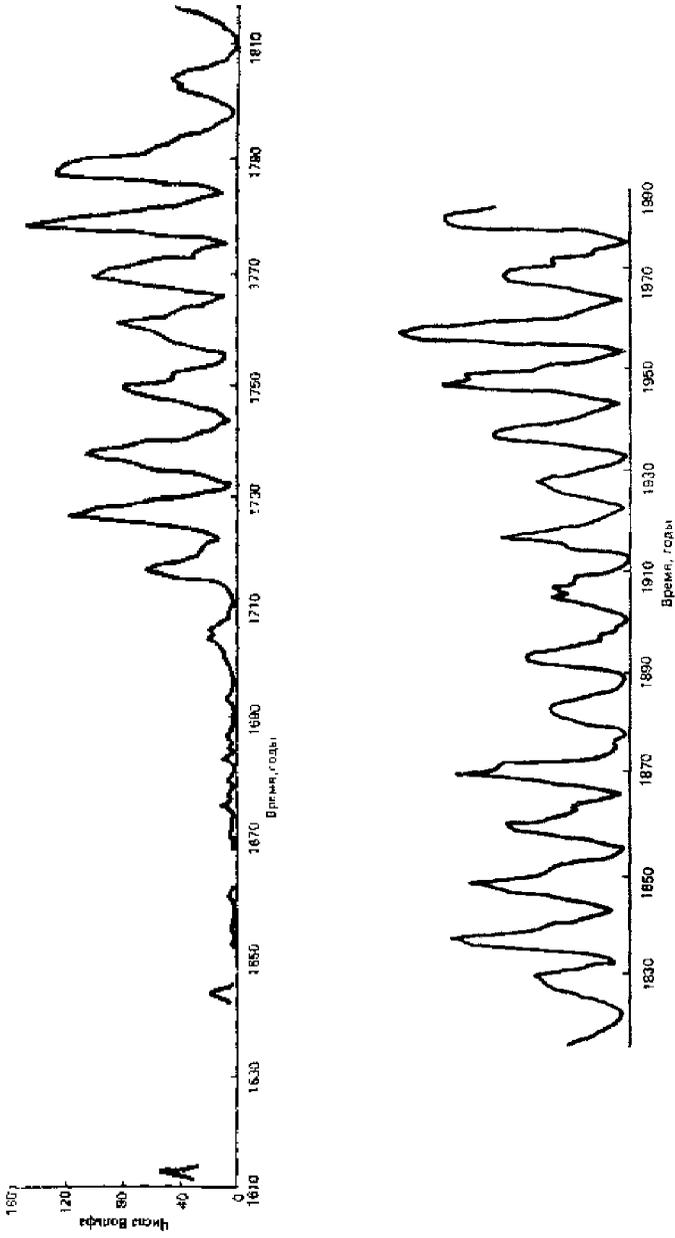


Рис. 8. Циклы солнечной активности

Непредсказуемы мощность и момент возникновения солнечной вспышки, представляющей серьезную опасность, особенно для космонавтов во время работ в открытом космосе. SA настолько сложный, запутанный клубок плазменных явлений, что распутать его с помощью одной, даже очень хорошей, теории, по-видимому, невозможно. Нужны новые точные наблюдения, которые снабдили бы гелионауку достоверными данными и способствовали более глубокому пониманию SA

Маундеровский минимум

Годы 1640 — 1720 известны как Маундеровский минимум (по имени немецкого астрофизика Е. Маундера, впервые отметившего это удивительное явление). В течение 80 лет не наблюдалось цикличности SA (см. рис. 8), на Солнце появлялось два-три пятна вместо десятков и сотен в «нормальное» время. Тогда же почти исчезли полярные сияния и в Европе отмечались очень холодные зимы. Замерзло Северное море, обычно прогреваемое Гольфстримом и круглый год открытое для судоходства. Наглядное свидетельство тому — картины голландских мастеров: массовые катания на коньках по морскому льду. В Лондоне замерзала Темза, и вошло в привычку устраивать праздничные гуляния и ярмарки на реке. Что-то необычное происходило с Солнцем, что влияло не только на его внешний вид, но и на земную погоду.

Оставалось все же некоторое сомнение в истинных размерах Маундеровского феномена. Не является ли он иллюзорным, вызванным неполнотой наблюдений в те далекие времена, когда Солнцу доверяли и не держали постоянно «под колпаком». Вот тут очень помогла ревизия архивов Парижской обсерватории, относящихся ко времени правления Людовика XIV (1643 — 1715), проведенная в наше время. Обсерватория была учреждена указом короля специально для наблюдений за Солнцем. Король-Солнце был к Солнцу явно неравнодушен. Королевский астроном, выполняя волю монарха, в течение 30 лет изо дня в день вел солнечный дневник, отмечая все на солнечном диске. Это скромное монаршее увлечение позволило в наши дни открыть одну из интереснейших загадок в науке. Минимум Маундера был не только подтвержден, но оказался более глубоким, чем представлялось ранее. Всего за пару

лет хорошо отлаженный механизм солнечных циклов сменился полным «застоем» и так же неожиданно вышел из «спячки», будто ее вовсе не было. И еще одна интересная деталь. Педантичный астроном регулярно снимал мерку с Солнца, измеряя его видимый диаметр. Хотя верность измерения не была так точна, как на современных ПЗС-матрицах, удалось установить, что Солнце в «застойное время» было больше теперешнего на 0,0001 своего диаметра. Представляется такая картина: силовые линии новых магнитных потоков, выходящих из солнечных глубин, с которыми связывается появление темных пятен, сдерживались какими-то силами под фотосферой, но упорно рвались наружу.

Маундеровский минимум не одинок. Археологические «раскопки» (по историческим свидетельствам) показывают, что еще раньше были аналогичные «провалы» числа W — минимумы Шперера (1416 — 1534) и Вольфа (1282 — 1342) (рис. 9). SA и тогда проявляла резкие спады. Есть сведения (менее определенные, получаемые по кольцам деревьев) об еще более далеких, уходящих в тьму веков, «провалах» SA. Похожие явления наблюдаются у вспыхивающих звезд, мощность вспышек которых намного превышает солнечную. Такие звезды встречаются в нашей части Галактики на расстояниях до 100 пк, что существенно расширяет возможности исследования этого явления.

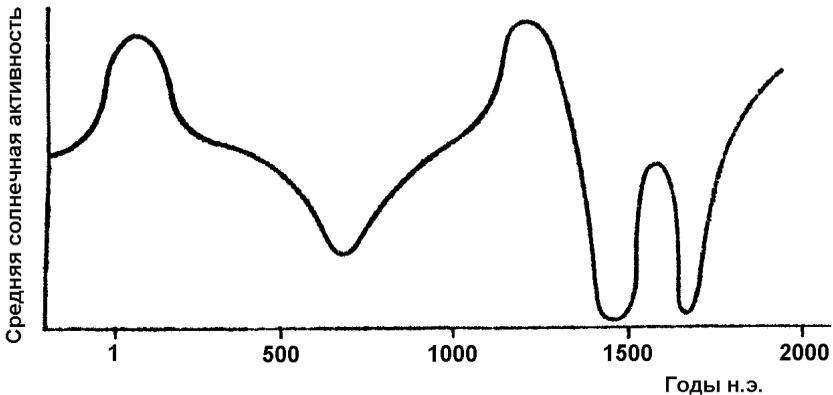


Рис. 9. Средние значения солнечной активности за последние 2000 лет

По современным представлениям, во время Маундеровского минимума на Солнце произошла смена динамо-механизма, на другой, более умеренный способ генерации магнитного поля, приводящий к ослаблению локальных полей и замедлению реверса общего магнитного поля звезды. Активность Солнца обусловлена внешней конвективной зоной, толщиной 200 тыс. км, где образуются восходящие турбулентные потоки горячей плазмы. Солнце вращается не как твердое тело, а как газовый шар с проскальзыванием и вязкостью (дифференциальное вращение). Сочетание конвективных плазменных потоков с дифференциальным вращением приводит к генерации переменного магнитного поля, имеющего сложную структуру. Однако полного понимания процессов, протекающих в конвективной зоне, до сих пор нет. Какие поля под фотосферой, какова их конфигурация и величина точно не известно. Приходится больше полагаться на наблюдения. В этом плане исследование Маундеровского минимума ценно тем, что оно выявило недостатки динамо-механизма и может указать, как его дополнить.

Исследования позволили полнее понять ритмику Солнца. Кроме хорошо выделенного 11-летнего периода, проявляется еще один — 100-летний. С вековой цикличностью происходят изменения амплитуд циклов. Солнце как бы, потрудившись сполна век, берет тайм-аут, чтобы набраться сил. Однажды, в Маундеровском минимуме (XVII — XVIII вв.) ему это удалось. В конце XVIII — начале XIX вв. оно сделало новую попытку, заметно сбавив высоту циклов (минимум, в случае успеха, мог бы быть назван Наполеоновским). Следующий спад — в конце XIX — начале XX вв. — еле заметен. Что случится сейчас, на стыке XX и XXI вв.? Не предпримет ли звезда очередную попытку «перестроиться»? Если принять во внимание «минимумы» Шперера и Вольфа, «перестройки» случаются в среднем раз в 200 лет. После Маундеровского минимума прошло почти 300 лет. Самое время трудяге Солнцу взять очередной тайм-аут. Если это произойдет, мы станем свидетелями крупного космического события — достаточно мирного (раньше его успешно пережили), хоть и несколько неудобного (холодные зимы в течение десятилетий). Может быть, это подстегнет ученых и они смогут, наконец, ответить — что же происходит с любимой звездой, когда на ней исчезают пятна?

А судьи кто?

Солнечники и геофизики встретили максимум 23-го цикла (2000 — 2001) с большими ожиданиями, готовыми к подробным наблюдениям за звездой. Космические аппараты более предпочтительны, чем наземные, так как позволяют измерять весь спектр солнечного излучения (значительная часть ультрафиолета, весь рентген и гамма-излучение «срезаются» земной атмосферой, не говоря уже о невозможности регистрации на Земле потоков плазмы и ускоренных частиц). Готовность следить за Солнцем означала, в первую очередь, вывод на орбиту специализированных спутников, несущих детекторы различных излучений. Никогда еще на Солнце не было устремлено столько зорких глаз.

Несколько лет ведет наблюдения за Солнцем орбитальный телескоп HINATORY (Япония) в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Поскольку солнечная корона излучает рентген, данные этого аппарата позволяют следить за изменениями ее плотности и температуры. Особый интерес представляют «корональные дыры» — обширные области с низкой плотностью.

Ведет наблюдения японский солнечный телескоп YONKON — в ультрафиолетовой части спектра, что наиболее интересно во время повышенной солнечной активности.

Выведен на орбиту для изучения Солнца российско-украинский аппарат КОРОНОС-Ф, несущий детекторы солнечного излучения от радиоволн до гамма-квантов, измерения состава и интенсивности солнечного ветра, потоков солнечных космических лучей, наблюдения колебаний солнечной поверхности. Особое внимание уделяется рентгеновскому и гамма-излучениям солнечных вспышек.

Особое место среди орбитальных аппаратов, выведенных для наблюдений за активным Солнцем, занимают SOHO и TRACE (НАСА, ЕСА). Они оснащены высокочувствительными детекторами, во много раз превосходящими по пространственному и энергетическому разрешению, быстродействию и объему информации другие аппараты. Измерения проводятся в узких оптических линиях, испускаемых возбужденными ионами хромосферы и короны. Так как возбуждение существенно зависит от температуры, высотный профиль которой хорошо известен, каждая линия «приписана» к определенному интервалу высот в атмосфере. Наблюдения в разных линиях позволяют исследовать процессы, протекающие на разных

высотах, и получать высотные «срезы» Солнца от фотосферы до короны.

TRACE (Исследователь переходной области и короны) нацелен на среднюю область солнечной атмосферы и протяженную корону. Переходная область, пожалуй, самая малоизученная. Через нее осуществляется связь между фотосферой и короной. SOHO (Солнечная и гелиосферная обсерватория) имеет более широкий охват наблюдений — от основания фотосферы через атмосферу до дальних областей, где «дует» солнечный ветер. Главная задача — найти истоки «ветра», проследить его начальный разгон и последующее затухание в межпланетном пространстве.

Новые результаты

Наблюдения Солнца в 23-м цикле дали уникальные результаты, позволяющие по-новому взглянуть на солнечную активность.

Инструменты SOHO впервые зарегистрировали вихри и струйные течения плазмы под фотосферой, показавшие, что в верхней части конвективной зоны возможны не только неупорядоченные движения вещества, но и коллективные направленные перемещения. Наблюдения SOHO смогли проследить зарождение солнечного ветра. Считалось, что ветер срывается с горячей короны, являясь как бы ее продолжением. Это оказалось неверным. Его истоки гораздо глубже — в корональных дырах. Он выходит из пор фотосферы, «прорастая, как трава сквозь щели мостовой», по образному выражению наблюдателей. Вначале сравнительно медленный (~ 10 км/с) солнечный ветер, пройдя корону, разгоняется до ураганных скоростей (400 км/с).

Но главным открытием станции SOHO стало обнаружение сети магнитных силовых линий, связывающих фотосферу с короной, — той ожидаемой связи между удаленными областями солнечной атмосферы. Осенью 1997 г. приборы впервые увидели эту сеть переплетающихся магнитных полей — пышный «магнитный ковер» толщиной 2000 км (рис. 10), в котором постоянно происходят пересоединения силовых линий, сопровождающиеся вспышками «короткого замыкания», образованием атмосферных токов и выделением тепла. Не это ли искомый механизм нагрева солнечной короны?

Открытие SOHO поддержал вышедший на орбиту TRACE. Ведя непрерывные наблюдения переходной области (с частотой один кадр за несколько секунд), он получил неоспоримые свидетельства

процесса пересоединения магнитных силовых линий, когда две сталкивающиеся магнитные петли перезамыкались, принимая более простую конфигурацию. В результате энергия магнитного поля переходила в тепловой нагрев плазмы. Происходила короткая мини-вспышка, и непрерывная череда таких вспышек, каждую из которых в отдельности трудно заметить, является энергетическим источником нагрева короны. Процесс, который солнечная физика искала давно, наконец, найден. Имя ему — постоянная аннигиляция локальных магнитных полей в солнечной атмосфере.

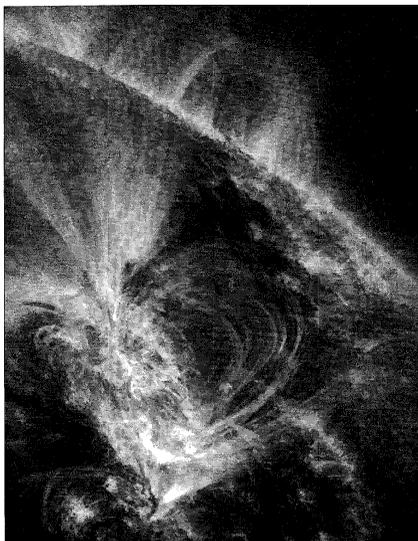


Рис. 10. Солнечная активность, ковер магнитных силовых линий (снимок спутника TRACE)

Американский космический аппарат POLAR, наблюдавший за верхними слоями земной атмосферы в приполярной области, зарегистрировал крупный снос ионосферы (сотни тонн) в результате прихода солнечного коронального выброса и подтвердил прямое воздействие СА на Землю. Если бы выбрасывался нейтральный газ, случилась катастрофа — Земля быстро потеряла бы свою атмосферу. Но у Земли есть щит — ионосфера, и выбрасывается газ ионов. Это спасает нас: заряженные ионы, плененные магнитным полем Земли, не могут уйти далеко и через некоторое время возвращаются обратно.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Солнце — спокойная звезда. Поток солнечной энергии на орбите Земли $0,14 \text{ Вт/см}^2$ называют солнечной постоянной — он, действительно, постоянен с точностью до 0,1%. Зато весьма переменна солнечная активность — цикличность чисел Вольфа W , числа темных пятен на диске звезды.

Темные пятна и активные области

Впервые пятно на диске заметил Галилей в 1610 г., направив на Солнце свой телескоп. Сохранились, правда, ранние свидетельства, что, глядя на Солнце сквозь дым, наблюдали пятна на «божественном лице», которые, видимо, что-то предвещали. В наше время отношение к солнечным пятнам нормальное — как к одному из проявлений солнечной активности. Темные пятна (рис. 11) возникают в местах, где на поверхность выходят вновь образованные магнитные силовые трубки. Магнитное поле препятствует теплообмену. Действительно, пятна на 1500 К холоднее фотосферы, средняя температура которой составляет 5800 К. Поэтому они и кажутся темными.

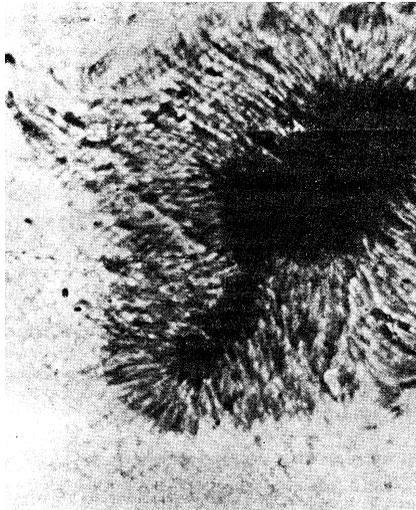


Рис. 11. Фотография солнечного пятна (ГАО АН СССР, 1973 г.)

Магнитные поля на Солнце — это выпущенный на свободу джунгли. Закручиваясь и переплетаясь из-за вращения Солнца, они ведут себя непредсказуемо и весьма бурно. В местах скопления темных пятен (активные области AR), конфигурация поля бывает очень сложной: в тесном соседстве оказываются разнонаправленные магнитные силовые линии. Если расположение пятен быстро меняется, что происходит, когда выходят новые магнитные потоки, поле может скачком измениться. Произойдет пересоединение силовых линий, часть магнитного поля аннигилирует и огромный запас его потенциальной энергии перейдет в кинетическую энергию разлетающейся плазмы и излучения. Происходит взрыв, в результате которого повышается температура, яркость многократно возрастает — наблюдается солнечная вспышка.

Вспышки давно привлекали внимание не только астрономов, занятых чистыми исследованиями, но и геофизиков, космонавтов, радиоинженеров — тех, кто сталкивался с ними как с мощным опасным фактором, влияющим на земное окружение. Вспышки нарушают радиосвязь, вызывают магнитные бури и выбрасывают в космос массы вещества. Откуда черпается энергия вспышки? Можно ли, опираясь на теорию, предсказать момент появления вспышки, чтобы быть готовым к ее последствиям? На эти вопросы пока не получено точного ответа, несмотря на то, что солнечные вспышки исследуются очень давно.

Хромосферные вспышки

Первые свидетельства о вспышках на Солнце относятся еще к дотелескопной эпохе. Серьезные наблюдения начались с 1859 г., когда два астронома, Р. Кэррингтон в Англии и П. Ходжсон в Индии, одновременно зарегистрировали солнечную вспышку, столь мощную, что ее увидели в «белом свете», т.е. без применения специальных светофильтров. Полная энергия вспышки составляла 10^{25} Дж. Чаще происходят более слабые вспышки с энергией 10^{21} — 10^{24} Дж. Они видны только в линиях (наиболее часто в красной линии водорода H_{α} с длиной волны 6562 Å). Наблюдение в линии H_{α} делает более контрастным излучение вспышки на фоне спокойной фотосферы (рис. 12). Организована патрульная служба солнечных вспышек, охватывающая сеть обсерваторий на разных долготах, ведущих непрерывные наблюдения за Солнцем.



Рис.12. Фотография солнечной вспышки в линии H_{α}

Интенсивность вспышек, как и число темных пятен, изменяется циклически с периодом 11 лет. В минимуме цикла число пятен мало и вспышки практически не наблюдаются, в максимуме пятна исчисляются сотнями, а вспышки появляются часто. Наибольшая интенсивность вспышек — в максимуме цикла $W(t)$, но бывают случаи, когда они происходят на подъеме или спаде и даже в минимуме W .

Тайна солнечных вспышек

О хромосферных солнечных вспышках написано очень много. Казалось, их изучили вдоль и поперек. Недавно установили, что Солнце неоригинально и подобные вспышки происходят на других звездах. В наше время к наземным (в оптике и радио) добавились наблюдения со спутников, которые дают сведения в широком спектре электромагнитных волн. Тысячи вспышек занесены в каталоги, где для каждой указаны измеренный балл, гелиографические координаты, интенсивности сопутствующих потоков. Все эти сведения, конечно, способствовали прояснению детальной картины вспышки, но до сих пор ее природа — источник и процесс выделения энергии — остается тайной.

Причина, по-видимому, в том, что оптическое и мягкое рентгеновское излучения вспышки, которые исследовали до сих пор, вторичны. Они лишь тепловой «отклик» солнечной атмосферы на выделяющуюся энергию. Согласно одной из предложенных моделей, вспышка «запускается» пересоединением силовых линий локального магнитного поля AR. Выделившаяся энергия идет на ускорение частиц. В хромосфере, где условия ускорения наиболее благоприятны (из-за малой плотности газа и редкости столкновений), возникают пучки частиц высокой энергии — протонов, электронов, ядер, проходящие через солнечную атмосферу и взаимодействующие с ней (рис. 13). Процессы взаимодействия (детально изученные на ускорителях) приводят к появлению сопутствующего гамма-излучения. По этой модели гамма-лучи, неизбежный спутник энергичных заряженных частиц. Чтобы найти ключ к тайне солнечной вспышки, надо исследовать поток высокоэнергичных гамма-квантов, сопутствующих ей.

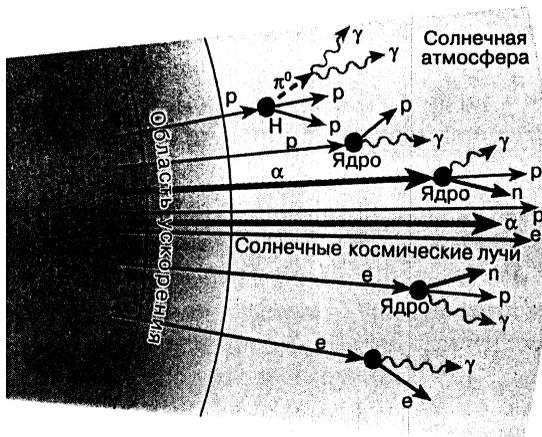


Рис. 13. Схема взаимодействия ускоренных частиц в солнечной атмосфере

Гамма-лучи

Гамма-излучение — самое энергичное в электромагнитном спектре. Электроны в проводнике порождают радиопотоны с энергиями от 10^{-6} до 10^{-3} эВ (соответственно метровые и миллиметровые волны). Переходы между возбужденными уровнями в атомах приводят к испусканию инфракрасных (~ 2 эВ), оптических (~ 4 эВ) и ультрафиолетовых (~ 6 эВ) фотонов. Электро-

ны, бьющие по аноду рентгеновской трубки, генерируют мягкое рентгеновское излучение (порядка кэВ). Энергия атомных ядер в миллионы раз превышает атомные уровни, поэтому ядра способны испускать фотоны с энергиями от десятков кэВ (жесткий рентген) до нескольких МэВ (ядерное гамма-излучение). Гамма-кванты еще больших энергий (> 10 МэВ) образуются при взаимодействии ускоренных пучков с ядрами в процессах тормозного излучения электронов и рождения с последующим распадом нейтральных пионов в протон-ядерных столкновениях. Отличаясь интенсивностью и спектром, поток высокоэнергичных гамма-квантов является «отпечатком» пучка частиц, и с его помощью можно поставить точный диагноз ускоренного пучка.

В астрономии гамма-диапазон был освоен сравнительно недавно, что связано с проведением наблюдений за пределами атмосферы, полностью поглощающей приходящее извне гамма-излучение. Только с началом эры спутников стали широко проводиться измерения космического гамма-излучения, в том числе наблюдения Солнца в гамма-лучах.

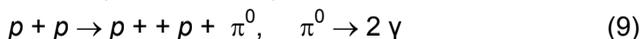
Гамма-излучение солнечных вспышек

Первая вспышка в гамма-лучах наблюдалась с высотного аэростата в 1959 г. Было обнаружено возрастание непрерывного спектра гамма-квантов до энергий несколько МэВ. Отдельные дискретные линии в непрерывном спектре были измерены спектрометрами на спутниках OSO-7 и SMM (США). Во время мощных солнечных вспышек августа 1972 г. приборы регистрировали гамма-линии, возникающие при аннигиляции позитронов: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$, $E_\gamma = 0,51$ МэВ, в реакции образования дейтерия: $n + p \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$, $E_\gamma = 2,2$ МэВ, а также от возбужденных состояний ядер ${}^{12}\text{C}$ ($E_\gamma = 4,4$ МэВ) и ${}^{16}\text{O}$ ($E_\gamma = 6,1$ МэВ).

Измеренные гамма-линии — следы, оставленные в солнечной атмосфере потоками электронов, протонов и нейтронов с энергиями десятки МэВ. В том же интервале измерялся также непрерывный спектр гамма-излучения (континуум) — результат слияния многих ядерных линий, не выделяемых спектрометрами в отдельности. По гамма-линиям и континууму были восстановлены потоки протонов и нейтронов во время вспышки. Сами по себе нейтроны вторичны, они выбиваются из ядер протонами. Полученные потоки, однако, не имеют прямого отношения к первичному пучку гамма-квантов, они — результат его переработки в низкоэнергичную часть спектра. Чтобы приблизиться к первичному пучку, надо регистрировать гамма-излучение более высоких энергий.

Орбитальный телескоп SMM, наблюдавший Солнце в 21-м цикле солнечной активности (1980 — 1985), измерял поток гамма-

излучения с энергией до 140 МэВ. В двух вспышках были выделены потоки гамма-квантов от распада нейтральных пионов:



Выделение потока «пионных» гамма-квантов основано на анализе энергетического спектра, в котором появляется особенность (перегиб) на энергии $E_\gamma = m_\pi/2 = 67,5$ МэВ, m_π — масса нейтрального пиона. Впервые был выделен первичный ускоренный протонный пучок солнечной вспышки. Но детальное его исследование удалось провести в следующем, 22-м цикле солнечной активности, когда на орбите заработали советско-французская станция ГАММА и американская GRO-COMPTON.

Орбитальный телескоп ГАММА-1

В момент запуска ГАММА-1 был самым большим в мире гамма-телескопом (рис. 14). Через год он уступил первенство телескопу EGRET обсерватории GRO. ГАММА-1 — результат совместной работы отечественных и зарубежных институтов: ИКИ, МИФИ, ФИАН, ЛФТИ, НПО «Энергия», ядерных центров Сакле и Тулузы.

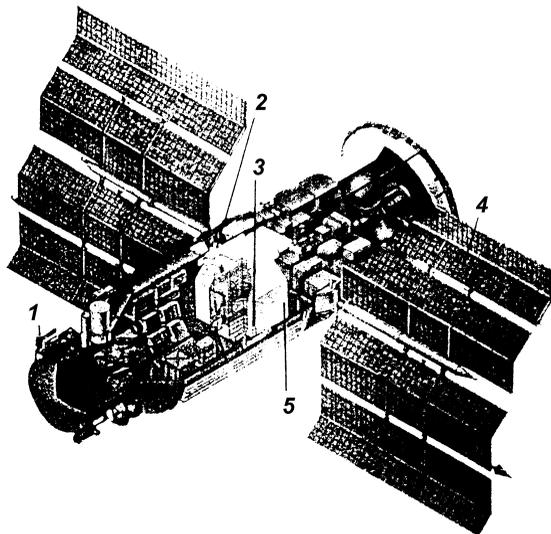


Рис.14. Схема орбитальной обсерватории ГАММА:
1 — телескоп «Пульсар-Х2»; 2 — система ориентации «Телевезда»;
3 — блок электроники; 4 — солнечные батареи; 5 — телескоп «Гамма-1»

Гамма-телескоп совсем не похож на своих оптических братьев. Никаких фокусирующих линз и отражающих зеркал (их просто нет для излучения столь малой длины волны, $\lambda < 10^{-2}$ Å). Это сложный прибор, включающий в себя большое число детекторов частиц, логических электронных схем (микропроцессоров), источников питания, блоков хранения и передачи информации.

Гамма-квант высокой энергии регистрируется в том случае, если он, взаимодействуя с веществом, рождает в телескопе электрон-позитронную пару (e^-e^+), по компонентам которой определяется его направление и энергия. Телескоп состоит из сцинтилляционных счетчиков, выделяющих e^-e^+ -пару, газового черенковского детектора для снижения приборного фона, системы трековых искровых камер (в полете не работала), спектрометра-калориметра, измерявшего энергию гамма-кванта, электронных блоков управления, записи информации и передачи по телеметрии на наземный приемный пункт. Измерялись гамма-кванты с энергией $E_\gamma > 30$ МэВ, максимальная энергия составляла несколько ГэВ. Вес прибора 1,5 т, размеры $2 \times 1,5 \times 1,5$ м³.

Станция ГАММА была выведена на околоземную орбиту с высотой 400 км, периодом обращения 90 мин и наклоном 52° . Телескоп мог наводиться в любую точку небесной сферы с точностью $0,2^\circ$ и удерживать ориентацию длительное время.

В 1991 г., в максимуме солнечной активности, когда на Солнце стали появляться области AR, от которых можно ожидать вспышки, в число объектов наблюдения было включено и Солнце. Однако, если место будущей вспышки известно — в пределах AR, то момент ее появления непредсказуем. Поступали следующим образом: как только на видимую сторону выходила «перспективная» AR, телескоп переориентировался на Солнце и переходил в ждущий режим, готовый к приему вспышечного потока. Такая тактика часто оканчивалась ничем, и проведив за лимб AR, так и не разродившуюся вспышкой, телескоп возвращался к прежнему объекту. Но пять солнечных сеансов все же оказались удачными — на Солнце произошли вспышки, в трех случаях очень мощные. Точная временная привязка к моменту оптической вспышки, по каталогу Solar Geophysical Data, позволила выделить вспышечный поток гамма-излучения и измерить его характеристики. Так были исследованы гамма-вспышки 26 марта, 15 июня и 27 октября.

Ряд солнечных вспышек в гамма-лучах был увиден также телескопами EGRET и COMPTEL станции GRO. 1991 г. оказался «урожайным» на вспышки и новые научные результаты.

Мощные солнечные гамма-вспышки

Вспышечные потоки высокоэнергичных гамма-квантов значительно отличаются от мягкого гамма-излучения вспышки. Они более продолжительны, имеют сложный многопиковый временной ход и широкий энергетический спектр. Будучи порождением первичного пучка частиц, они позволили измерить его, определить состав и изменение со временем.

Зарегистрированные гамма-вспышки (табл. 2) — самые мощные: их оптический балл максимальный (3В), рентгеновский поток, измеряемый орбитальным монитором GOES-7, достаточно высокий. Гамма-излучение удалось измерить у самых мощных солнечных вспышек, что естественно, принимая во внимание начальный характер исследований. С повышением чувствительности гамма-телескопов, очевидно, будут измерены потоки гамма-квантов и от вспышек меньшей мощности.

Таблица 2

Гамма-вспышки, зарегистрированные в 1991 г.

Дата наблюдения	Балльность по рентгену	Активная область AR	Эксперимент
26 марта	X 4,7	6555	ГАММА-1
4 июня	X 12	6659	COMPTEL, EGRET
6 июня	X 12	6659	COMPTEL, EGRET
9 июня	X 10	6659	COMPTEL, EGRET
11 июня	X 12	6659	COMPTEL, EGRET
15 июня	X 12+	6659	ГАММА-1
27 октября	X 6,1	6891	ГАММА-1

Анализ гамма-вспышек выявил свойства ускоренных пучков заряженных частиц, которые возникают в начальной (импульсной) фазе вспышки.

Продолжительность и предельные энергии ускоренного пучка. Гамма-излучение некоторых вспышек длилось часами. С перерывами на время ухода спутника на теневую сторону орбиты, вспышечный поток гамма-квантов продолжал регистрироваться на нескольких витках орбиты. Так вели себя вспышки 11 июня (по данным GRO) и 15 июня (ГАММА), произошедшие в области AR 6659. Столь длительное гамма-излучение можно объяснить либо тем, что пучок заряженных частиц попадал в магнитную ловушку в солнечной короне, где плотность газа низкая, и сохранялся там долгое время, либо повторными актами ускорения. По постоянной спада интенсивности были определены размеры области захвата пучка. Для вспышки 15 июня она составила 10^5 км. Очевидно, долго сохраняться мог только протонный компонент пучка. Электроны — более «чувствительная» часть пучка, быстро теряющая энергию на синхротронное излучение в магнитном поле.

Другое важное открытие — гамма-кванты предельно высоких энергий. Измеренные спектры гамма-излучения простирались до энергий несколько ГэВ, на порядок больше, чем было измерено SMM. Так как спектрометры могли измерять и более высокие энергии гамма-квантов, полученные значения показывают предельную энергию ускоренного пучка. Расчет показывает, что максимальная энергия протонного пучка составляет около 10 ГэВ.

Временная структура гамма-вспышки. Вспышка 26 марта, наблюдавшаяся телескопом ГАММА-1 с начала до конца, продемонстрировала весь временной ход гамма-излучения ускоренного пучка. Он оказался сложным, богатым на детали (рис. 15). В первые минуты, во время импульсной стадии вспышки, наблюдались резкие короткие импульсы, амплитуда которых постепенно убывала. Затем, с интервалом в несколько минут, последовали два повторных импульса меньшей амплитуды. И, наконец, — плавный спад излучения, который можно отнести к заключительной фазе вспышки, без новых актов ускорения.

Временной ход гамма-излучения наглядно показывает работу солнечного ускорителя. Первый импульс ускорения, самый мощный, продолжался 10 с и состоял из отдельных всплесков (длительностью десятки миллисекунд), — отдельные акты ускорения. Повторные импульсы тоже состоят из отдельных актов заметно меньшей амплитуды. Активная фаза вспышки, в течение которой происходит ускорение частиц, продолжалась для этой вспышки

~ 10 мин. В заключительной фазе вспышки пучок, захваченный в магнитную ловушку, затухал в течение десятков минут.

Выяснилось, что генерация первичного пучка — не однократное событие, а последовательная серия отдельных актов ускорения с постепенно убывающей амплитудой.

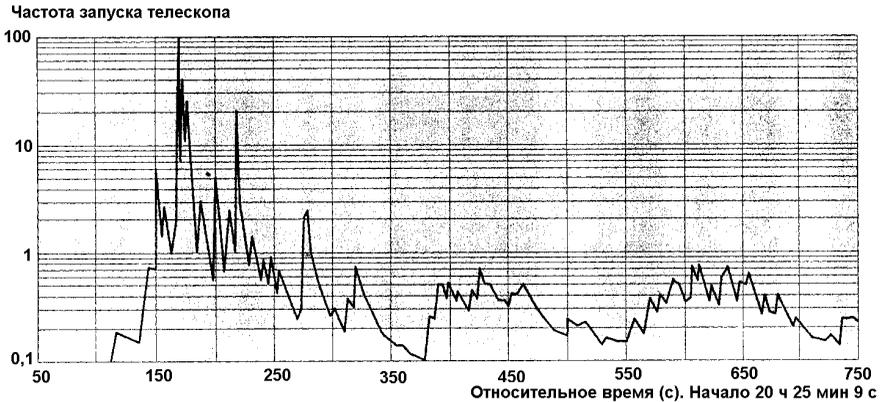


Рис. 15. Временной ход гамма-излучения ($E > 30$ МэВ) в активной фазе вспышки 26 марта 1991 г.

Вспышка 15 июня наблюдалась не с самого начала, так как станции ГАММА и GRO находились на теневой стороне орбиты. Была упущена самая интересная, импульсная фаза вспышки с сильными актами ускорения. Но вспышка была настолько мощной, что и через 17 мин после начала все еще была представлена импульсной фазой, где отмечались отдельные акты ускорения, перешедшей затем в заключительную фазу с плавно убывающей интенсивностью пучка.

Состав пучка. Энергетические спектры гамма-излучения вспышки позволили узнать состав и энергию пучка ускоренных частиц. Измеренный спектр гамма-квантов сравнивался с расчетным спектром гамма-излучения электронного и протонного пучков, взаимодействующих с веществом солнечной атмосферы. Расчет проводился по стандартной программе GEANT. Нахождение наилучшего согласия экспериментального и расчетного спектров определило параметры ускоренных пучков. На рис. 16 показаны экспериментальный и рассчитанный энергетические спектры гамма-излучения вспышки 15 июня. Сравнение показало, что согласие

расчетного и измеренного спектров можно получить только при условии одновременного ускорения протонов и электронов. Низкоэнергичная часть спектра (< 100 МэВ) не может быть объяснена без участия электронного компонента. С другой стороны, высокоэнергичные гамма-кванты (> 300 МэВ) могут генерироваться только протонами. Электронная доля была больше в 10 — 100 раз, чем протонная, но энергия ускоренных протонов в 100 раз выше, чем электронов. Электроны ускоряются до сотен МэВ, протоны — до десятка ГэВ.

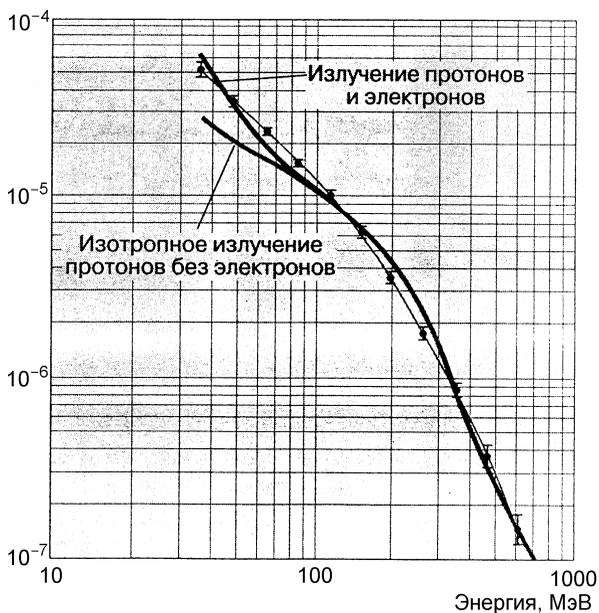


Рис. 16. Энергетический спектр гамма-излучения вспышки 15 июня 1991 г.: точки — данные измерений, сплошные линии — результаты модельного расчета

Полученная точная информация о составе и спектре первичного пучка ускоренных частиц крайне важна, так как позволит выяснить механизм ускорения.

СОЛНЕЧНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМНУЮ ПОГОДУ

Погода, погода — с заката, с восхода
тянется погода, погода,
циклон свиданий и разлук.

Юрий Визбор

Наша крошка Земля купается в океане солнечного света. Но не только световой поток делает земную погоду — жаркой на экваторе, умеренной в средних широтах, холодной в приполярных областях. Она управляется, порой очень решительно, активностью звезды, проявления которой — темные пятна на фотосфере, хромосферные вспышки, гигантские выбросы солнечной плазмы. Указания на опосредованное влияние солнечной активности появились давно. И только недавно, благодаря наблюдениям со спутников, механизм солнечно-земных связей, управляющий погодой, был раскрыт.

Погодные аномалии начала века

Неладно что-то в «погодном королевстве». Мягкие, щадящие зимы последних лет в 2006 г. сменились сильными холодами и обильными снегопадами по всему Северному полушарию. Самыми рейтинговыми стали передачи о погоде и ее аномалиях. Метеорологи не могут найти причину погодных срывов в своих программах на ЭВМ. Кто виноват в погодных аномалиях, что делать и долго ли эта вакханалия будет продолжаться? Не будучи экстрасенсами, они, в лучшем случае, могут лишь успокоить общественность, обещая скорое падение холодов и советуя теплее одеваться.

В самом деле, что посоветуешь замерзающим жителям сибирских поселков, на дворе которых температура зашкаливает за —40°. Или беспечным европейцам, вязнущим в снегах на скоростных магистралях. Или жителям африканских пустынь, изнедавшим прелесть наших северных метелей.

Суровая зима 2006 г., кажется, перевернула все рассуждения о всемирном потеплении, парниковом эффекте и индустриальном воздействии на климат. Киотские протоколы об ограничении выбросов «парниковых газов» (так и не подписанные американцами), наверное, можно забыть. Долгосрочные прогнозы трещат по швам и заставляют искать другие объяснения погодным срывам. А что

сказать о череде жестоких атлантических ураганов последних лет (Charlie, Jeanne, Katrina, Rita, Vilma et al.), ставших проклятием южных штатов США и стран Карибского бассейна, — это с какой стати? И столь же свирепых тайфунов Тихого океана, превзошедших все ранее виденное. Откуда этот разгул погодной вольницы?

Легко предположить, что погодные аномалии обусловлены вековым периодом солнечных циклов, который в наше время сулит уменьшение СА и повторение того, что наблюдалось прежде в начале веков. Видна тенденция падения амплитуд последних циклов (1976 — 2006): 21-й цикл — $W_{\max} = 164$, 22-й цикл — $W_{\max} = 158$, 23-й цикл, только что завершающийся, — $W_{\max} = 120$. Амплитуды еще не достигли значений, которые они имели в начале веков ($W_{\max} = 50 — 80$), но это, скорее всего, только пролог и спад СА продлится. Если так и будет, холодная зима 2006 г. — не случайный эпизод, а начало довольно длительного периода погодных аномалий, который охватит десятки лет (несколько циклов). А может, даже повторение «Маундеровского феномена», изменение процесса передачи тепла в конвективной зоне.

Переносчики солнечного влияния

Темные пятна на Солнце, сами по себе, не отвечают за солнечно-земные связи, они — указатели переменности СА. «Переносчиками влияния» должны быть материальные потоки, испускаемые звездой, характер и интенсивность которых как-то связаны с параметром W . Это солнечный ветер (поток водородно-гелиевой плазмы, плотность и скорость которого зависит от фаз СА), выбросы вещества, сопровождающие солнечные вспышки, корональные массовые выбросы (Coronal Mass Ejections, CME) — гигантские облака плазмы, выталкиваемые из солнечной короны. CME известны давно, но только в последние годы выяснилась их роль — как главных переносчиков СА. CME — это сброс старых магнитных петель конвективной зоны под напором нового нарождающегося в глубине магнитного поля, процесс, еще плохо изученный, но проявление которого подтверждает наблюдательный материал, собранный орбитальной станцией SOHO. То, что CME — главные переносчики солнечного влияния, следует из увеличения их числа в последних циклах (табл. 3). Возросшее почти в два раза число CME означает усилившееся вмешательство Солнца в земные дела.

Число активных областей и корональных дыр (КМЕ) в первые 53 месяца трех последних циклов

Структура	21-й цикл	22-й цикл	23-й цикл
АО	1984	1682	1219
КД	> 151	192	356

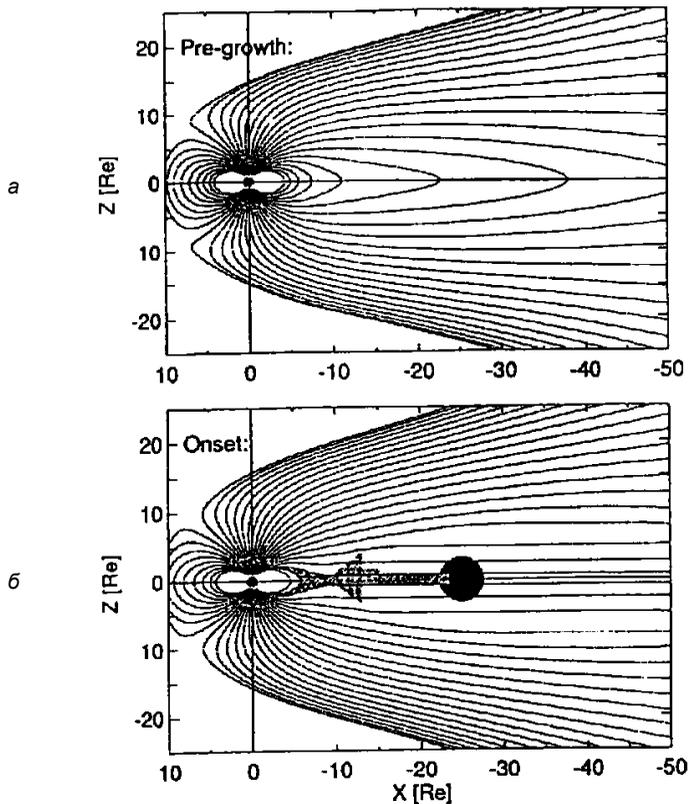


Рис. 17. Магнитосфера Земли до (а) и после (б) прихода солнечного коронального выброса; R_e — радиус Земли

СМЕ представляют собой гигантские облака намагниченной плазмы массой 1 — 10 млрд т, летящие со скоростью больше

1000 км/с и энергией $\sim 10^{25}$ Дж. Они выбрасываются Солнцем во все стороны. Большинство не представляет опасности для Земли, но те, которые образуются в центральной части видимого солнечного диска, направлены к нам, и через 2 — 3 дня появятся у Земли. От их прямого воздействия оберегает земное магнитное поле, не «пускающее» заряженные частицы внутрь магнитосферы, заставляющее их обтекать границу (магнитопаузу) и скользить по длинному (сотни земных радиусов) магнитному «хвосту» (рис. 17). Удар СМЕ не проходит бесследно — возникает магнитная буря, балл которой фиксирует планетарный K_p -индекс, отражающий величину колебаний геомагнитного поля. Во время бури $K_p = 6 — 9$ по 9-балльной шкале. Магнитная встряска — как раз то промежуточное звено солнечно-земных связей, которое долго не могли найти и которое, как сейчас считают, является определяющим в причинно-следственной цепочке солнечного влияния.

Радиационный пояс «входит в игру»

Следующее звено — радиационный пояс Земли: потоки заряженных частиц (протонов, ядер, электронов) сравнительно низких энергий, захваченные и длительно удерживаемые земным магнитным полем. Частицы движутся по спиральным траекториям, нависаясь на магнитные силовые линии и отражаясь в месте их сгущения вблизи полюсов («магнитные зеркала»). Во время магнитной бури происходит ускорение захваченных частиц (механизм, еще недостаточно изученный, но уже подтвержденный наблюдениями со спутников), и «перестройка» радиационного пояса. Ускоренные частицы, более не удерживаемые магнитным полем на своей оболочке, перемещаются внутрь магнитосферы ближе к Земле и, в конце концов, высыпаются в атмосферу. Пучки заряженных частиц — это дополнительный энергетический источник в атмосфере, влияющий на ее вертикальную неустойчивость. Он приводит к образованию воздушных вихрей — циклонов, штормов, ураганов, в сумме своей определяющих земную погоду, главным образом, ее аномальные проявления.

Этот важнейший погодный фактор — от образования СМЕ до высыпания в атмосферу потоков частиц захваченной радиации, «управляемый» активностью звезды, не учитывается в расчетных моделях. Сейчас, когда стало ясно, что его надо ввести, трудно оценить, насколько изменится качество прогнозов погоды. Пока из-

вестна только общая схема механизма солнечно-земной связи и нужны детальные исследования всех его звеньев. Но уже из факта увеличения числа СМЕ в 23-м цикле, где проявились аномалии земной погоды, определенно следует, что она «идет на поводу» СА. Экскурсы в прошлое – Маундеровский минимум, спады СА в начале XIX и XX веков, дают дополнительную уверенность в правоте такого вывода, несмотря на неполноту наблюдательных данных. За Солнцем стали строго следить только в спутниковую эпоху (с 1970-х гг.). Связь СА с земной погодой долго не получала подтверждения. Настало время устранить недочет.

Анализ СА за пять веков показал ее неоспоримое влияние на земную погоду. Наш климат всецело определяется солнечной радиацией, а текущая погода (в первую очередь ее аномалии) зависит от «настроения» светила, основным проявлением которого являются облака солнечной плазмы СМЕ. Сейчас, как и всегда в начале века, Солнце не «в духе», и не исключено, что такое состояние затянется на десятки лет, угрожая холодными зимами, бурями, ураганами и другими проявлениями дурного «настроения».

ЦИКЛОНЫ И УРАГАНЫ

На Земле, самой спокойной планете Солнечной системы, все же случаются природные катастрофы. Одни из наиболее опасных — штормы и ураганы, приносящие огромные разрушения, нарушения экологии, человеческие жертвы. Наука давно ищет способ устранения этих напастей, но пока способна лишь на долговременный прогноз мест их появления и степени угрозы. Продолжаются поиски новых «рычагов воздействия» на непослушную природу. С появлением более мощных технических средств, в первую очередь связанных с исследованием космоса, возобновляются попытки «обуздания» катастроф. В последнее время получены определенные результаты.

Тропические ураганы

Тропики — самое горячее место на Земле. Здесь Солнце, находящееся в зените, сильно нагревает сушу и океан, поверхностная температура которых оказывается самой высокой. Средним и полярным широтам достается намного меньше солнечного тепла. Чтобы избежать тропического перегрева и равномерно распреде-

лить тепло по планете, природа привела в действие воздушные и морские течения (муссоны, пассаты, гольфстримы), которые все же из-за своей медлительности не справляются полностью с задачей переноса тепла. На помощь приходят тропические циклоны (ТЦ), вихревые потоки в атмосфере, дающие более быстрый и эффективный отвод солнечной энергии из экваториальной зоны. ТЦ возникают в результате трения воздушных потоков о поверхность океана и действия силы Кориолиса, связанной с вращением Земли. Самые мощные и разрушительные ТЦ — тропические штормы и ураганы. Они неизбежны и потому весьма полезные проявления земной погоды, осуществляющие быстрый перенос тепла, без которых Земле грозил бы «тепловой удар». Отсюда, однако, не следует, что на их разрушительную силу нельзя повлиять. Молнии — тоже неизбежный и полезный этап развития грозы, но их угрозу успешно устранил молниеотвод Б. Франклина, неудачно названный громоотводом.

С тропическими ураганами в Атлантике европейцы познакомились после открытия Америки, когда многочисленные суда стали бороздить океан, направляясь в Новый Свет. Корабли и целые флотилии гибли от свирепых бурь, окрещенных адмиралом Ф. Бофортом (1802) ураганами. Шекспировская «Буря» — историческое свидетельство урагана 1609 г., прервавшего путь кораблям колонистов, заставившего их высадиться на необитаемых Бермудских островах. Восточные, в Тихом и Индийском океанах, мощные ТЦ — тайфуны — европейцам тоже не были хорошо известны.

По классификации, введенной Бофортом, шторм — это циклон со скоростью ветра $v > 17$ м/с, ураган — циклон, ветер которого рвет паруса ($v > 33$ м/с), главный ураган — $v > 50$ м/с (200 км/ч). Максимальная скорость урагана доходила 550 км/ч. Американский исследователь У. Редфилд (1831) собрал первые сведения об ураганах Атлантики и правильно описал их как единые спиральные структуры. Он же предложил первую (циркуляционную) модель ТЦ. Систематическое исследование, положившее начало борьбе с ураганами, стало возможным только в XX в. и наиболее полно — с запуском искусственных спутников, наблюдения с которых позволили проследить развитие урагана с момента зарождения и выявить пути следования. В настоящее время работает разветвленная служба слежения за ураганами.

Разрушительные ураганы с многочисленными жертвами бывали и раньше. Но череда страшных атлантических ураганов, потери от

которых исчисляются миллиардами долларов, а жертвы — сотнями и тысячами, пришла на конец XX — начало XXI вв: Hugo (1989), Andrew (1992), Opal (1995), Mitch (1998), Georges (1998), Charlie, Frensis, Ivan, Jeanne — 2004, Katrina, Rita, Sten, Vilma (затопившие Новый Орлеан, уничтожившие нефтяные платформы в Мексиканском заливе) — всего 21 ураган в 2005 г. В последнее время стали наблюдаться цепочки ураганов, следующих друг за другом по одному пути, что указывает на возможность множественной генерации ТЦ — режим супертайфуна, охватывающего заметную часть экватора.

Модели и теории

Условия образования циклона, перерастающего в ураган, хорошо известны. Он возникает там, где высока температура воды ($\geq 26^\circ$). Это первое условие обеспечивает сильное испарение с поверхности океана, насыщенность вихря водяным паром. Второе условие менее прозрачно, но столь же необходимо — малый градиент скорости ветра по высоте вихря, что поддерживает конвективные облачные ячейки (его энергетические «батарейки») и не дает циклону распастись на мелкие вихри. Известен ряд сопутствующих факторов: резкий температурный контраст поверхности океана, скопление кучевых облаков и т.д. Подмечены корреляции ураганов с другими погодными явлениями: циркуляцией ветров в стратосфере, дождями в Западной Африке, явлением Эль Ниньо (неожиданным потеплением воды в Тихом океане).

В разное время создавались модельные представления, феноменологические вначале, физически обусловленные позднее, основанные на известных процессах теплообмена атмосфера — океан. Удивительно, лучшее согласие с наблюдениями — у моделей «среднего уровня», описывающих поведение вихря и не очень грубо, и не слишком подробно. Изошренные модели упускали, казалось, какую-то важную «деталь», которая в простом представлении незримо присутствовала. В целом модели давали правильный ход развития уже возникшего шторма, набор его энергии и разрушительной силы. Ураган — это автономно развивающаяся термодинамическая система (тепловая машина Карно), в которой поддерживаются два температурных уровня — высокий T_1 (температура океана), низкий T_2 (верхний слой тропосферы), а теплоносителем служит водяной пар. Выделяемая энергия черпается из тепловой энергии океана и

потенциальной энергии высотной неустойчивости атмосферы, которые конвертируются в кинетическую энергию вихря. Пока ураган движется над океаном, его сила нарастает, но, выйдя на сушу, он теряет связь с энергетическим источником и быстро, в несколько дней, затухает, успев, однако, наломать немало дров. Разящая сила урагана не только в его скорости и мощи ветра, но и в обилии влаги, вызывающей ливни, наводнения, сели, обвалы.

Сценарий развитого шторма, перерастающего в ураган, а затем — в главный ураган, хорошо «работает», достаточно точно описывая реальные явления. Остается непонятым, почему ураганы образуются в строго определенных местах (атлантические — у берегов Западной Африки, западно-тихоокеанские — в районе Филиппин и Индонезии) и в особые часы, тогда как в другое время те же по виду ТЦ не становятся ураганами. До сих пор не понят механизм возникновения циклона, в котором начинает «на автомате» работать «машина Карно». По-видимому, нужна начальная встряска, спусковой механизм, порождающий первичный автономный вихрь.

«Стратегия сдерживания»

В 1980-х гг., после того как были выявлены условия образования ураганов и созданы «хорошие» модели развития, предпринимались попытки всей силой техники обуздать ураганы или хотя бы снизить их угрозу — истощить на подходе к людным местам, увести в сторону. «Глаз урагана» — центральную часть вихря (размером 20 — 50 км), окаймленную плотной стеною облаков и хорошо видную на снимках из космоса, обстреливали мощными зарядами. При подходе к Флориде, Луизиане, Техасу, куда обычно залетали разбушевавшиеся вихри, на них сбрасывали йодистые препараты с целью вызвать искусственное выпадение осадков, как это делается по отношению к фронту дождевых облаков на подступах к Москве. Лишенный водяного пара ураган должен потерять и свою механическую силу. Эти усилия ничего не дали. Другая попытка — на пути урагана ставили айсберги, срочно доставляемые от Гренландии, с надеждой «охладить» его пыл. Ураган проносился, не замечая преград. Слишком слабы были эти «уколы» для вихря, энергия которого составляла $\sim 10^{24}$ эрг с фронтальной плотностью $\sim 10^9$ эрг/см².

Лобовая атака на ураганы американских ВВС, названная «Storm Fury» (Ярость бури), продолжалась 20 лет (1963 — 1983) и окончи-

лась полной неудачей. Было осознано, что перспективный путь борьбы с ураганами — изучение их свойств и более вьедливое прогнозирование с помощью космических средств. В дело пошли специализированные метеоспутники, ведущие наблюдения с геостационарных и низких орбит.

Связь с солнечной активностью

Частота ураганов не постоянна, их активность то затухает, то разгорается (рис. 18). Как и другие погодные явления, ураганы могут инициироваться Солнцем. Мы живем под боком спокойной, но достаточно активной звезды, дыхание которой ощущаем по многим проявлениям СА. Советские геофизики А.Л. Чижевский (1940-е), Э.Р. Мустель (1980-е) доказывали влияние СА на земную погоду. Доказательства — не прямые (космические эксперименты еще не были в ходу), а путем сопоставлений погодных параметров с числами W . Не все полученные результаты были достоверны. Главный недостаток работ заключался в том, что оставался неизвестным материальный переносчик солнечного влияния на процессы в тропосфере. Все кажущиеся факторы влияния (солнечный ультрафиолет, рентгеновское излучение, корпускулярные потоки) поглощаются в стратосфере (> 25 км), не доходя до «уровня погоды» (< 12 км). Сейчас переносчики солнечного влияния известны, механизм передачи установлен.

На первый взгляд, числа W не подтверждают солнечного влияния на ураганы, активность которых совершенно не следует 11-летнему циклу. Анализ показал, что число ураганов одинаково во всех фазах цикла — на подъеме и спаде, в максимуме и минимуме. Самые разрушительные ураганы, приведенные выше, тоже пришлись на все фазы. И все же зависимость ураганов от СА есть, что можно увидеть, сравнивая временные последовательности ураганов (рис. 18 и 19) с зависимостью чисел $W(t)$ (см. рис. 9) для временных интервалов 20 — 30 лет. Там, где амплитуда циклов W была больше, возрастал и темп ураганов. Среднегодовые числа главных ураганов прошлого века (см. рис. 18) составляли: $n = 1,4 \pm 0,3$ (1900 — 1925); $n = 2,7 \pm 0,3$ (1930 — 1965); $n = 1,6 \pm 0,3$ (1970 — 1990). Максимальные амплитуды W для тех же временных дат были $W_{\max} = 105, 201$ и 164 — корреляция видна, хотя по статистическим меркам не очень значима.

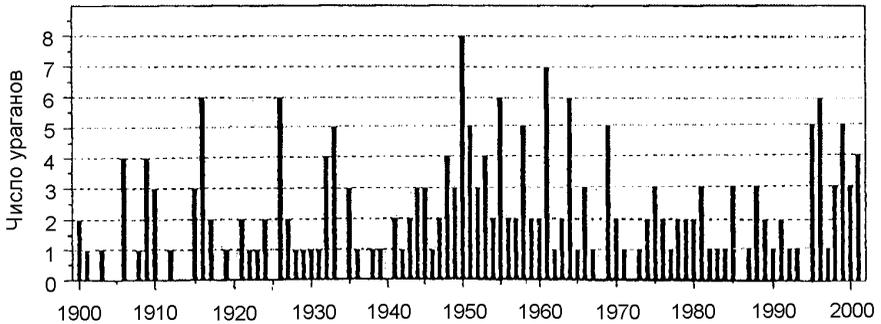


Рис. 18. Временная зависимость главных ураганов Северной Атлантики

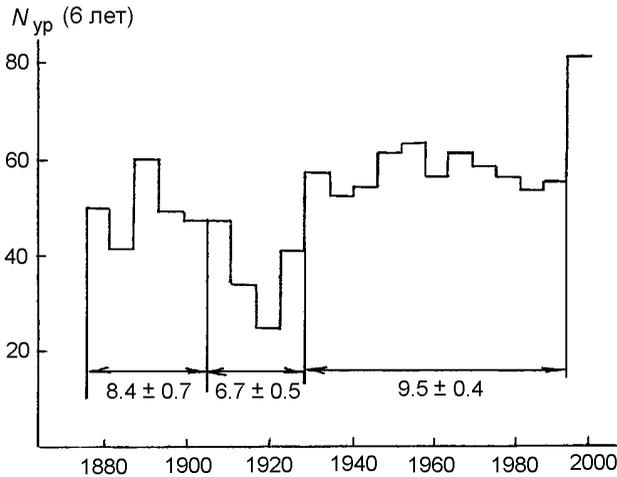


Рис. 19. Темп всех ураганов Северной Атлантики (магнитуда ≥ 2) за 150 лет

Более веское подтверждение солнечного влияния получим из данных по всем ураганам XIX и XX вв. (см. рис. 19), где отчетливо виден «провал» темпа ураганов в начале XX в., последовавший за снижением амплитуд W . Статистическая достоверность «провала» ураганов по сравнению с уровнем 1930 — 90 гг. превышает 5σ (стандартных отклонений). Лучшая корреляция получается при сдвиге последовательности ураганов на ~ 20 лет относительно $W(t)$. «Холодные» земные процессы как бы запаздывают относительно «горячих» солнечных.

$N_{ур}$ (10 лет)

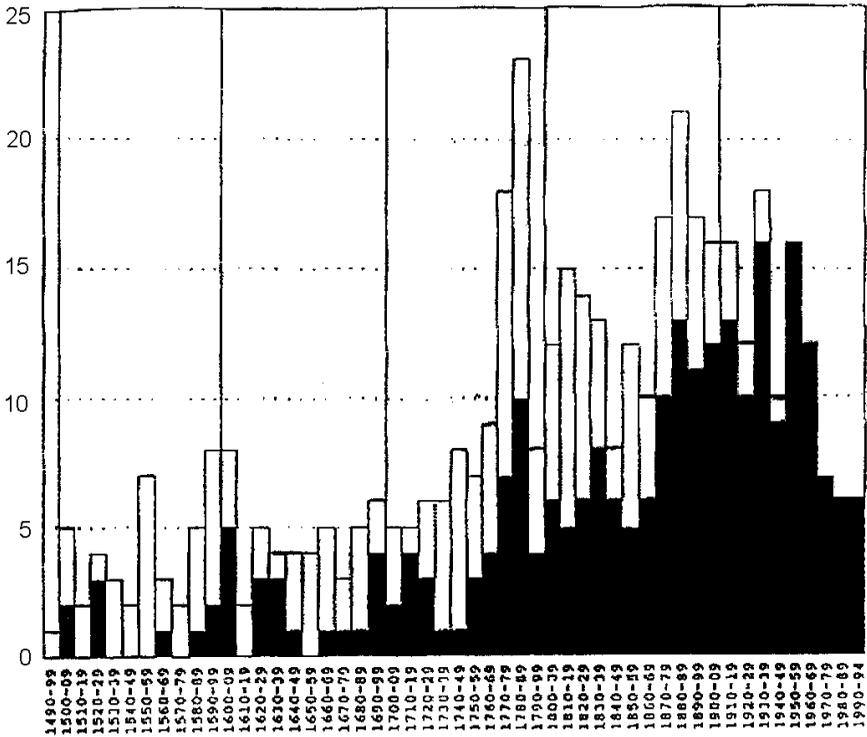


Рис. 20. «Смертоносные ураганы» Северной Атлантики; темные — число жертв точно известно (> 25)

Более убедительное доказательство влияния СА на ураганы можно было бы получить для спада СА в начале XIX в. и в Маундеровском минимуме (1640 — 1720). Однако тогда систематических наблюдений не велось, но есть данные по числу «смертоносных ураганов» (рис. 20). Несмотря на малую статистику, обе особенности проявляют себя – в это время спадала и активность ураганов. Достоверность «спадов» 3σ в начале XIX в., и 6σ в Маундеровском минимуме. Лучшая корреляция временных последовательностей получается при той же задержке ~ 20 лет, что делает ее характерной величиной связи СА с земными ураганами.

Анализ солнечных вспышек показал их полную непричастность к возникновению ураганов. Число вспышек возрастает в десятки раз от минимума до максимума 11-летнего цикла, тогда как темп ураганов остается постоянным. Должен быть другой «носитель», который менее «связан» с солнечными пятнами, 11-летним циклом и в то же время обладает достаточной силой влияния на земные процессы.

Сейчас установлено, что такими переносчиками энергии выступают СМЕ, выбросы солнечного вещества, напрямую не связанные с фотосферой и темными пятнами, что объясняет отсутствие 11-летней цикличности ураганов. СМЕ происходят все время и по всем солнечным широтам, от экватора до полюсов, это процесс, который лучше, чем солнечные пятна отражает СА. То, что СМЕ ответственны за изменение темпа ураганов, отчетливо видно по одновременному возрастанию ураганов и числа СМЕ в последнее десятилетие (1996 — 2005) (см. табл. 3). Но СМЕ стали регулярно наблюдаться с 1970-х гг., что ограничивает проведение полного корреляционного анализа с ураганами.

Потоки электронов, позитронов, протонов, относительно низких энергий, захваченные в ловушку магнитного поля Земли, получили название радиационного пояса, открытого в 1958 г. при пролетах первых космических ракет Д. Ван Алленом (США) и А.Е. Чудаковым (СССР). Радиационный пояс находится на высоте от нескольких сотен до тысяч километров, имеет сложную тороидальную структуру, состоящую из L -оболочек, где L — расстояние по экватору, выраженное в радиусах Земли. Интенсивность захваченной радиации велика, проход через радиационный пояс представляет опасность для космонавтов, выводит из строя электронные блоки, нарушает радиосвязь.

Исследование частиц радиационного пояса, проводимое по программе ISTP (Международная программа солнечно-земной физики), обнаружило ускорение частиц в «хвосте» магнитосферы во время магнитной бури, вызванной СМЕ (см. разд. «Солнечное влияние на земную погоду»). Потоки электронов HRE (highly relativistic electrons), появляющиеся с приходом СМЕ, были зарегистрированы спутниками SAMPEX и POLAR (НАСА). HRE-события в радиационном поясе — это естественный механизм усиления воздействия СА на атмосферу, которое российские ученые предвидели много лет назад. Оказывается, магнитные бури, порожденные СМЕ, вызывают не только полярные сияния, аварии линий связи, о

чем постоянно сообщается, но и нагрев верхних слоев атмосферы, образование ТЦ и других погодных аномалий.

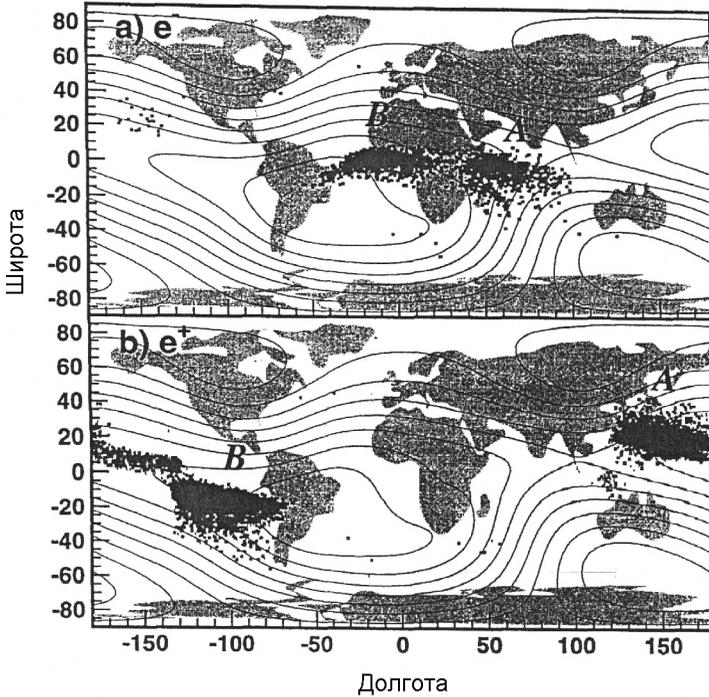


Рис. 21. Карта выпадения квазизахваченных частиц по данным эксперимента AMS

Места выпадений вторгающихся потоков частиц «указал» эксперимент со спектрометром AMS на борту шаттла «Discovery» (1998). Спектрометр со сверхпроводящим магнитом обладал такой высокой разрешающей способностью, что мог точно распознавать заряд и массу частиц и проследить их траекторию до и после прохождения через прибор. Было установлено, что квази-захваченные частицы (временно, до 10 с, удерживаемые магнитным полем, успевающие сотни раз отразиться от зеркальных точек и совершить долготный дрейф) регистрируются в строго определенных местах геомагнитного экватора (рис. 21). Этот результат — резкую анизотропию квазизахваченных частиц — можно сопоставить с местами

образования ураганов: район позитронов и протонов А — с тихоокеанскими, которых в несколько раз больше, чем на других акваториях океана, район электронов В — с североатлантическими. Надо, однако, иметь в виду, что эксперимент проводился в магнитно-спокойное время. Потоки вторичных частиц не были такими интенсивными, какие ожидаются в магнитную бурю, и не могли вызвать заметного отклика в атмосфере. Они просто указали места, где должны выпадать частицы радиационного пояса при столкновении СМЕ с земной магнитосферой.

Эль-Ниньо

Приведенный сценарий солнечного влияния на земную погоду позволяет понять еще одно явление, получившее у перуанских рыбаков нежное имя Эль-Ниньо (Младенец).

Эль-Ниньо (El-Nino, EN) — гигантский клин аномально теплой воды в восточной тропической части Тихого океана (шириной в сотни, длиной в тысячи километров), направленный на запад от берегов Перу (рис. 22). Неожиданно возникая, EN продолжается 2 — 4 года, изменяя всю устоявшуюся в регионе схему погоды, и так же внезапно исчезает. С ним связаны периодические колебания температуры и давления, известные как Южная Осцилляция (SO) — вместе единое природное явление ENSO. EN — сильнейший «возмутитель» климата. Его появление ставит с ног на голову привычную погоду не только в Тихом океане, но по всему земному шару. В обычно засушливые районы (Центральная и Северная Австралия) вдруг обрушиваются проливные дожди, а в областях влажного климата (Южная Америка, Индонезия) наступает страшная засуха, приводящая к неурожаям. Вдоль «клины» стихает зональный восточный ветер, повышается влажность, образуются массивы кучевых облаков и, как следствие, возникают штормы и ураганы. Даже в очень далеких районах происходит коренная смена погоды: наступают засушливые периоды в Индии, Пакистане, Западной Африке, стихают атлантические ураганы. Погодные изменения, вызванные EN, способствуют росту эпидемий, распространению москитов, загрязнению питьевой воды. EN — признанный фактор, влияющий на мировую экономику.

Глобальное значение EN, ранее принимавшееся как местная аномалия у берегов Перу (уход рыб и сокращение уловов, гибель морских птиц), было осознано в 1970-х гг. После вызванных им

природных катастроф 1982 — 83 гг. была создана программа наблюдений TOGA (Tropical Oceans and Global Atmosphere) с целью изучения и предупреждения его новых появлений. Разработанные модели EN дали ряд точных прогнозов, но потом наступил сбой, показавший, что его «сила воздействия» меняется со временем (Младенец, оказывается, растет и изменяется). Явление остается по-прежнему загадочным, модели упускают что-то важное.

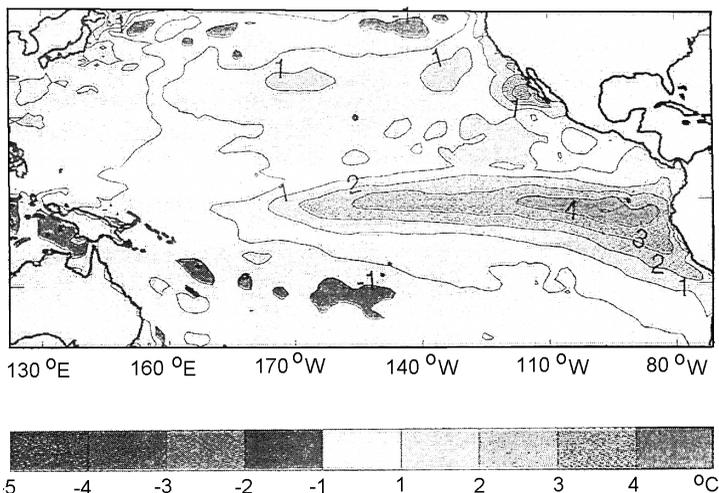


Рис. 22. Карта расположения Эль-Ниньо (октябрь 1997 г.): контуры anomalно теплой воды (1 — 5° выше нормы)

Сопоставление географических карт EN (см. рис. 22) и выпадения частиц радиационного пояса (см. рис. 21) показывает совпадение зоны В положительно заряженных частиц с профилем EN. Можно предположить, что происхождение этого природного феномена, как и начальное образование тропических ураганов, происходит под воздействием солнечных CME. В верхних слоях атмосферы появляется дополнительный источник энергии, вызывающий вертикальную неустойчивость воздушных масс, их смещение и нагрев. Повышается температура воздуха и поверхности океана.

Такой вывод подтверждает корреляция EN с тихоокеанскими ураганами. В периоды EN мощность ураганов на северо-западе Тихого океана была выше, чем в спокойное (без потепления и похолодания) время: возросло число мощных ураганов, увеличилась

их средняя магнитуда ($M_{\text{cp}} = 8,1 \pm 0,3$ по сравнению с $M_{\text{cp}} = 6,6 \pm 0,2$ без EN).

Появление EN у берегов Южной Америки, а не в других местах мирового океана, связано, по-видимому, кроме большого простора Тихого океана (масштабность явления), с большим потоком высыпающихся частиц и особенностью места. Высыпание происходит по геомагнитному экватору, который в этом районе отклоняется на $10 — 15^\circ$ к югу от земного экватора. Прогрев атмосферы и океана происходит не в экваториальной зоне, как в других местах, а в районе с меньшей и зависящей от сезона температурой. Эффект потепления, следовательно, более значим, и его влияние на погоду более сильное.

Возможность направленного воздействия

Так можно ли управлять ураганами?

В 1980-х гг. проводились попытки воздействовать на облака CME, летящие к Земле, выбрасывая на их пути со спутников искусственные потоки плазмы. Гигантские облака просто не замечали этой «преграды». Наша техника все еще слишком слаба для их обуздания.

Однако в цепочке солнечно-земных связей появилось, как кажется, «узкое место», где современные технические средства могут проявить себя. Нам не под силу сдержать солнечные CME и предотвратить магнитные бури в земной магнитосфере, как невозможно преградить путь развившемуся тропическому урагану. Но, может быть, посильно оказать опережающее воздействие на радиационный пояс, истощив его за несколько дней до прихода CME, так что поток высыпающихся частиц будет ослаблен. Искусственное уменьшение концентрации заряженных частиц радиационного пояса — установленный факт, достигнутый, правда, очень грубым путем — ядерными взрывами в космосе («Морская звезда» и другие операции, США, 1960-е гг.). Управлять захваченной радиацией надо, конечно, более безопасным цивилизованным способом.

Методы воздействия могут быть разные. Возможно распыление на определенных L -оболочках электронно-захватных препаратов (химическое отравление). Возможны взрывы небольших зарядов в радиационном поясе, чтобы перераспределить населенность оболочек (физическое отравление). В настоящее время проводится эксперимент «Интербол» — воздействие мощными импульсами

радиоизлучения на ионосферу, для чего созданы крупные комплексы антенн на Аляске, в Норвегии и России. Изучается возможность «тонкой подстройки» ионосферы путем изменения ее проводимости. Поскольку магнитосферные токи замыкаются на ионосферу, в принципе можно повлиять на магнитную бурю. «Подстройка» в момент прихода СМЕ и начала магнитной бури, возможно, окажется тем рычагом, который позволит уменьшить интенсивность выпадающих частиц и «унять» тропический циклон, не дав перерасти в ураган. Этот метод — «космический громоотвод», как некогда молниеотвод Франклина, может быть, станет действенной защитой от ураганов — пока еще неизбежных природных катастроф.

КЛИМАТ И ПОГОДА XXI ВЕКА

Солнце — рядовая звезда, не выделяющаяся своими свойствами и положением из мириадов звезд Млечного Пути. Единственное, надо думать, отличие от большинства звезд в том, что на третьей планете ее обширного хозяйства 3 млрд. лет назад возникла жизнь и, претерпев ряд изменений, сохранилась, породив на эволюционном пути думающее существо. Человек, ищущий и любознательный, заселив всю Землю, занимается теперь исследованием окружающего мира с целью познать «что», «как» и «почему». Что, например, определяет земной климат, как формируется земная погода и почему она так резко и порой непредсказуемо изменяется?

На эти вопросы, вроде бы, давно получены обоснованные ответы. А за последние полвека, благодаря глобальным исследованиям атмосферы и океана, создана разветвленная метеослужба, без сводок которой сейчас не обходится ни домохозяйка, идущая на рынок, ни пилот самолета, ни пахарь, ни рыбак — положительно никто. Вот только замечено, что иногда прогнозы попадают впрок, и тогда хозяйки, пилоты, не говоря уж о пахарях и рыбаках, поносят метеослужбу почем зря. Значит, не все еще полностью ясно в погодной кухне, и надо бы внимательно разобраться в сложных синоптических связях. Одна из главных — связь Земля — Солнце, которая дарит нам тепло и свет, но из которой порой, как из ящика Пандоры, вырываются на свободу ураганы, засухи, наводнения и другие экстремальные «погоды». Что порождает эти «темные силы» земного климата?

Климат и погода

Земной климат определяется двумя главными факторами: солнечной постоянной и наклоном оси вращения Земли к плоскости орбиты. Солнечная постоянная – поток солнечной радиации, приходящий на Землю, $1,4 \cdot 10^3$ Вт/м², — действительно неизменна с высокой точностью (до 0,1 %) как по короткой (сезоны, годы), так и по длинной (века, миллионы лет) шкалам. Причиной тому — постоянство солнечной светимости $L = 4 \cdot 10^{25}$ Вт/см², определяемой термоядерным «горением» водорода в центре Солнца, и почти круговая орбита Земли ($R = 1,5 \cdot 10^{11}$ м). «Срединное» положение светила делает его нрав удивительно сносным — ни изменений светимости и потока солнечной радиации, ни перепадов температуры. Спокойная, уравновешенная звезда. И климат Земли поэтому строго определенный. Иное дело погода. В каждой широтной зоне она проявляется как некоторое отклонение от положенного климатического стандарта. Бывает и зимой оттепель, и на деревьях набухают почки. Случается, и в разгар лета налетит непогода с пронизывающим осенним ветром. Погода — это конкретная реализация климата данной широты с возможными (в последнее время частыми) отклонениями-аномалиями.

Модельные предсказания

Аномалии погоды очень вредны, они наносят огромный ущерб. Наводнения, засухи, суровые зимы разрушали сельское хозяйство, приводили к голоду и эпидемиям. Штормы, ураганы, проливные дожди тоже не щадили ничего на своем пути, заставляли людей уходить из разоренных мест. Неисчислимы жертвы погодных аномалий. Усмирить погоду, смягчить ее экстремальные проявления невозможно. Энергетика погодных срывов не подвластна даже сейчас, в энергетически развитое время, когда газ, нефть, уран дали нам большую власть над природой. Энергия урагана средней руки (10^{17} Дж) равна суммарному выходу всех электростанций мира за три часа. Несостоятельные попытки остановить надвигающуюся непогоду предпринимались в прошлом века. И все же наука может помочь. Если нельзя сдержать удары стихии, то, оказалось, можно их предвидеть, чтобы, своевременно принять меры. Стали совершенствоваться, особенно успешно с введением современных компьютеров, модели развития погоды. Самые мощные компьютеры, самые сложные расчетные программы сейчас — у синоптиков (и военных).

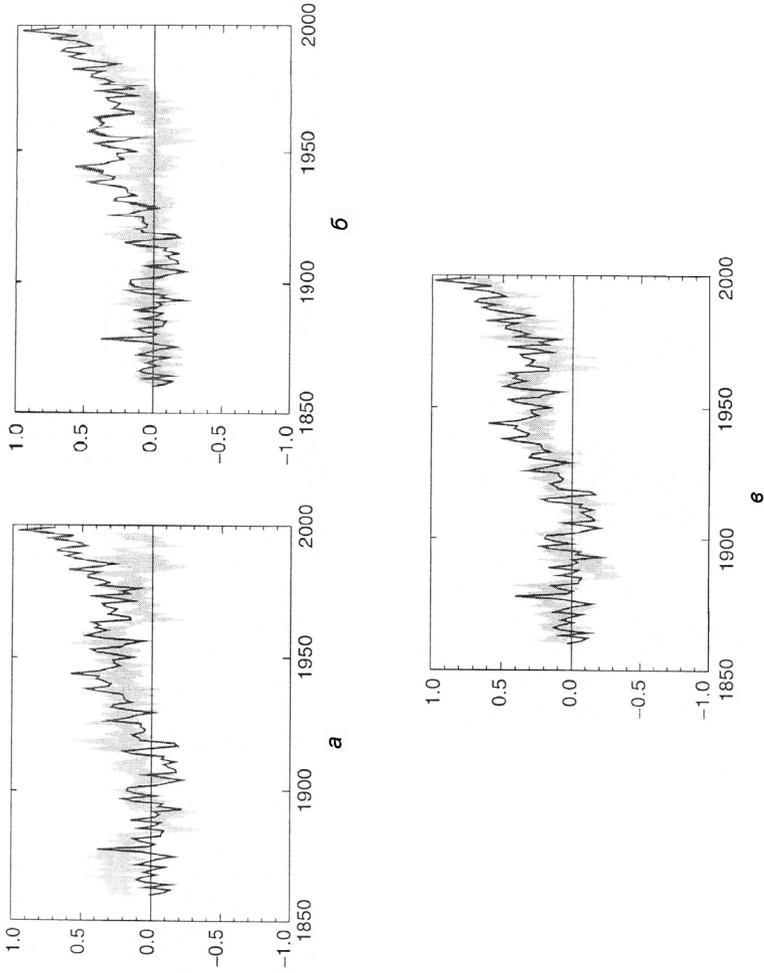


Рис. 23. Сравнение роста температуры, предсказанного моделью (серый цвет) с реальными наблюдениями (черный) для естественных (а), антропогенных (б) и суммарных (в) источников

К концу прошлого века модельные расчеты достигли такого уровня совершенства, что стали хорошо описывать процессы, происходящие в океане (главном факторе земной погоды), на суше, в атмосфере, включая ее нижний слой, тропосферу. Было достигнуто приличное согласие расчета основных погодных факторов (температура воздуха, содержание CO_2 и других «парниковых» газов, нагрев верхнего слоя океана) с реальными измерениями. На рис. 23 приведены графики расчетных и измеренных аномалий температуры за полтора столетия. Таким моделям можно доверять — они и стали рабочим инструментом прогноза погоды. Прогнозы стали обыденным делом, а урон, наносимый погодными аномалиями, резко сократился.

Особое место заняли долгосрочные прогнозы, на десятки и сотни лет, как руководство к действию экономистам, политикам, главам производства — «капитанам» современного мира. Сейчас известно несколько долгосрочных прогнозов на XXI век.

Что век грядущий нам готовит?

Прогноз на такой большой срок, конечно, может быть только приблизительным. Погодные параметры представляются со значительными допусками (интервалами ошибок, как принято в математической статистике). Чтобы учесть все возможности грядущего, разыгрывается ряд сценариев развития. Слишком неустойчива климатическая система Земли, даже лучшие модели, проверенные по тестам прошлых лет, могут допускать просчеты при обращении в далекое будущее.

Алгоритмы проводимых расчетов исходят из двух предположений: 1) постепенное изменение погодных факторов (оптимистический вариант), 2) их резкий скачок, приводящий к заметным изменениям климата (пессимистический вариант).

Прогноз постепенного изменения климата XXI века («Доклад рабочей группы межправительственной комиссии по изменению климата», Шанхай, январь 2001 г.).

Приводятся результаты семи модельных сценариев. Основной вывод — потепление Земли, захватившее прошлый век, будет продолжаться и дальше, сопровождаясь увеличением эмиссии «парниковых газов» (в основном CO_2 и SO_2), ростом поверхностной температуры воздуха (на 2 — 6 °С к концу века, что очень много) и повышением уровня океана (в среднем на 0,5 м за столетие) (рис. 24).

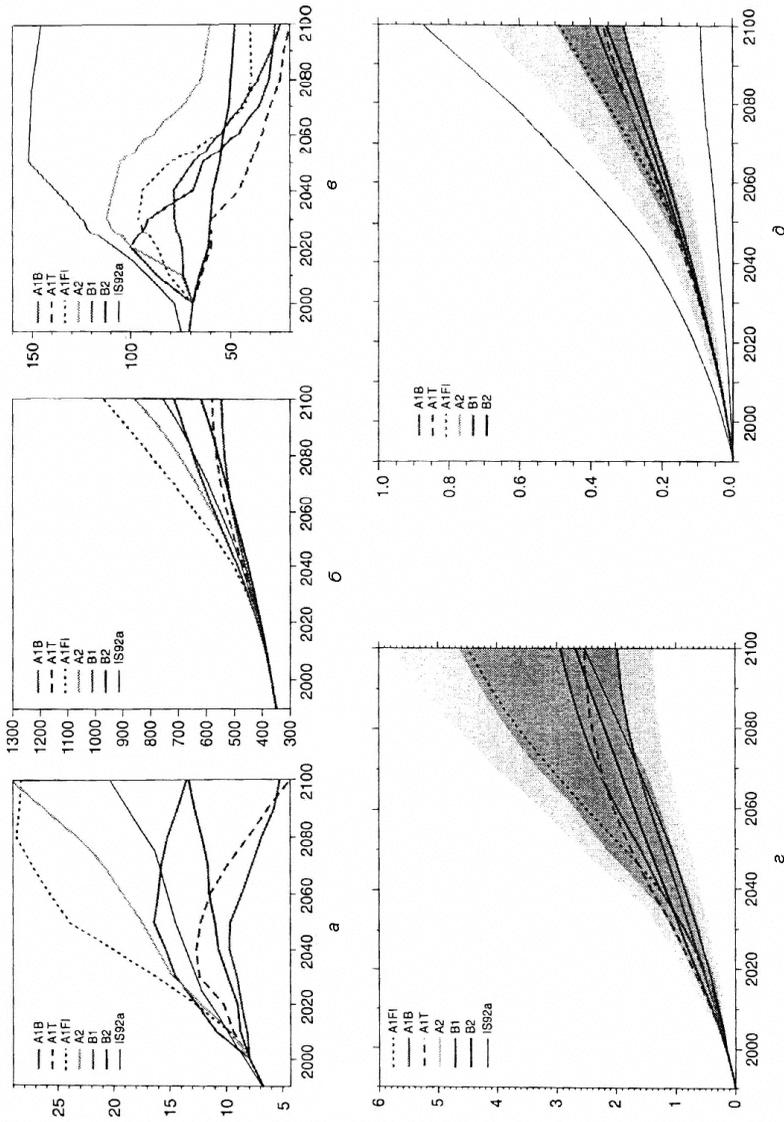


Рис. 24. Климат Земли в XXI веке по семи сценариям развития мирового хозяйства: а) эмиссия CO₂ (млрд т в год); б) концентрация CO₂ (ppm); в) эмиссия SO₂ (млн т в год); г) изменение температуры (°C); д) подъем уровня океана (м)

Некоторые сценарии дают спад во второй половине века эмиссии «парниковых газов», как результат запрета на индустриальные выбросы, их концентрация не будет сильно отличаться от нынешнего уровня. Наиболее вероятные изменения погодных факторов: более высокие максимальные температуры и большее число горячих дней, менее низкие минимальные температуры и меньшее число морозных дней почти всюду, более интенсивные выпадения осадков. Возможные изменения климата — больше летних засухостоев с заметным риском засух, усиление ветров и большая интенсивность циклонов.

Прошедшие пять лет, наполненные сильными аномалиями (страшные североатлантические ураганы, не отстающие от них тихоокеанские тайфуны, суровая зима 2006 г. в Северном полушарии, практическое отсутствие оной в 2007 г.) показывают, что новый век, по-видимому, пошел не по «оптимистическому» пути. Век только начался, отклонения от предсказанного постепенного развития могут сгладиться, но его «бурное начало» дает основание сомневаться в первом варианте.

Сценарий резкого изменения климата XXI века (П. Шварц, Д. Рэнделл, октябрь 2003).

Это не просто прогноз, это сигнал тревоги для «капитанов мира», успокоенных постепенным изменением климата, которое небольшими средствами можно всегда подправить в нужную сторону и не бояться, что ситуация выйдет из-под контроля. Новый прогноз исходит из наметившейся тенденции роста экстремальных аномалий. Можно считать, что он начинает сбываться. Мир пошел по «пессимистическому пути».

Первая декада века — продолжение постепенного потепления, не вызывающее пока особой тревоги, но все же с заметным темпом ускорения. Северная Америка, Европа, частично Южная Африка будут иметь на 30 % больше жарких и меньше морозных дней, увеличится число и интенсивность погодных аномалий, бьющих по сельскому хозяйству. Все же такую погоду нельзя признать особо суровой, угрожающей мировому порядку.

Но к 2010 г. накопится такое число опасных изменений, которое приведет к резкому скачку климата в совершенно непредвиденную сторону. Гидрологический цикл (испарение, выпадение осадков) ускорится, что еще больше повысит температуру воздуха. Водяной пар — мощный естественный «парниковый газ». Из-за повышения поверхностной температуры высохнут леса, пастбища, начнутся массовые лесные пожары (уже сейчас видна угроза их распростра-

нения). Концентрация CO_2 увеличится настолько, что обычное поглощение водой океанов и растениями суши, определявшее темп «постепенного изменения», перестанет работать. Парниковый эффект пойдет в разгон. Начнется обильное таяние снега в горах, в приполярной тундре, площадь полярных льдов резко сократится, что сильно уменьшит солнечное альbedo. Температура воздуха и суши катастрофически растет. Сильные ветра из-за большого градиента температуры вызывают песчаные бури, приводящие к выветриванию почвы. Нет никакого контроля за стихией и возможности хоть чуточку ее подправить. Темп резкого изменения климата наберет ход. Беда охватывает все регионы.

В начале второй декады произойдет замедление термоклинной циркуляции в океане, а он — главный творец погоды. Из-за обилия дождей и таяния полярных льдов океаны станут более пресными. Обычный перенос теплых вод с экватора на средние широты будет приостановлен. Гольфстрим, теплое атлантическое течение вдоль Северной Америки к Европе, гарант умеренного климата Северного полушария, замрет. Потепление в этом регионе сменится резким похолоданием и уменьшением осадков. Всего за несколько лет вектор изменения погоды повернет на 180° , климат станет холодным и сухим.

В этом месте модели не дают однозначного ответа. Станет ли климат северного полушария более холодным, что еще не является мировой катастрофой, или наступит новый ледниковый период продолжительностью в сотни лет, как бывало на Земле не раз и не так давно (Малый ледниковый период 1600 — 1900 г., Событие-8200, Ранний Триас — 12700 лет назад, рис. 25).

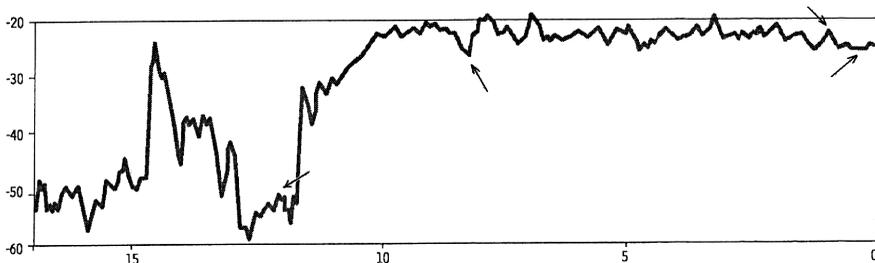


Рис. 25. Средняя температура над Гренландией ($^{\circ}\text{F}$) тысячи лет назад по анализу льда: стрелками показаны климатические особенности — «Малый ледниковый период» (1300 — 1600), «событие 8200 года» и резкое похолодание «Раннего Триаса»

Худший вариант, который может случиться, таков. Разрушительные засухи в регионах производства продуктов питания и большой плотности населения (Северная Америка, Европа, Китай). Снижение осадков, пересыхание рек, истощение запасов пресной воды. Сокращение пищевых запасов, массовый голод, распространение эпидемий, бегство населения из зон бедствия. Нарастание международной напряженности, войны за источники питания, питьевые и энергетические ресурсы. В то же время в районах традиционно сухого климата (Азия, Южная Америка, Австралия) — проливные дожди, наводнения, гибель сельскохозяйственных угодий, не приспособленных к такому обилию влаги. И здесь падение урожаев, нехватка продуктов питания. Коллапс современного устройства мира. Резкое, на миллиарды, сокращение населения. Отброс цивилизации на века, приход жестоких правителей, религиозные войны, крах науки, культуры, морали. Совершившийся Армагеддон!

Резкое, непредсказуемое изменение климата, к которому мир просто не сможет адаптироваться.

Вывод сценария неутешителен: надо принимать срочные меры, а какие, неясно. Поглощенный карнавалами, чемпионатами, развлекательными шоу, просвещенный мир, который мог бы что-то «предпринять», просто не обращает внимания — «Ученые пугают, а нам не страшно!»

Солнечное дыхание

Есть, однако, третий вариант прогноза земного климата, согласный с разгулом аномалий начала века, но не приводящий к вселенской катастрофе. Он основан на наблюдениях нашей звезды, которая, при всем видимом спокойствии все же обладает заметной активностью.

Здесь возникает прямая связь с темой земной погоды и изменения климата. Хроника времен Маундеровского минимума определенно указывает на аномальное поведение погоды, близкое тому, что происходит в наши дни. По всей Европе (возможно, во всем Северном полушарии) в это время наблюдались удивительно холодные зимы. Практически отсутствовали полярные сияния, что указывает на уменьшение интенсивности солнечного ветра. Дыхание Солнца, как будто во время сна, ослабевало, и именно это привело к изменению климата. Погода стала холодной, ветреной, капризной.

Результаты наблюдений Солнца в 23-м цикле (1996 — 2006), проведенные космическими аппаратами SOHO, TRACE (США, Европа), КОРОНАС-Ф (Россия), показали, что главными «переносчиками» солнечного влияния выступают СМЕ. Они в первую очередь определяют земную погоду, а остальные «носители» (солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, выбросы во время солнечных вспышек) дополняют картину. Орбитальная станция SOHO, ведущая непрерывные наблюдения уже 10 лет, зарегистрировала около 1500 СМЕ.

В общих чертах воздействие СМЕ на земную погоду сейчас хорошо известно (см. разд. «Солнце и земная погода»). Появляется новый «энергетический источник», влияющий на верхний слой атмосферы, а через его неустойчивость к вертикальным перемещениям и на тропосферу. Этот «источник», управляемый солнечной активностью, «расшатывает» погоду, порождая циклоны и штормы. Главный итог его вмешательства — дестабилизация погоды: штиль сменяется бурей, сушь — обильными осадками, дожди — засухой. Примечательно, что все погодные изменения начинаются вблизи экватора: тропические циклоны, перерастающие в ураганы, переменные муссоны, загадочный Эль Ниньо.

Согласно «солнечному сценарию» погодных аномалий прогноз на XXI век более спокойный. Климат Земли изменится незначительно, но режим погоды претерпит заметный сдвиг, как это было всегда при замирании солнечной активности. Он может быть умеренным (более холодные, чем обычно, зимние и более дождливые летние месяцы), если солнечная активность снизится до $W_{\max} \approx 50$, как было в начале XIX и XX вв. Он может стать более сильным (похолодание климата всего Северного полушария), если случится новый Маундеровский минимум ($W_{\max} < 10$). В любом случае похолодание климата будет не кратковременным, а продолжится, вместе с аномалиями погоды, несколько десятилетий.

Что ожидает нас в ближайшее время, покажет 24-й цикл, который уже начался. С большой вероятностью, основанной на анализе солнечной активности за 400 лет, его амплитуда W_{\max} станет меньше, солнечное дыхание еще ослабнет. Следите за СМЕ. Их число, темп, последовательность определяют погоду начала XXI в. И, конечно, совершенно необходимо понять, что же происходит с любимой звездой, когда ее активность замирает. Это задача сейчас стала не только научной. Ее решение кардинально необходимо для выяснения условий сохранения обычного течения жизни на Земле.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

XX в. был щедр на научно-технические открытия: он — атомный, космический, информационный. В равной мере его можно назвать и энергетическим — веком поиска и освоения новых источников энергии. Энергия нужна миру, как кровь организму. За нее идет непрерывная борьба. Особое место в ней принадлежит солнечной энергии.

Солнце — источник всего на Земле: света, тепла, жизни. Только солнечный свет дарил людям тепло до того, как они научились добывать огонь — солнечная энергетика была первой, освоенной человеческим сообществом. Недаром оно возникло под жарким солнцем экватора, в Центральной Африке. И в будущие эпохи энергетика Солнца станет наиболее приемлемой благодаря своей естественности, неисчерпаемости и экологической чистоте.

Почему же до сих пор она оставалась в тени? Почему в течение тысячелетий человек предпочитал согреть себя и готовить пищу, сжигая дрова, уголь, нефть, создавая сооружения на быстрых реках, добывая опасный радиоактивный уран? Потому что для технически неразвитого общества, прикованного к земной поверхности, солнечные электростанции (СЭС) были бы маломощными, громоздкими, зависящими от погоды — практически неконкурентными. Только фантасты чутьем угадывали их будущий неизбежный взлет.

С выходом в космос, созданием орбитальных станций и бурным развитием электроники (в первую очередь, полупроводников) ситуация резко изменилась. Сейчас солнечная энергетика — не далекая мечта, а каждодневная реальность, занимающая все больше места на практике.

Энергетические запросы Земли

Население Земли неуклонно растет, уже перевалило за 6 млрд и по прогнозам к 2020 г. достигнет 7,4 млрд. Человек освоил все континенты и практически все земные широты и долготы. Он может сравнительно комфортно проживать в некогда диких условиях высокогорья, тайги, приполярных областей. На повестке дня освоение шельфа морей и океанов, создание подводных поселений. В более далекой перспективе — колонии на Луне, Марсе и других планетах. Распространение цивилизации по планете и ближнему космосу так

же неизбежно, как в прошлом экспансия в Новый Свет и колонизация открываемых земель. Это лишь вопрос времени. И энергии.

В настоящее время человечество потребляет в год около 10 млрд т у. т. (условного топлива)* и это количество постоянно растет, в первую очередь за счет развивающихся стран, стремящихся обеспечить своим жителям такие же условия, как в развитых странах. В США на человека в среднем расходуется 10 кВт·ч электроэнергии в день. Уровень потребления слаборазвитых стран в десятки раз меньше, а в них проживает 2/3 населения Земли. Если будет продолжена тенденция выравнивания уровней (даже без учета роста удельного потребления в передовых странах), общие потребности в энергии вырастут в несколько раз и к 2020 г. достигнут 34 млрд т у. т. Безудержный рост энергетики очень опасен — он может вызвать тепловой «перегрев» Земли и необратимые изменения климата.

Экология энергий

Очевидно, существующий в настоящее время баланс используемых источников энергии надо существенно изменять. В первую очередь, это касается ТЭС, вырабатывающих 63 % потребляемой электроэнергии.

*Баланс производства электроэнергии в мире, %***

Тепловые электростанции (уголь, нефть, газ).....	63
Гидроэлектростанции.....	19
Атомные электростанции	17
Геотермальные электростанции.....	0,5
Солнечные и ветровые станции	0,1

Их недостатки очевидны: истощение мировых запасов ископаемого горючего, загрязнение окружающей среды вредными выбросами (окислы азота и серы, вызывающие кислотные дожди, токсичные тяжелые металлы, радиоактивные элементы); сжигание атмосферного кислорода, планетарные запасы которого не безграничны. Огромный вред наносят добыча, переработка и транспортиров-

* 1 т у. т. = $7 \cdot 10^9$ кал = $8,14 \cdot 10^3$ кВт·ч.

** Бюллетень МАГАТЭ, 1997. Т.39. № 1. С.6.

ка огромных масс ископаемого топлива. Наконец, открытая бесхозяйственность — сжигать газ и нефть — ценнейшие природные продукты для химической промышленности. Доля ТЭС, сравнительно просто решавших энергетическую проблему в XX в., должна убывать — это общее требование экологов, экономистов, самих энергетиков.

Чем заменять? Гидростанции, широкое строительство которых в нашей стране в 1950 — 70 гг. привело к ряду отрицательных явлений (вред сельскому хозяйству и рыбному промыслу, загрязнение вод), вряд ли подходят для замены. Их доля в мировой энергетике невелика. Они призваны решать энергетические проблемы отдельных стран и регионов, на выгодных для этой цели горных реках (Швейцария, Норвегия, Восточная Сибирь). ГЭС на полноводных равнинных реках требуют больших капитальных затрат, приводят к сезонно нестабильной энергетике и серьезным экологическим нарушениям.

Роль мирового лидера вполне мог бы взять на себя «мирный атом». Доля АЭС постоянно возрастала с момента пуска первой в мире Обнинской АЭС (1959), но Чернобыльская авария приостановила рост, а в некоторых странах привела даже к отказу от атомных станций. Сейчас «чернобыльский синдром» преодолен, и во многих регионах, включая нашу страну, стали строиться новые атомные станции и вводиться более мощные энергоблоки.

Преимущества атомной энергетики хорошо известны — высокая калорийность ядерного топлива, в миллионы раз выше, чем у ископаемого сырья, малые затраты на добычу и транспортировку, отсутствие многотонных вредных выбросов в атмосферу, независимость от атмосферного кислорода. Не менее известны и вызывают определенный страх ее недостатки. Это, в первую очередь, вопросы хранения и переработки радиоактивных отходов, опасность радиоактивного загрязнения при авариях, страшные последствия в случае террористических актов. По этой причине современные АЭС — это лишь временные, переходные типы установок, использующих энергию атомных ядер, которые необходимо будет заменить на более «чистые» и безопасные термоядерные станции (ТЯЭС). Но замена, исходя из результатов полувекových исследований, не может быть скорой и займет, по-видимому, все нынешнее столетие. Слишком велики технические трудности создания высокотемпературной дейтерий-тритиевой плазмы в реакторах с положительным выходом энергии. Многие инженерные проблемы еще

не нашли решения. Более близки к воплощению комбинированные установки, сочетающие управляемый термояд с наработкой нового ядерного горючего для АЭС, но они, по сути, тоже «временные» на пути к желанной неисчерпаемой термоядерной энергетике.

Рафинированную атомную энергию, которой бы не боялся человек, можно получать в электроядерном бридинге — процессе, известном давно, но предложенном в качестве источника энергии сравнительно недавно. Он представляет собой то же освобождение внутриядерной энергии, как при делении ядер, но не в результате цепной ядерной реакции, а в отдельных актах взаимодействия высокоэнергичных частиц с тяжелыми ядрами (уран, торий). Неуправляемая цепная ядерная реакция, которая разрушила 4-й блок ЧАЭС, здесь просто невозможна, однако, многие другие опасности (накопление радиоактивности, возможность загрязнения) остаются и ситуация в этом плане кардинально не меняется.

Из возможных наследников, толпящихся у трона отходящего энергетического короля, наиболее достойно выглядит солнечный принц — даровая и практически неисчерпаемая энергия нашей звезды, экологически чистая уже потому, что миллиарды лет поступает на Землю и все земные процессы с ней свыклись. Энергетический поток, который высокоразвитая цивилизация просто обязана полностью взять под контроль, не изменяя нашего климата, если она серьезно претендует на титул высокоразвитой. Прогноз развития мировой энергетике показан на рис. 26.

Несколько ключевых цифр. Плотность солнечной радиации на орбите Земли составляет $1,4 \text{ кВт/м}^2$. За год на Землю поступает $10^{18} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, 2 % из которых могут быть использованы без заметного ущерба для окружающей среды (пустыни, горы, тундра), что эквивалентно энергии, получаемой от сжигания $2 \cdot 10^{12} \text{ т}$ у. т. Последняя цифра сопоставима с мировыми топливными ресурсами ($6 \cdot 10^{12} \text{ т}$ у. т.) и в сотни раз превышает современные потребности планеты. Солнечная энергия, разумно усваиваемая, способна обеспечить человечество на века.

Для любителей заглядывать дальше можно добавить, что полная светимость Солнца равна $4 \cdot 10^{23} \text{ кВт}$ или мощности 10^{17} крупных АЭС. При дальнейшем освоении космоса, когда станет возможным располагать СЭС ближе к Солнцу (орбиты Меркурия и Венеры), у солнечной энергетике откроются неограниченные возможности. В пределе звезда может быть полностью окружена искусственной сферой, преобразующей все излучение в полезную энергию. Сол-

нечная энергия неисчерпаема — при бесконечном росте наших технических возможностей.

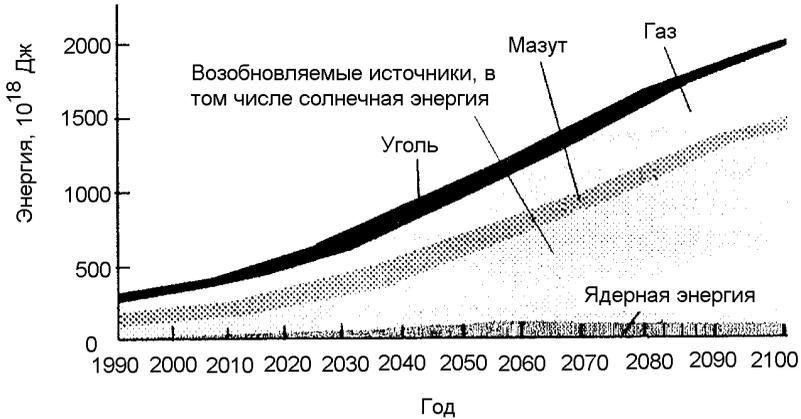


Рис. 26. Прогноз развития мирового энергоснабжения (эксаджоули) по «оптимистическому» сценарию МГЭИК (Журнал МАГАТЭ, 2001. Т.42. № 2. С.34). Доля возобновляемых источников, среди которых доминирует солнечная энергия, неуклонно растет и к концу века должна составить 65 %

Наземные солнечные установки

Причина медленного развития наземной энергетики Солнца проста: очень слаб поток энергии, на 3 — 4 порядка меньше, чем при сжигании естественного топлива, да к тому же имеет прерывистый характер, зависимость от времени суток, сезона и погоды. Средний поток солнечной радиации на поверхности Земли на широте 40° составляет $0,3 \text{ кВт/м}^2$ — почти в пять раз меньше того, который падает на границу атмосферы.

Чтобы компенсировать недостатки, надо собирать солнечный поток с большой площади, применяя различные концентраторы, и запасать энергию на нерабочее время с помощью аккумуляторов. Пока что это удается «малой энергетике», предназначенной для питания электроэнергией домов, небольших предприятий.

Используются разные способы преобразования солнечной энергии: фототермический, фотоэлектрический и фотохимический. В первом, простейшем, рабочее тело (теплоноситель) нагревается в коллекторе (системе светопоглощающих труб) до высокой температуры и служит для отопления помещений. Коллектор располага-

ется на крыше здания так, чтобы его освещенность в течение дня была наибольшей. Часть тепловой энергии аккумулируется: краткосрочно (несколько дней) с помощью тепловых или механических аккумуляторов, долгосрочно (на зимний период) — химическими аккумуляторами. За день 1 м² солнечного коллектора простой конструкции может дать 50 — 70 л горячей воды (80 — 90 °С). Типовые гелиоустановки давно эксплуатируются в южных широтах, снабжая горячей водой для обогрева и хозяйственных нужд.

За последние 20 лет широкое распространение получили «солнечные дома», хозяйства от коттеджа до поместья, все энергетические потребности которых обеспечиваются собственной солнечной установкой. Не подводятся провода извне, нет счетчиков электроэнергии и теплой воды, не нужны запасы дров, угля, мазута. Никаких отключений и перебоев из-за прихотей Минтопэнерго — сам себе хозяин, сам себе министр. Только все это пока, к сожалению, не у нас, а в США, Японии, Западной Европе, хотя климатические условия позволяют иметь это удобство во многих наших регионах. В чем дело, не очень понятно — то ли стоит дорого, то ли мода не дошла.

«Солнечный дом», обеспечивающий себя не только теплом, но и электроэнергией, использует другой тип гелиоустановки. В этом случае лучшим рабочим телом будут жидкости типа фреона с малой теплотой испарения, но из-за опасного загрязнения в случае утечки (влияние на озоновый слой атмосферы) их промышленное производство сейчас запрещено. Они работают при температуре около 100 °С, что не требует специальных концентраторов солнечного потока. Если теплоноситель вода, температура нагрева должна быть 200 — 500 °С и обязательно использование зеркал-концентраторов, отражающих свет на коллектор.

Все чаще применяются в солнечных установках фотоэлектрические преобразователи на основе кремния и арсенида галлия. Последние обладают лучшей тепловой устойчивостью и более высоким КПД (до 20 %). Применение гетероструктурных полупроводников, за открытие и внедрение которых академик Ж.И. Алферов получил Нобелевскую премию, увеличивает эффективность преобразователей вдвое. Панели солнечных преобразователей, располагаемых, как правило, наверху, заменяют тепловой коллектор, и вырабатывают электрический ток.

«Солнечный дом» — это современный уровень культуры жилья. Его успехи и распространение в значительной степени зависят от

простой истины — экономное отношение к получаемой энергии. Он должен иметь надежную теплоизоляцию, современную вентиляционную технику, кондиционеры, т.е. не выбрасывать «тепло на ветер». Как показывает опыт, только за счет экономии тепла расходы электроэнергии сокращаются в несколько раз.

Границы малой солнечной энергетики постоянно расширяются и теперь она способна обеспечивать энергией не только дома, но и заводы. В качестве примера можно назвать металлургический завод под Ташкентом, экспериментальные СЭС-5 в Крыму и «Solar-1» в Калифорнии. Это гелиостанции башенного типа с котлом, поднятым высоко над землей, и большим числом гелиостатов, расположенных у подножия. Зеркала должны быть подвижными, отслеживать дневное перемещение Солнца с помощью механической системы, управляемой компьютером, что усложняет установку и сказывается на стоимости производимой энергии. Вырабатываемый котлом пар, как на тепловых станциях, приводит в действие электрогенератор.

Одно из полезных применений гелиотермических установок — опреснение соленой воды. На рис. 27 показана схема опреснителя, разработанного в МИФИ. Установка состоит из шести гелиотермических модулей, поворотного устройства, дистилляционного блока и двух фотоэлектрических модулей. В гелиотермических модулях вода первого контура нагревается до кипения (коэффициент поглощения солнечного света $\sim 0,95$). Пар из гелиотермических модулей поступает в дистилляционный блок, где доводит до кипения соленую воду вторичного контура. Поворотное устройство автоматически отслеживает перемещение Солнца, поворачивая за ним плоскости модулей. Фотоэлектрические модули (полупроводниковые панели) обеспечивают автономную работу установки, давая ток для мотора поворотного устройства, водяных насосов и осветительных ламп. Суточная производительность: 400 л воды и 1,5 кВт·ч электроэнергии. Установка модульная, легко собирается и наращивается.

Солнечные электростанции с мощностью 0,1 — 10 МВт были построены и успешно работают во многих странах с «хорошим солнцем» (США, Франция, Италия, Япония). Появились проекты более мощных СЭС (до 100 МВт). Главное препятствие их широкого распространения — высокая себестоимость энергии, в 6 — 8 раз больше, чем на ТЭС. Имеется тенденция снижения этого показателя (за счет более простых гелиостатов, более эффективных полу-

проводников, легких ленточных панелей), но пока наземные СЭС не могут экономически конкурировать с ТЭС. Другое дело — соображения экологического порядка. Солнечные станции намного «чище» тепловых и свою нишу в энергетике они, несомненно, найдут. Прогресс науки и улучшение международного климата, когда СЭС, расположенная в пустынной местности, будет снабжать энергией сразу несколько стран, будут способствовать их внедрению. И все же наземные СЭС вряд ли способны полностью решить проблему «большой энергетики», как это делают в настоящее время крупные ТЭС и АЭС мощностью порядка 10 ГВт. Столь мощные СЭС были бы чрезвычайно громоздки, должны отчуждать огромные территории, строиться в пустынных местах и передавать электроэнергию на большие расстояния. При этом пропадает экологическая «чистота» и не устраняется опасность теплового нагрева Земли. Чтобы не нарушать экологию, надо выносить СЭС в космическое пространство.

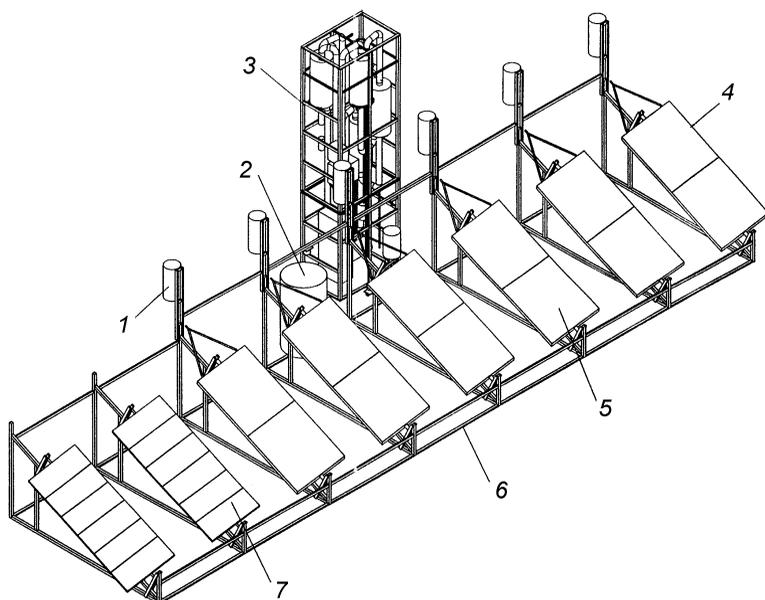


Рис. 27. Гелиотермическая опреснительная установка, разработанная в МИФИ:
 1 — сепаратор; 2 — поворотное устройство; 3 — дистилляционный блок;
 4 — гелиотермический блок; 5 — гелиотермический модуль;
 6 — поддерживающая ферма; 7 — фотоэлектрический модуль

Космические солнечные станции

Идею солнечной космической электростанции (СКЭС) предложил американец П.Е. Глезер в 1968 г. Она включала три необходимых элемента, которые не изменились за прошедшее время: размещение на ИСЗ солнечных батарей, преобразующих солнечный свет в электрический ток; экваториальная геостационарная орбита, обеспечивающая постоянную освещенность панелей и «зависание» станции над определенным местом Земли; преобразование тока в СВЧ-излучение и передача его направленным пучком на наземную приемную антенну (рис. 28).

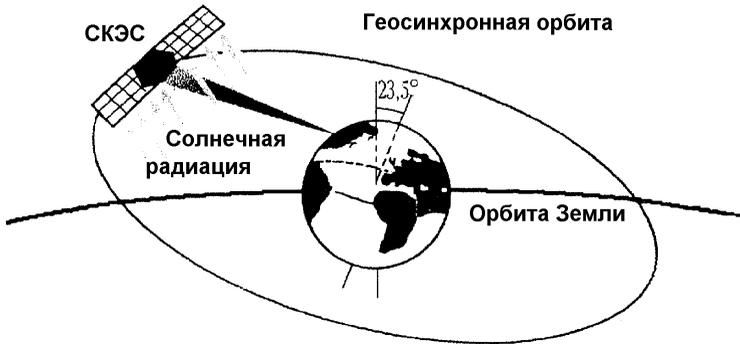


Рис. 28. Принципиальная схема солнечной космической электростанции

Достоинства СКЭС очевидны: увеличение плотности потока солнечной энергии, рассеивание фонового тепла в космос, отсутствие контакта с земной природой. Сразу видны и большие трудности. Кроме чисто технической задачи, связанной с КПД фотоприемников и необходимостью разворачивать в космосе солнечные панели многокилометровых размеров, осталась неясной проблема сжатия пучка излучения, который на расстоянии 36 тыс. км (радиус геостационарной орбиты) должен иметь поперечный размер не больше 10 км (предельный размер наземной антенны). Угол расходимости пучка, как легко подсчитать, не должен превышать 1 угл. мин. Несмотря на заманчивость и кажущуюся простоту идеи, столь серьезные трудности не могли быть быстро преодолены и реализация «истинно солнечной энергетики» перенесена в XXI в., став одной из важнейших проблем века.

Известно несколько типов преобразователей солнечной радиации (машинные — с газовыми и паровыми турбинами, прямые (без стадии механической работы) — на основе различных термо- и фотоэлементов), но сейчас, по-видимому, имеют твердый приоритет солнечные полупроводниковые батареи, давно успешно работающие в космосе. Это кремниевые полупроводники с добавками алюминия и лития, в которых происходит прямое преобразование солнечной радиации в электрический ток. Они надежны, достаточно эффективны (КПД = 15 %) и относительно недороги. Надо бы только (!) еще повысить их КПД, изготавливать в виде тонких пленок большой площади, уметь разворачивать в космосе и поддерживать постоянную ориентацию на Солнце. Задачи не из легких. Удельные характеристики производимых сейчас тонких солнечных элементов составляют 1 кВт/м² и 200 Вт/кг. Солнечные батареи СКЭС мощностью в 10 ГВт (таков запрос «большой энергетики») будут иметь площадь 50 кв. км и вес 10 тыс. т. Не проще обстоит дело и с вопросом передачи энергии на Землю узким СВЧ-пучком.

Есть принципиальные неясности и сомнения. Как будет влиять на атмосферу мощный пучок СВЧ? Какая часть его по пути рассеется и как повлияет на окружающую природу? Что, например, будет с птицами и насекомыми, попадающими в запретную зону приемной станции? Как велика должна быть зона отчуждения? Не будут ли перечеркнуты все наши надежды на «экологически чистую солнечную энергетику»?

Пока не создано ни одного действующего макета СКЭС.

Шаги развития солнечной энергетики

Начиная с 1970-х гг., проводятся поисковые исследования по проблеме СЭС, как наземных, так и космических. «Малая солнечная энергетика» уверенно входит в быт («солнечные дома», электростанции малой мощности). Интернет полон сообщениями о новых достижениях. Например, сообщается, что в Израиле в сентябре 2000 г. вступила в строй Solel Solar System, самая передовая по использованию солнечной энергии. Расположенная на склонах Бейт-Шемеша (Дом Солнца), она занимает площадь в 860 кв. м, использует паровую турбину в сочетании с передовой технологией и компьютерным обеспечением.

В 1975 г. Лаборатория реактивного движения совместно с НАСА (США) провела наземную трансляцию пучка СВЧ мощностью 30 кВт

на расстояние в 1,6 км. Результат оказался удовлетворительным, но это, конечно, далеко от мощности и проходимого пути в случае реальной СКЭС. Японское агентство по космическим исследованиям сообщало о разработке нового метода передачи электроэнергии из космоса на Землю. Был проведен лабораторный эксперимент с солнечными батареями, освещаемыми мощными галогенными лампами, имитирующими солнечную радиацию. Электрический ток преобразовывался в микроволновое излучение, которое в приемной антенне снова трансформировалось в электричество. Полученные результаты позволяют рассчитывать, что к 2020 г. подобная установка сможет работать на ИСЗ с геостационарной орбитой и передавать энергию на земную антенну диаметром 4 км. Утверждается, что данный способ передачи не зависит от погоды и является экологически чистым.

Орбитальные солнечные станции не потеряли своей привлекательности. Если на этом пути не произойдет ничего неожиданного, их развитие и становление займет не меньше полувек. Столько же, по современным прогнозам, требуется для создания действующих ТЯЭС. Эти два гиганта энергетики XXI в. будут конкурировать между собой, вместе замещая традиционные ТЭС. Никто не возьмется предсказать, кто из них станет главным.

РУКОТВОРНОЕ СОЛНЦЕ

Другое направление энергетики XXI в., способное обеспечить человечество неиссякаемым источником энергии, — зажечь искусственные солнца на Земле, в реакторах управляемого термоядерного синтеза (УТС). Для земных условий, однако, совершенно не годятся известные реакции солнечных циклов ввиду их крайне медленного протекания (с участием процессов слабого взаимодействия). Наиболее приемлема реакция синтеза тяжелых изотопов водорода, дейтерия ${}^2\text{H}$ (d) и трития ${}^3\text{H}$ (t):



с энергией реакции $Q = m_d + m_t - m_{\text{He}} - m_n = 17,6$ МэВ (m — массы соответствующих ядер).

В отличие от взрыва водородной бомбы, где также используется реакция (10), УТС должен протекать в разреженной и очень нагретой дейтерий-тритиевой плазме. Высокая температура $T = 10^8$ К, почти в десять раз превышающая температуру в центре Солнца, нужна для

того, чтобы ядра дейтерия и трития свободно подходили на расстояния действия ядерных сил, преодолевая кулоновское отталкивание. Плотность плазмы порядка 10^{14} атом/см³ (10^{-5} от плотности газа при нормальном давлении), ограничена возможностью ее удержания магнитным полем, препятствующим тепловому разлету. Еще одно условие УТС — сохранение высокой «температуры» плазмы достаточно долго (не меньше 1 с), чтобы выделение энергии за счет реакций синтеза превысило потери энергии на создание и разогрев плазмы.

Высокотемпературная плазма очень своенравна и трудно управляема. Этим обусловлены все трудности, с которыми столкнулись физики, задумавшие УТС еще в 1950-х гг. (после успешных испытаний водородного оружия). Осуществить дейтерий-тритиевый взрыв оказалось более простым делом, чем выполнить условия УТС. Генеральным направлением стала идея магнитного удержания плазмы, высказанная в 1952 г. А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом: плазма должна быть заключена в магнитную ловушку, в которой она может нагреваться до нужной температуры, изолироваться от стенок реактора и оставаться горячей длительное время. Реализация идеи заняла несколько десятилетий, пока не были изучены законы поведения плазмы и найдены пути обуздания ее строптивой неустойчивости, приводящей к утечкам из активной зоны, охлаждению и энергетическим потерям. Были испытаны разные типы магнитных ловушек: открытые, замкнутые, разных конфигураций. Было предложено несколько путей УТС: магнитный термояд — с удержанием плазмы в магнитных ловушках (токамаки, сталлараторы, открытые системы с магнитными зеркалами), инерциальный термояд (лазерный, пучковый), в котором не принимались никакие меры удержания плазмы и она вступала в реакции синтеза только на то короткое время ($\sim 10^{-9}$ с), пока частицы, имеющие массу, не разлеталась из-за теплового давления. Это путь импульсного термояда, в котором энергия выделяется в последовательной серии микровзрывов дейтерий-тритиевых таблеток, нагреваемых и сжимаемых подводимыми пучками (наподобие двигателя внутреннего сгорания автомобиля). Метод инерциального УТС был предложен А.Д. Сахаровым (1960), а конкретный путь реализации (лазерный термояд) — Г.Н. Басовым и О.Н. Крохиным (1964).

Несколько в стороне стоит «холодный термояд» или, более правильно, мю-катализ. И это направление работ было выдвинуто тоже у нас (А.Д. Сахаров, Я.Б. Зельдович, 1957). Суть его заключает-

сы в использовании нестабильной частицы — отрицательно заряженного мюона, масса которого в 200 раз больше массы электрона, а время жизни равно 2 мкс. Мюон по своим свойствам очень похож на электрон, в частности, он может замещать электрон в атоме, но по правилу квантования орбита мюона оказывается в 200 раз ближе к ядру, чем орбита электрона. Атомы дейтерия и трития, в которых место электрона занял мюон, могут объединяться в молекулы, где ядра дейтерия и трития находятся на расстоянии 10^{-11} см, достаточно близко, чтобы с заметной вероятностью проходил квантово-механический подбарьерный переход и реакция синтеза (10). Образуется ядро гелия, выделяется положенная энергия, а мюон, ставший вновь свободным, может сесть на орбиту соседнего атома, заменив в нем электрон. Все повторится вновь, произойдет новое сближение ядер и новая реакция синтеза. Отрицательный мюон выступает здесь в роли активного посредника, ядерного Фигаро, сводящего вместе дейтерий и тритий. За время своей короткой жизни мюон успевает осуществить до 100 реакций. Не нужны высокие температуры, нет необходимости в капризной плазме с ее неустойчивостью, отпадает необходимость создания магнитных полей и интенсивных лазеров. Но дается это не даром — нужны мюонные пучки, получаемые на ускорителях. Энергетически выгодный синтез будет, если выделяемая энергия превысит затраты на ускорение частиц.

Из всех путей УТС наиболее «продвинутым» в настоящее время считается метод магнитного термояда на установках типа токамак (токовая камера с магнитными катушками), разработанный в Москве в Курчатовском институте. На рис. 29 показана самая крупная в нашей стране экспериментальная установка «Токамак-15». Позднее на аналогичных установках за рубежом — TFTR (США), JET (Европа), JT-60 (Япония) были достигнуты требуемые параметры УТС. Эти гигантские установки были чисто исследовательскими и в большинстве своем не использовали дейтерий-тритиевую смесь (по причине радиоактивности трития). Плазма сейчас ведет себя вполне прогнозируемым образом и исследования уже достигли границ энергетически выгодного УТС и даже превзошли их по отдельным параметрам. Так, получена температура 400 млн град, что в 4 раза больше необходимой. А на установке TFTR, работавшей на смеси дейтерия и трития, была достигнута мощность термоядерных реакций 10 МВт.

Следующий шаг — создание действующего прототипа ТЯЭС, установки больших размеров с положительным выходом энергии. Такая установка, стоимость которой должна быть намного больше

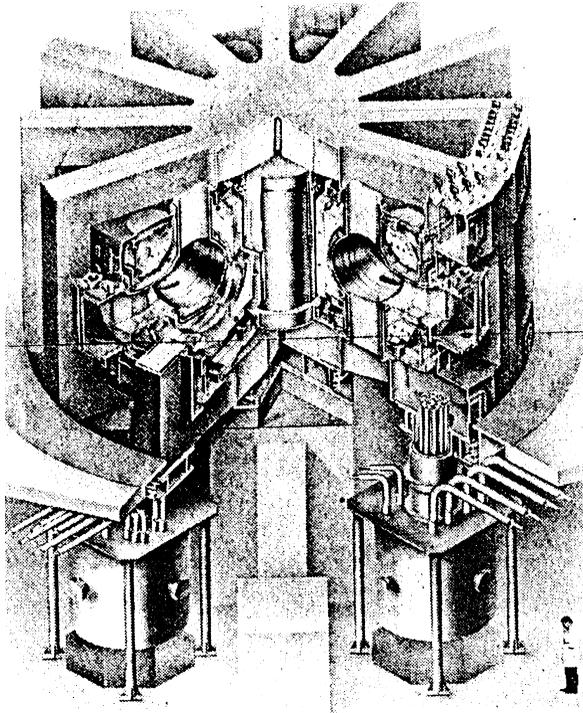


Рис. 29. Макет установки «Токамак-15»

существующих, не под силу одной стране. В настоящее время разработан проект Международного экспериментального термоядерного реактора ITER (рис. 30), в создании которого участвовали Европа (Англия, Франция, Германия), США, Россия и Япония. Недавно к ним присоединились Индия, Китай и Корея. Местом создания ITER выбран Кадараш, ядерный центр на юге Франции, что определило главенство Объединенной Европы в разработке первого прототипа «искусственного Солнца». Наша страна, где исследования по УТС всегда велись широким фронтом, принимает активное участие в программе (координатор работ — Научный центр «Курчатовский институт»). Выдвинута федеральная программа участия России в проекте ITER, на которую выделяется 50 млрд руб. до 2015 г. Реализация проекта общей стоимостью 10 млрд евро уже началась. С 2016 г. на ITER начнутся эксперименты, которые должны дать ответ на все нерешенные вопросы. Одновременно в Японии создается установка DEMO, цель которой — продемонстриро-

вать реальные возможности ТЯЭС. Специалисты прогнозируют к 2030 г. создание первой ТЯЭС и начало коммерческой эксплуатация «искусственного Солнца».

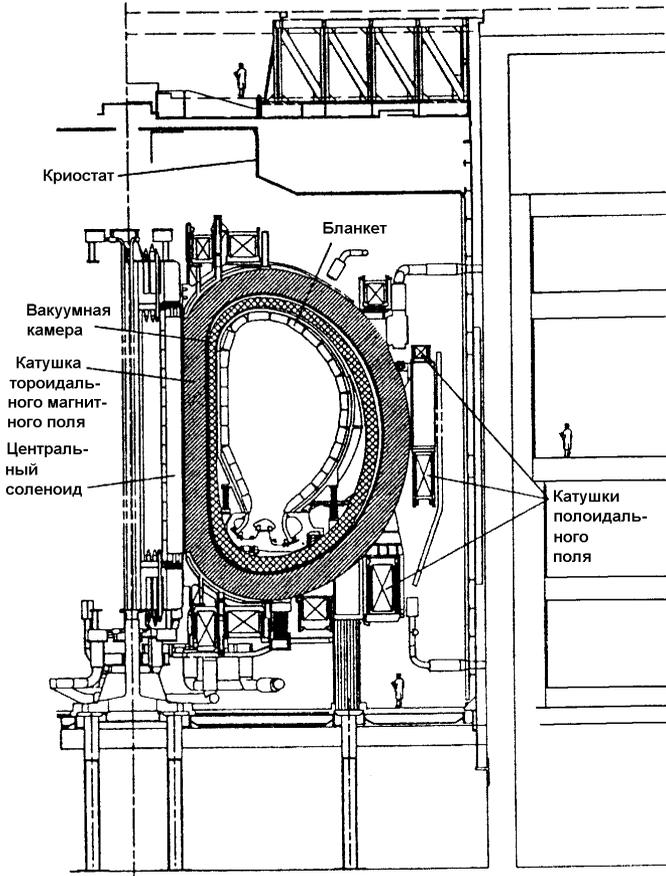


Рис. 30. Схема международной установки ITER-FeAT

Топливом для ТЯ-реактора станет смесь дейтерия и трития в равных количествах. Дейтерия на Земле достаточно много: его распространенность по отношению к легкому водороду составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$. Неистощимые запасы дейтерия содержатся в океанской воде, откуда его можно сравнительно просто извлекать путем элек-

тролиза и разделения изотопов. Хуже обстоит дело с тритием, который радиоактивен (период полураспада 12 лет), и потому отсутствует в земных породах. Тритий получают в атомных реакторах в реакции:



На каждый атом лития образуется атом трития, так что объемы добываемого лития (довольно большие) гарантируют необходимое количество трития. Однако хранить его все же не стоит — он распадается и в соответствии со временем распада планомерно исчезает из хранилищ. Его надо генерировать в самом ТЯ-реакторе, используя реакцию (11), располагая литиевую мишень (бланкет) внутри реактора. Нейтроны, второй элемент реакции, образуются там же в процессе термоядерного синтеза (10).

Альтернативным топливом для будущих станций может стать смесь дейтерия с легким изотопом гелия ${}^3\text{He}$, которая вступает в реакцию синтеза:



Преимущество этой реакции огромно: в ней не образуются нейтроны в отличие от всех других предложенных реакций синтеза. Дело в том, что нейтроны, не удерживаемые магнитным полем, легко уходят из активной зоны и, поглощаясь ядрами, создают наведенную радиоактивность. Термоядерный реактор на основе реакции (12), где такой угрозы нет, будет самым экологически чистым. Дейтерия, как было сказано, на Земле много. А где взять гелий-3, которого, напротив, крайне мало? Сейчас ответ найден — добывать на Луне и привозить на Землю! Как показали исследования, лунный грунт (реголит) содержит значительное количество ${}^3\text{He}$, адсорбированного за миллиарды лет облучения солнечным ветром. Расчеты показывают, что, несмотря на огромные трудности промышленных разработок на Луне и высокую стоимость космических перевозок, этот путь может оказаться экономически выгодным. Луна в таком случае, кроме оформления приятных всем лунных ночей, станет еще и сырьевой базой земной энергетики. А Солнце, в который раз, окажет человечеству неопределимую услугу, заготовив запасы ценнейшего ядерного горючего у нас под боком.

Искусственное Солнце, которое люди обязательно зажгут на Земле в действующих реакторах, в дополнение к естественному Солнцу, энергию которого они научатся разумно использовать через солнечные космические электростанции, выведет земную ци-

визацию на новый, более высокий этап развития и освоения Солнечной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования Солнца и Солнечной системы включают в себя практически все разделы физики. Чтобы понять процессы, протекающие в центральной части Солнца (и других звезд), необходимо применять физику ядра и элементарных частиц. Перенос энергии через всю массу солнечного вещества следует законам термодинамики и магнитной гидродинамики. Солнце — плазменный шар и без знания законов, управляющих движением плазмы, невозможно разобраться в сложном клубке солнечных явлений, происходящих во внешней конвективной зоне и проявляющих себя на фотосфере и в солнечной атмосфере. Солнечная активность — это природный полигон для исследования плазмы в разных проявлениях: от высокотемпературной плазмы солнечных вспышек до холодной плазмы солнечного ветра и корональных выбросов.

Взаимодействие солнечного излучения и плазменных потоков с магнитосферой и атмосферой Земли дает ключ к пониманию многих геофизических явлений — магнитных бурь, полярных сияний, всех звеньев солнечно-земной связи.

Солнечная система, управляемая, в первую очередь, законами классической механики, демонстрирует большое разнообразие геологических и метеорологических особенностей, проявляющихся на разном удалении от центрального светила. Горячие и теплые внутренние планеты, кардинально отличающиеся холодные планеты-гиганты с роем спутников, столь разнообразных по виду и внутреннему устройству, загадочные объекты пояса Койпера, еще более далекое и совсем не исследованное кометное Облако Оорта — какой колоссальный простор для физики твердого тела, высоких и низких температур, электрических и магнитных явлений!

Но основой всему этому многокрасочному карнавалу физических процессов, изучение которых, по-видимому, никогда не иссякнет, служат термоядерные реакции, протекающие в недрах Солнца. Ядерный костер, зажженный 4,5 млрд лет назад в центре сжимающегося газопылевого облака, дал энергетический ресурс для развития и самой звезды, и бесчисленной свиты ее верных вассалов. Солнечный ядерный реактор, щедро раздавая тепло и энергию, способствовал изменению геологии планет и однажды, около

3,5 млрд лет назад, дал толчок для развития жизни на Земле. Наш зеленый мир и мы сами обязаны своим существованием армии безымянных старателей, ядер водорода и легких элементов, которые безостановочно трудятся, вступая в реакции ядерного синтеза. Благодарному человечеству, прежде, чем ставить памятники мудрецам и полководцам, надо бы воздвигнуть внушительный монумент (не ниже египетских пирамид) в честь этой невидимой армии солнечного энергетического фронта.

Все мы живем под Солнцем — и те, кто купается в его лучах, и те, кому оно скупно светит, находясь низко над горизонтом. В век спутников и быстрых компьютеров, истощения природных ресурсов и взлета технологий Солнце остается одинаково щедрым для всех. Наверное, именно о таком времени — справедливого Солнца и умелых людей — написал поэт Владимир Солоухин:

*Солнце разлито поровну.
Вернее, по справедливости,
Вернее, по столько разлито,
Кто сколько способен взять.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Источники энергии и эволюции звезд. Ядерная физика. М.: Наука, 1980.
2. Торн К.С. // Природа. 1994. № 2. С. 78.
3. Кочаров Г.Е. Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 99.
4. Витинский Ю.И. Солнечная активность. М.: Наука, 1983.
5. Никольский Г.М. Невидимое Солнце. М.: Знание, 1980 (Сер. «Физика»).
6. Драбкин Л.М. Солнечные электростанции // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 4. С.105.

7. Энциклопедия для детей. Астрономия. Солнечная система. М.: Аванта+, 2001.

8. Лучков Б.И. Солнечное влияние на земную погоду / Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Т. 7. С. 79.

9. Петрукович А., Зеленый Л. Прогноз погоды XXI века: ожидаются магнитные облака и электронные осадки // Наука и жизнь. 2002. № 5. С. 2.

10. Шарков Е.А. Тропические циклоны: взгляд из космоса // Земля и Вселенная. 2005. № 4. С. 46.

11. Лучков Б. Ураганы — вечная проблема? // Наука и жизнь. 2006. № 3. С. 58.

12. Лучков Б. Годы грядущие // Наука и жизнь. 2007. № 8. С. 12.

Борис Иванович Лучков

НАША ЗВЕЗДА

Научно-популярное издание

Редактор и технический редактор *Т.В. Волвенкова*
Оригинал-макет изготовлен *М.В. Макаровой*

Подписано в печать 30.10.2007. Формат 60x84 1/16.
Печ.л. 6,25. Уч.-изд.л. 6,25. Тираж 700 экз.
Изд. № 2/2. Заказ №

*Московский инженерно-физический институт
(государственный университет).*

*Типография издательства «Тровант».
г. Троицк Московской обл.*

