

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени С.А. ЕСЕНИНА

**А. К. Муртазов**

**КОСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА  
ГЕОСИСТЕМЫ**

Учебное пособие

Рязань-2014

**Рецензенты:**

А.Е. Кузнецов – доктор технических наук, профессор, заместитель директора НИИ «ФОТОН» Рязанского государственного радиотехнического университета.

В.А. Кривцов – профессор кафедры физической географии и методики преподавания географии Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, доктор географических наук

**Муртазов Андрей Константинович**

**Космические воздействия на геосистемы. Учебное пособие. – Рязань: 2014. – 270 с.**

В учебном пособии подробно рассмотрены весьма актуальные в современной геоэкологии вопросы воздействия космических процессов на состояние и эволюцию геосистем.

Проанализированы основные абиотические факторы устойчивости экосферы; физические процессы, происходящие в геосистемах под воздействием корпускулярного и электромагнитного излучения Солнца, космических лучей, рентгеновского и гамма-излучения из Галактики; гравитационные взаимодействия. Подробно описаны методы изучения «космической погоды».

Большое внимание уделено вопросам «космической опасности» для человечества.

Учебное пособие предназначено студентам-экологам классических университетов, обучающимся по программам бакалавриата и магистратуры, а также студентам естественнонаучных специальностей, в частности, «Физика», «Геофизика», «Астрофизика», «Физика Земли и планет».

Учебник также может оказаться интересным и полезным для читателей, интересующихся вопросами физики Земли и Вселенной, проблемой расширения в околоземное пространство экологической ниши человеческой цивилизации.

## Содержание

Предисловие.....	4
Глава 1. Основные абиотические факторы устойчивости биосферы.....	6
1.1. Солнечное излучение .....	6
1.2. Геомагнитное поле и образование магнитосферы.....	25
1.3. Эволюция кислорода в атмосфере Земли и образование озонового слоя.....	47
Вопросы к главе 1.....	64
Глава 2. Космические воздействия на геоэкосистемы .....	65
2.1. Корпускулярное воздействие Солнца.....	65
2.2. Космические лучи .....	83
2.3. Гравитационные воздействия на геосистемы .....	95
2.3.1. Движение планет. Законы Кеплера.....	96
2.3.2. Приливы и отливы.....	97
2.4. Космическое гамма- и рентгеновское излучение и эволюция биосферы.....	106
2.5. Космические излучения и радиационная проблема для человека.....	107
Вопросы к главе 2.....	138
Глава 3. Космическая погода и ее роль в оценках воздействия космоса на геоэкосистемы.....	139
3.1. Воздействие солнечной активности на геосферы и здоровье человека .....	139
3.2. Основные параметры космической погоды.....	157
3.3. Космическая погода в интернете.....	174
Вопросы к главе 3.....	188
Глава 4. Экологические аспекты космической опасности.....	189
4.1. Воздействие процессов, сопровождающих падение опасного космического тела, на геосистемы.....	192
4.2. Экологические риски падений опасных космических тел.....	216
4.3. Оценка риска космической опасности для человека.....	228
4.4. Метеорное загрязнение околоземного пространства как экологический фактор .....	235
Вопросы к главе 4.....	242
Литература.....	243
Приложение. Экология космоса. Тематический словарь.....	248

## Предисловие

Курс «Космические воздействия на геосистемы» предназначен для студентов-экологов классических университетов и объединяет в себе данные современной науки о внешних воздействиях на геосферы, которые наша планета испытывает с момента своего образования.

Со времен В.И. Вернадского, одним из первых обосновавших идею о неразрывной связи процессов на Земле и окружающем ее космическом пространстве, появилось огромное количество исследований механизмов таких связей и их последствий для геосистем и человека.

С началом космической эры выяснилось, что околоземное пространство, окружающее нашу планету, является средой, защищающей биосферу от прямых негативных воздействий. То есть была открыта новая глобальная экологическая система «биосфера-околоземное пространство», процессы в которой во многом определяют результаты воздействия космоса на геосистемы.

Внешние космические факторы определяют стабильность процессов в экосфере, ее устойчивость.

Несомненно, основным источником как самих процессов в экосфере, так и их стабильности является Солнце, дающее подавляющий и постоянный вклад энергии в систему «околоземное пространство-биосфера». Ультрафиолетовая часть электромагнитного излучения Солнца, взаимодействуя с кислородом, создает озоновый слой. Корпускулярные потоки Солнца – солнечный ветер, - при взаимодействии с геомагнитным полем образуют магнитосферу.

Гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространенных физико-химических процессов в биосфере, они воздействуют на многие стороны биологических явлений, что и находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов.

Гравитационные взаимодействия определяют положение нашей планеты в Солнечной системе. Кроме того, они определяют глобальные приливные процессы в атмосфере, литосфере и гидросфере.

Космические излучения жесткого диапазона электромагнитного спектра, частицы высоких энергий оказывали в прошлом мощное импактное воздействие на биосферу, зачастую меняя ход эволюции живых организмов.

Опасные космические тела время от времени сталкивались с Землей и эти столкновения также приводили к глобальным экологическим последствиям и изменению направления эволюции.

Эволюция геосфер под действием космических факторов во многом определяет направление дальнейшей эволюции жизни на нашей планете. Прогноз частоты и интенсивности всего спектра влияния окружающей космической среды на эволюцию биосферы совместно с экологизацией антропогенного воздействия на нее, разработка мер по защите планеты от экстремальных воздействий и могут поддерживать тот диапазон экологических факторов, которые дадут возможность дальнейшему развитию человеческой цивилизации.

Весь спектр этих вопросов нашел отражение в данной книге.

Многообразие процессов в дальнем и ближнем космосе обуславливает и многообразие методов их исследования. Это, в свою очередь, предполагает широкий междисциплинарный подход к исследованию воздействия космоса на земные процессы, а также владение аппаратом и сведениями из многих естественных наук при использовании данного учебного пособия в изучении современных вопросов экологии.

Этот подход определил структуру пособия.

В первой главе подробно рассмотрены основные абиотические факторы, обеспечивающие устойчивость биосферы на протяжении всей ее эволюции.

Вторая и третья главы посвящены описанию и анализу космических воздействий на геосферы, включая электромагнитные, гравитационные, корпускулярные. Подробно проанализированы эффекты «космической погоды» и риск для человека в космосе.

Отдельная глава посвящена экологическим аспектам космической опасности, оценкам риска ее для человечества, результатам воздействия опасных космических тел на геосистемы.

Автор чрезвычайно признателен рецензентам за благожелательное и полезное рассмотрение настоящего пособия, ценные советы, позволившие значительно улучшить его содержание.

Учебное пособие, прежде всего, предназначено студентам вузов, обучающимся по направлениям подготовки 021000 – «География», квалификация (степень) «магистр», 022000 – «Экология и природопользование», квалификация (степень) «магистр», учебные планы которых утверждены Ученым советом естественно-географического факультета РГУ имени С.А. Есенина 19.01.2011 г. (пр. № 5).

# Глава 1

## Основные абиотические факторы устойчивости биосферы

Основными внешними, абиотическими, факторами устойчивости земной биосферы, несомненно, являются солнечное излучение, наличие у Земли собственного магнитного поля и кислорода в атмосфере.

### 1.1. Солнечное излучение

Главным поставщиком энергии для нашей планеты является Солнце, под воздействием которого происходит подавляющее число процессов в экосфере.

Наибольшее значение для биосферы Земли имеет солнечная энергия, которая возбуждает движение атмосферы и океанических течений, поддерживает все жизненные процессы. Каменный уголь и нефть есть не что иное, как солнечная ископаемая энергия. Поток речной воды, сбегаящий вниз к морю, рожден солнечным теплом, которое испарило воду с океана. Солнечная энергия воспринимается автотрофными организмами и обуславливает возможность трансформации ими неорганической субстанции: горных пород, минералов, элементов, входящих в состав воды и воздуха, в органическое живое вещество. Солнечная энергия имеет решающее значение в жизни экосистем (*Обридко и др., 2013*).

Солнце представляет собой плазменный шар средним диаметром  $R_{\odot}=1,392 \cdot 10^9$  м (109 диаметров Земли), эффективной температурой фотосферы  $T=5780$  К и светимостью (полной энергией, излучаемой по всем направлениям)  $L_{\odot}=3,846 \cdot 10^{26}$  Вт.

Солнце является центральной звездой Солнечной системы, которая обращается вокруг центра Галактики за лет на расстоянии 8 кпк (пк – парсек – расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом 1 секунда дуги, равно 206265 а.е.).

Среднее расстояние Земли от Солнца называется астрономической единицей (а.е.) и составляет  $a=149,6 \cdot 10^6$  км.

Естественно, на Землю попадает очень малая часть солнечного излучения. Она определяется телесным углом, под которым видна Земля на небесной сфере Солнца (рис. 1.1).

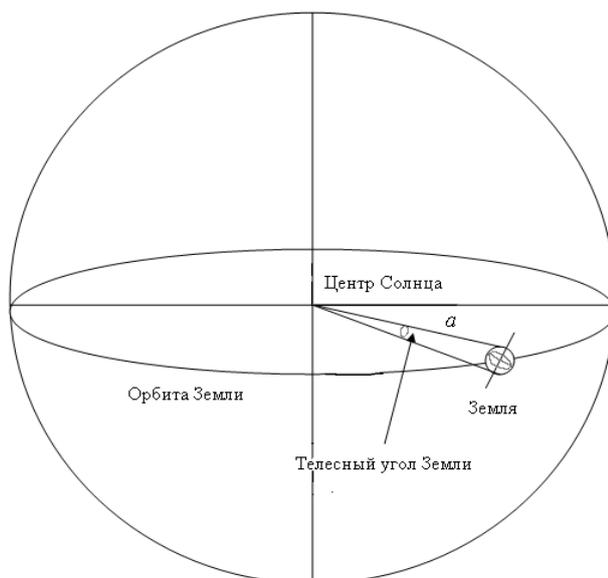


Рис. 1.1. К определению солнечной постоянной

**Телесный угол** — часть пространства, которая является объединением всех лучей, выходящих из данной точки (*вершины угла*) и пересекающих некоторую поверхность (которая называется поверхностью, *стягивающей* данный телесный угол). Границей телесного угла является некоторая коническая поверхность.

Телесный угол измеряется отношением площади той части сферы с центром в вершине угла, которая вырезается этим телесным углом, к квадрату радиуса сферы:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}.$$

Единицей измерения телесного угла в системе СИ является стерadian, равный телесному углу, вырезающему из сферы радиуса  $r$  поверхность с площадью  $r^2$ . Полная сфера образует телесный угол, равный  $4\pi$  стерadian (или  $2 \times 180^2 / \pi \approx 41252,96125$  кв. градусов) для вершины, расположенной внутри сферы, в частности, для центра сферы.

Телесный угол при вершине прямого кругового конуса с углом раствора  $\alpha$  равен

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right).$$

$$\Omega \approx \frac{\pi \alpha^2}{4}$$

Когда угол раствора конуса мал,  $\Omega \approx \frac{\pi \alpha^2}{4}$  ( $\alpha$  выражено в радианах), или  $\Omega \approx 0,000239 \alpha^2$  ( $\alpha$  выражено в градусах)

Так, телесный угол, под которым с Земли видны Луна и Солнце (их угловой диаметр примерно равен  $0,5^\circ$ ), составляет около  $6 \cdot 10^{-5}$  стерadian, или  $\approx 0,0005$  % площади небесной сферы то есть полного телесного угла.

Мощность солнечного излучения, падающего на границу ОКП и межпланетной среды, на земной шар радиусом  $R_3$  составляет

$$\pi R_3^2 I_0 = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ Вт.} \quad (1.1)$$

Здесь  $I_0 = (1367 \pm 3) \text{ Вт/м}^2$  — солнечная постоянная, фундаментальная величина, характеризующая поток солнечного излучения, падающий на

плоскую площадку, расположенную нормально к направлению на Солнце на расстоянии от него 1 а.е.

Естественные изменения солнечной постоянной (например, в 11-летнем периоде солнечной активности) не превосходят 0,1%.

Часть потока, определяемого солнечной постоянной (сферическое альbedo Земли  $A_3=0,30\div 0,36$ ) отражается атмосферой и поверхностью Земли и не входит в ее тепловой баланс

В итоге средний, поглощенный поверхностью и атмосферой, поток солнечного излучения у поверхности Земли на единицу ее площади составляет  $\varepsilon=240 \text{ Вт/м}^2$ .

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

$$\varepsilon = \sigma * T_{ef}^4 \quad (1.2),$$

где постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma=5,67*10^{-8} \text{ Вт*м}^{-2}*\text{К}^{-4}$ .

Таким образом, температуру Земли можно определить из уравнения теплового баланса

$$\sigma T_{ef}^4 = \frac{1}{4}(1 - A_3) * I_0, \quad (1.3)$$

В отсутствии атмосферы она составляла бы 255К или  $-18^\circ\text{C}$ . Однако, реальная средняя температура Земли составляет 288К ( $15^\circ\text{C}$ ) и обусловлена парниковым эффектом, доля которого составляет соответственно 150-160  $\text{Вт/м}^2$  (Будыко, 1978).

Нагретая до температуры  $T_{ef}$  Земля излучает в ИК-диапазоне с максимумом вблизи  $\lambda_m=10 \text{ мкм}$  (рис. 1.2, 1.3).

Коротковолновая энергия, попадающая от Солнца к Земле, переизлучается последней в инфракрасном диапазоне. Плотность энергии абсолютно черного излучения  $\varepsilon_e = \sigma T^4$ , где  $T$  – температура излучающего тела (в данном случае  $T_C$  солнечной фотосферы и  $T_3$  Земли). Плотность энтропии абсолютно черного излучения (Ландау, Лифшиц, 1995)  $\varepsilon_s = \frac{4}{3}\sigma T^3$ . Отсюда

$$\varepsilon_s = \frac{4}{3} * \frac{\varepsilon_e}{T}. \quad (1.4)$$

Тогда скорость производства (экспорта) энтропии для Земли равна

$$\frac{d_e S}{d t} = \frac{4}{3} * \varepsilon_e * \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_3}\right). \quad (1.5)$$

Подставив соответствующие температуры, получим  $\frac{d_e S}{d t} = -6 * 10^4 \text{ Вт/К}$  (Трухин и др., 2005; Эбелинг и др., 2001). Такому значению полного экспорта энтропии соответствует плотность потока энтропии на поверхности Земли (при плотности потока энергии  $\sim 230 \text{ Вт/м}^2$ )  $\varepsilon_s \approx -1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . Он

компенсирует среднюю плотность производства энтропии ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>К) в нижних слоях атмосферы.

Далее, поток энергии от земного ядра к поверхности составляет  $\sim 0,2$  Вт/м<sup>2</sup> (Жарков, 1983). Если температура ядра Земли составляет  $10^3$ - $10^4$  К, а на поверхности порядка 300 К, то экспорт энтропии за счет теплового потока Земли имеет порядок  $\sim 10^{11}$  Вт/К. Таким образом, основную роль в экспорте энтропии играет солнечное излучение.

Спектр солнечного излучения близок к спектру абсолютно черного тела с максимумом в районе длины волны 475 нм. В УФ- и ИК-диапазонах заключено до 95% энергии солнечного излучения. При прохождении земной атмосферы солнечное излучение ослабляется, а его максимум смещается к 550 нм (рис.1.2). Интересно отметить, что область максимальной спектральной чувствительности человеческого глаза также лежит около 550 нм.

В достигающем поверхности излучении присутствуют линии поглощения газов, составляющих атмосферу: основное поглощение в УФ-области приходится на озон, в ИК-области - на пары воды и углекислый газ.

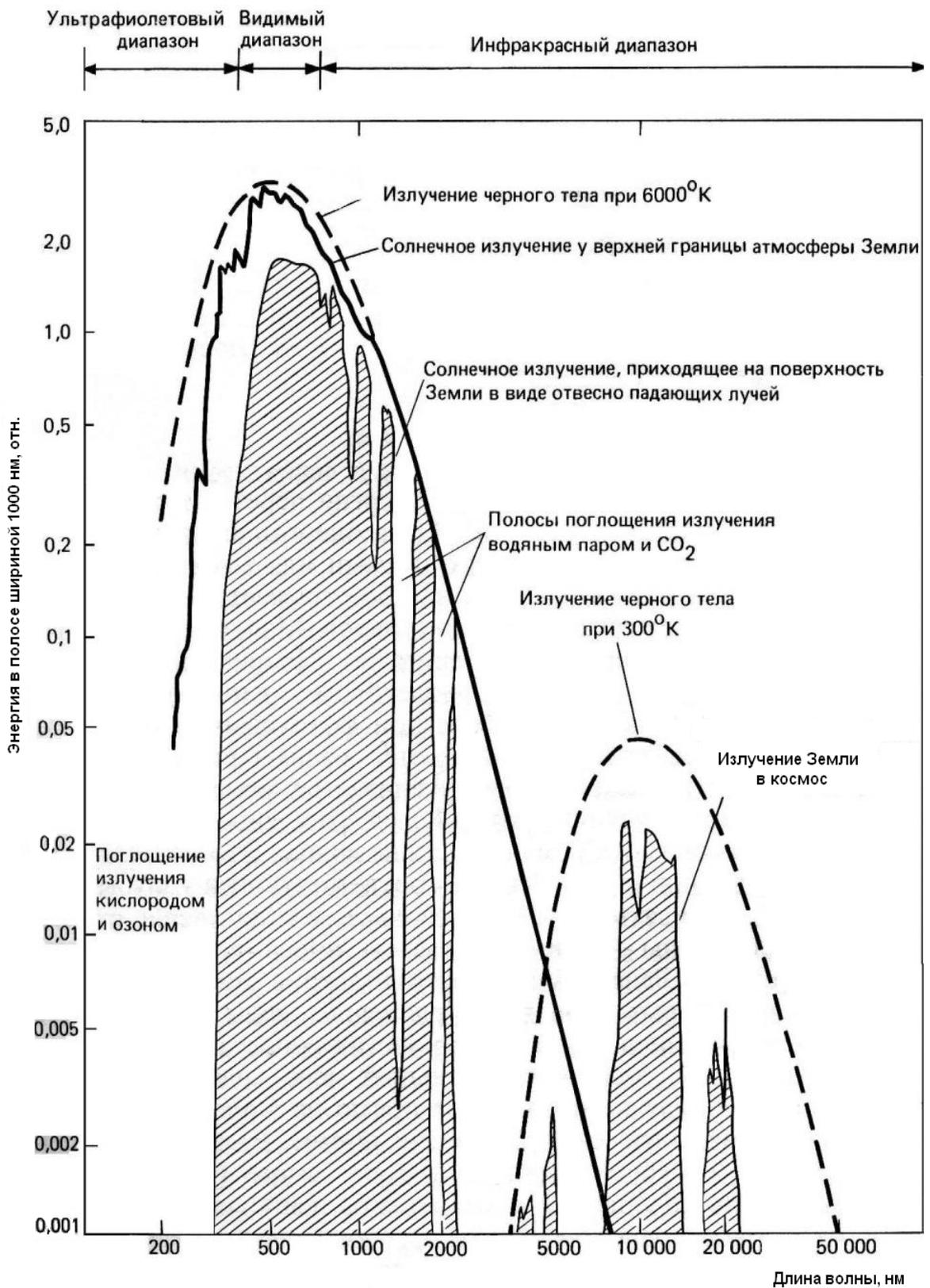


Рис. 1.2. *Спектральное распределение энергии излучения Солнца на границе земной атмосферы, поверхности Земли и теплового излучения Земли*

Интегральные характеристики потоков энергии у земной поверхности представлены в табл. 1.1 (Горшков, 1995; Климов и др., 2000; Лосев, 2001).

Таблица 1.1

Потоки энергии у земной поверхности

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

Как видно из табл. 1.1, человечество уже потребляет энергию, величину которого можно сравнить с падающей солнечной энергией. Сто лет назад это потребление было на три порядка ниже.

Столь высокие темпы потребления энергии ведут к разрушению окружающей биосферы среды. Биологическая природа при выходе из состояния равновесия за счет действия обратных связей (принцип Ле Шателье – Брауна) может вернуться в прежнее состояние.

**Принцип Ле Шателье – Брауна (1884)**

Нарушение равновесия любой физической, биологической или экологической системы по какому-либо параметру приводит к возникновению в ней компенсирующих процессов, возвращающих систему в состояние равновесия. Простейший пример: в системе маятник – нить при отклонении ее из состояния равновесия возникает возвращающая сила, стремящаяся это отклонение компенсировать.

Биосфера (состоящая из возникшей в процессе эволюции естественной биоты, взаимодействующей с окружающей средой) представляет собой единственную систему, обеспечивающую устойчивость окружающей среды при любых возникающих внешних возмущениях. Она обладает огромным количеством обратных связей. Число молекул (число ячеек памяти) в биосфере определяется как  $10^{48}$ .

Поэтому сохранение природных сообществ и существующих видов живых организмов в объеме, способном обеспечивать функционирование принципа Ле Шателье по отношению к глобальным возмущениям окружающей среды, является главным условием благополучного продолжения жизни на планете (*Горшков и др., 1989*).

В биологии на основе анализа данных о круговороте углерода показано, что нарушение стабилизации биосферы произошло после начала промышленной революции, когда антропогенная доля потребления продукции биосферы превысила 1%. До этого остававшаяся невозмущенная часть биосферы в течение всей ее эволюции компенсировала антропогенные нарушения за счет действия отрицательных обратных связей. Даже такая глобальная катастрофа, как Юкатанское событие, уничтожило лишь часть крупных животных, не нарушив нормального функционирования остальной части биоты и ее способности к стабилизации окружающей среды.

Спектральное распределение энергии, испускаемой Землей, имеет достаточно сложный характер (рис. 1.3) Оно заключено между распределениями энергии абсолютно черного тела с температурами 288К и 218К. Общая мощность этого длинноволнового излучения составляет  $230 \text{ Вт/м}^2$  и уравнивает мощность излучения, попадающего к поверхности Земли от Солнца. Вид спектрального распределения длинноволнового излучения Земли обусловлен тем, что поверхность Земли испускает излучение как абсолютно черное тело с температурой 288К, а в ОКП уходит та часть излучения, для которого атмосфера прозрачна. В остальных областях спектра в ОКП и далее в открытый космос излучает стратосфера, температура которой составляет в среднем 218К.

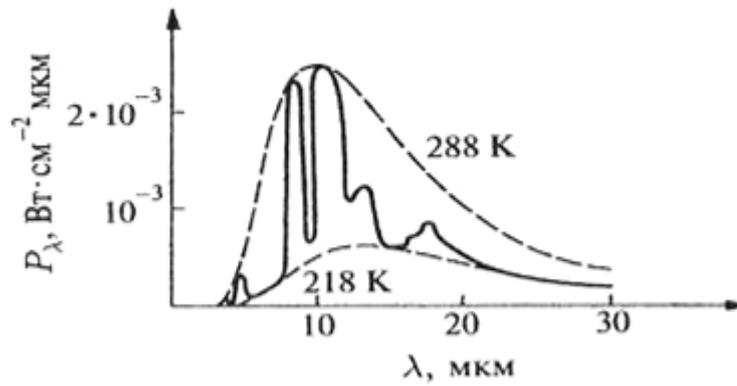


Рис. 1.3. *Спектральный состав естественного излучения Земли*

Длинноволновая составляющая земного излучения в космос, кроме того, зависит от целого ряда факторов. На рис. 1.4 представлен ее временной тренд, показывающий прямую зависимость от энергии, выделяющейся во время явлений Эль-Ниньо и вулканических извержений (Головки и др., 2006).

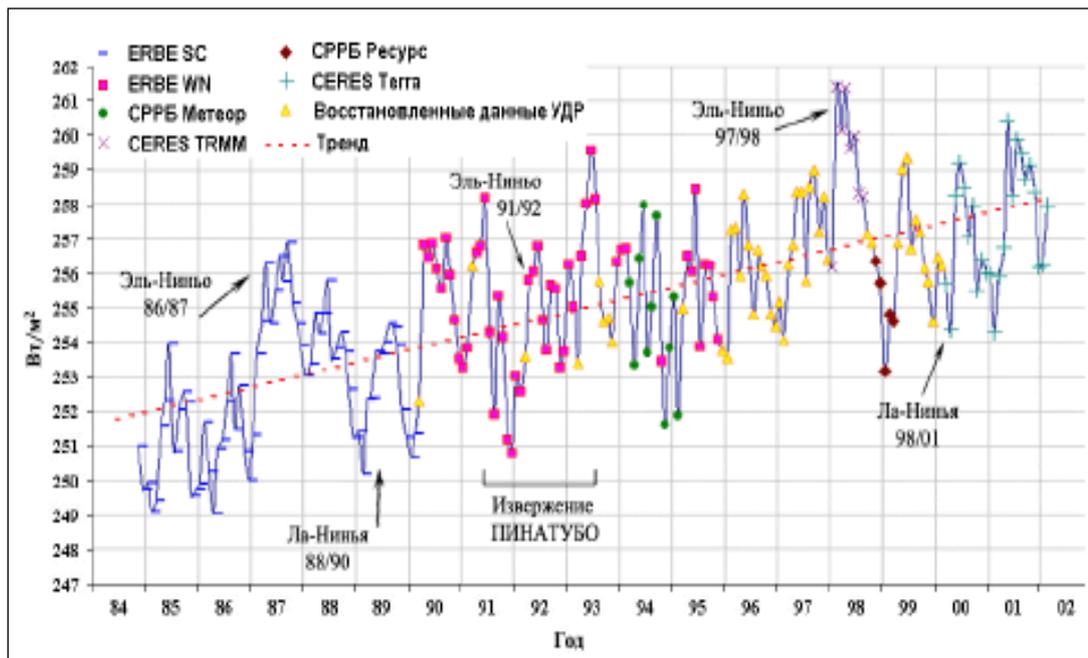


Рис. 1.4. *Ход длинноволновой составляющей радиационного баланса Земли и основные аномальные природные явления*

Солнечная энергия оказывает влияние на всю атмосферу. Так, в районах проявления полярных сияний температуры термосферы значительно выше, чем на низких широтах. Вероятно, захваченные солнечного ветра (протоны и электроны) отдают часть своей энергии в атмосферу, особенно при столкновении с молекулами газа вблизи точек отражения, и сходят со своих прежних орбит. Так происходит нагрев высоких слоев атмосферы в зоне полярных сияний.

Небольшие отклонения орбит искусственных спутников обусловлены изменениями плотности атмосферы при ее нагреве Солнцем.

Кроме того, максимум концентрации электронов испытывает нерегулярные колебания вследствие кратковременных вспышек ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Кратковременные колебания плотности воздуха, соответствуют вспышкам на Солнце и возмущениям магнитного поля. Эти явления объясняются вторжением частиц солнечного происхождения в атмосферу Земли и нагревом тех ее слоев, где проходят орбиты спутников.

### ***Солнце и климат Земли***

Изменение излучения Солнца ответственно за климатические циклы.

*К основной группе внешних климатообразующих факторов относятся глобальные астрономические циклы:*

- прецессия оси Земли с периодом 25800 лет;
- изменение положения оси прецессии (наклона эклиптики к экватору,  $21,5^\circ$ - $24,5^\circ$ , современное  $23^\circ 26' 30''$ ) с периодом  $\sim 41 \cdot 10^3$  лет;
- изменение величины эксцентриситета земной орбиты ( $\sim 10^5$  лет) согласуется с периодом глобальных оледенений – циклом Миланковича.

Следует сразу отметить, что явление прецессии не влияет на изменение инсоляции Земли: наклон оси Земли к плоскости эклиптики остается при этом постоянным, изменяется только направление оси планеты в пространстве (в настоящую эпоху направление на Северный полюс мира близко к направлению на Полярную).

Иногда некоторые авторы обсуждают вопросы изменения климата в связи с изменением светимости Солнца в течение его эволюции, а также попаданием Солнечной системы в области Галактики, занятые гигантскими молекулярными и пылевыми облаками, в течение галактического года (220-250 млн. лет). Однако, данные по этим вопросам достаточно противоречивы, и нами рассматриваться не будут.

В спектре периодов оледенений отмечаются периоды, близкие к периоду изменения наклона эклиптики к экватору, порядка 40-45 тысяч лет, и периоды порядка 100 тыс. лет, связанные с изменением эксцентриситета земной орбиты.

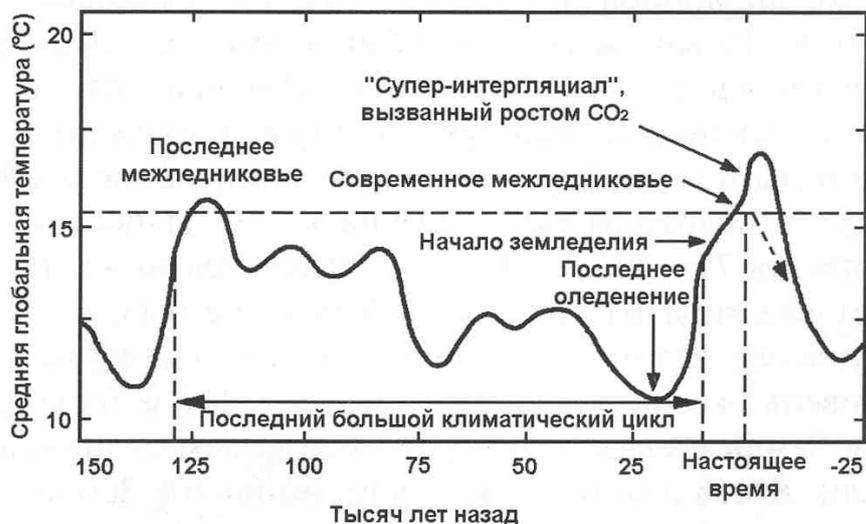
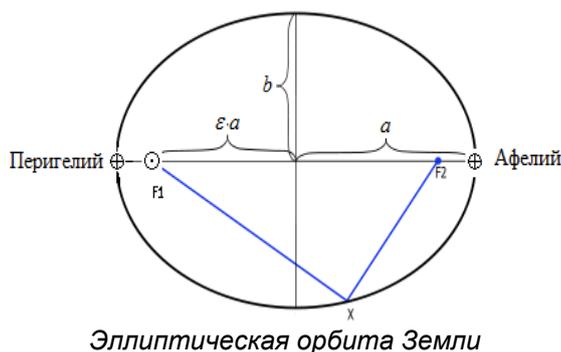


Рис. 1.5. Цикл Миланковича

Согласно законам Кеплера Земля обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите на среднем расстоянии  $a=1$  а.е. (большая полуось), причем Солнце находится в одном из фокусов эллипса



**Эксцентриситет** — числовая характеристика конического сечения. Эксцентриситет определяется соотношением между большой и малой ( $b$ ) полуосями и характеризует «сжатость» орбиты. Он выражается формулой:

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

В настоящее время эксцентриситет земной орбиты равен 0,0167 и продолжает уменьшаться (пределы изменения  $0,0163 \div 0,0658$ ). Его минимальное значение будет достигнуто примерно через 25 тысяч лет. Эксцентриситет изменяется с периодами 0,1; 0,425; 1,2 млн. лет.

Можно рассчитать величину изменения инсоляции Земли в функции изменения эксцентриситета ее орбиты.

Поток энергии от Солнца определяется как

$$I = I_0 \cdot \frac{r^2}{a}, \tag{1.6}$$

где  $r$  – текущее расстояние Земли от Солнца,  $a$  – среднее расстояние Земли от Солнца (или большая полуось ее орбиты,  $a=1$  а.е.),  $I_0$  – солнечная постоянная.

Из формул эллипса для перигелия и афелия земной орбиты

$$r_p = a(1 - \varepsilon), \quad (1.7)$$

$$r_a = a(1 + \varepsilon). \quad (1.8)$$

Тогда энергия, попадающая на Землю от Солнца в перигелии, определяется как

$$I_p = I_0(1 - \varepsilon)^{-2},$$

а с учетом малости эксцентриситета

$$I_p = I_0(1 + 2\varepsilon). \quad (1.9)$$

Аналогично для афелия

$$I_a = I_0(1 - 2\varepsilon). \quad (1.10)$$

Отсюда

$$\delta I = I_p - I_a = 4\varepsilon a. \quad (1.11)$$

Таким образом, при известных пределах изменения эксцентриситета земной орбиты количество энергии, попадающей на нее, будет изменяться на величины  $\delta I$  от 7 до 26% солнечной постоянной.

Рассмотрим современные воззрения на ледниковую историю Земли.

Появление гигантских ледниковых покровов не только приводит к уничтожению большей части органической жизни на этих территориях. Одновременно происходит глобальное климатическое похолодание, иногда совпадающее с глобальными экологическими кризисами.

Похолодание могут вызвать катастрофические извержения вулканов, но они не вызывают глобальных оледенений.

Так, в середине мелового периода (110-80 млн. лет назад) под водой находилось 36% площади современной суши. Около 50-40 млн. лет назад началось общее понижение температуры, идущее до настоящего времени. Возникло оледенение Антарктиды (уровень океана понизился на 65-70 м), затем Гренландии (понижение на 6-7 м). Понижение уровня океанов привело к ослаблению обмена водами, а значит, теплом между Атлантикой и Тихим и Северным полярным бассейнами. Арктика стала гигантским холодильником, и несколько миллионов лет назад возникли ледяные щиты в Скандинавии, Новой Земле, Северной Америке. Ледники толщиной 2-3 км опускались до широт Киева и низовьев Иртыша.

Последнее оледенение наблюдалось 20-18 тысяч лет назад, температура была ниже на 5-7°C. Уровень оледенения опускался в океане ниже 100-120 м, мелководных морей типа Балтийского и Белого не было.

16 тысяч лет назад началось отступление ледников и глобальное потепление на 5-8°C (8 тысяч лет назад). Уровень океана рос на 1-2 см в год. Из-за изменений гравитационного поля Земли в связи с перераспределением ледников замедлилось вращение Земли (когда ледники наступали, вращение Земли ускорялось).

Изучение последнего оледенения показало, что за последние 2 млн. лет произошло 4 главных и несколько второстепенных продвижений льда.

Главные стадии наступления ледников разделялись продолжительными теплыми межледниковьями, когда климат был теплее, чем сейчас.

В геологическом прошлом были длительные эпохи, когда средние глобальные температуры были почти в два раза больше современных. За всю историю Земли было около 6 оледенений (средняя температура на 5° ниже современной). Во время четвертичного оледенения 4 раза наступали ледниковые эпохи, сменявшиеся межледниковьями. Последнее оледенение началось 75 тысяч лет назад, закончилось 12-15 тысяч лет назад.

Сейчас мы живем в межледниковом периоде, который продолжается около 10 тысяч лет с момента последнего оледенения. В этом периоде выделяют четыре эпохи: 2 теплые с пиками около 5000-3000 лет назад и 1000-800 лет назад и 2 холодные – с минимумами примерно 2900-2300 и 550-125 лет назад. Таким образом, последняя теплая эпоха была в 985-1185 гг. н.э., последняя холодная – с 1435 по 1860 г н.э.

Новый ледниковый период может начаться не ранее, чем через 8 тысяч лет.

Исследования показывают, что главными, кроме солнечного излучения, факторами, ответственными за возникновение комфортных климатических явлений являются также давление и теплоемкость земной атмосферы, определяемые составом и влажностью воздуха – рис. 1.6 (*Сорохтин, Ушаков, 2004*).

Наклон оси вращения планеты к эклиптике предопределяет смену времен года, зональность и контрастность климата. Из всех планет Солнечной системы только Земля обладает уникальной атмосферой и гидросферой, благоприятной для развития на земной поверхности высших форм жизни. Рассмотрим только осредненные характеристики эволюции климатов Земли, без учета факторов, влиявших на климатическую зональность и его короткопериодные колебания.

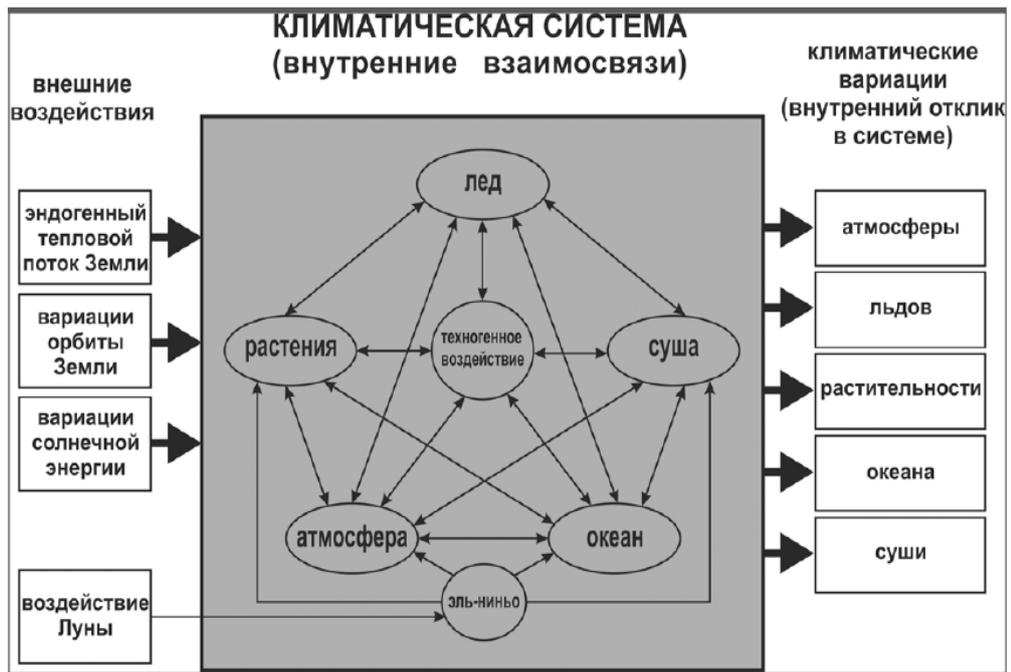


Рис. 1.6. Взаимосвязи основных климатических факторов

В качестве основного параметра, характеризующего осредненный глобальный климат Земли, удобнее всего выбрать среднюю по земной поверхности температуру  $T_s$  (для современных условий  $T_s = 278,8$  К или  $+14,8$  С). Поскольку у планет с плотной атмосферой (давлением  $p > 0,2$  атм.) основным механизмом выноса тепла с поверхности является конвективный массоперенос воздуха в тропосфере, то и распределение температуры в ней должно быть адиабатическим. Согласно адиабатической теории парникового эффекта, средняя температура тропосферы зависит от солнечной постоянной  $S$ , давления атмосферы  $p$ , эффективного значения показателя адиабаты  $a$  (определяемого составом и влажностью тропосферы), и альбедо планеты  $A$  (принимая, что  $A \sim T_s$ ). Теория эта была успешно проверена по средним распределениям температуры в тропосферах Земли и Венеры, что позволяет использовать ее и для изучения эволюции климатов Земли, если, конечно, предварительно будут определены перечисленные выше параметры земной атмосферы, которые с течением времени могли существенно меняться.

По определению парниковым эффектом  $\Delta T$  называется разность между средней поверхностной температурой планеты  $T_s$  и ее радиационной (эффективной) температурой  $T_{ef}$ , под которой планета видна из космоса:

$$\Delta T = T_s - T_{ef} \quad (1.12)$$

Эффективная температура планеты находится из выражения (1.3)

Определить зависимость поверхностной температуры  $T_s$  и распределения температуры в тропосфере планеты от параметров ее атмосферы можно, если задаться моделью передачи тепла в атмосфере. Будем считать, что радиационный механизм теплообмена доминирует только в стратосфере и мезосфере, тогда как вынос тепла из наиболее плотного слоя планетной атмосферы – ее тропосферы в основном происходит благодаря конвекции. Последнее утверждение, правда, не является строго доказанным, но его можно проверить путем сопоставления теоретических распределений температуры в тропосферах, например, Земли и Венеры с осредненными эмпирическими данными. Учитывая это, задачу о распределении температуры в тропосфере можно искать в рамках модели передачи тепла (температуры) через конвектирующую среду с заданным адиабатическим законом преобразования температуры

$$T = C^{\alpha x} p^{\alpha} \quad (1.13)$$

где  $p$  – давление,  $C$  – постоянная, а  $\alpha$  – показатель адиабаты, зависящий от теплоемкости воздуха.

Исходя из того, что на Землю падает Солнечное излучение, характеризующееся температурой абсолютно черного тела

$$T_{bb} = \left(\frac{S}{4\sigma}\right)^{1/4}, \quad (1.14)$$

а на выходе системы устанавливается приземная температура  $T_s$ , температуру абсолютно черного тела  $T_{ef}$  (для Земли  $T_{ef} = 278,8$  К), можно рассматривать в качестве входного воздействия, а поверхностную температуру  $T_s$  – в качестве выходной реакции. Тогда отношения этих температур

$$k = \frac{T_s}{T_{bb}} \quad (1.15)$$

можно рассматривать как «коэффициент температурного усиления» тропосферы. Для Земли  $k = 1,033$ , для Венеры  $k = 2,243$ .

Как видно из выражения (1.3), между эффективной температурой и альбедо существует отрицательная зависимость. Это свидетельствует о существовании сильной отрицательной обратной связи, возникающей между приземной и радиационной температурами Земли (рис. 1.6).

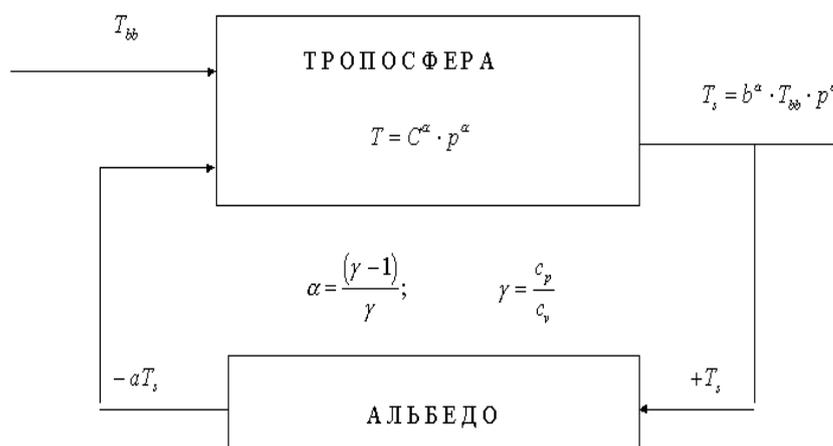


Рис. 1.6. Блок-схема передачи температур в тропосфере

Связь эта, как известно, осуществляется через облачный покров, эффективно регулирующий суммарное альbedo планеты. Но любая такая отрицательная связь в системе приводит к линеаризации реакции на выходе системы по отношению к входному воздействию. Это свойство систем с отрицательными обратными связями универсально и проявляется вне зависимости от природы самих систем, будь то атмосфера планеты, электронный усилитель или центробежный регулятор Уатта в паровых машинах. В нашем случае это говорит о существовании линейной зависимости между приземной и входной температурами, т.е.  $T_s \sim T_{bb}$ .

Как уже было отмечено выше, Земля, имея температуру около 288К, излучает в инфракрасном, или, как говорят, длинноволновом, диапазоне, основная энергия которого сосредоточена в интервале  $\lambda = 4\text{--}30$  мкм с максимумом около 10 мкм. Часть этого излучения, исходящего от каждой точки земной поверхности вверх в полусферу, поглощается рядом газов в атмосфере и противоизлучается обратно к земной поверхности. Тепловое равновесие Земли с космосом наступает, но при более высокой температуре, чем при отсутствии атмосферного поглощения.

Парниковые газы, ответственные за поглощение длинноволнового излучения, представляют собой лишь малые примеси к основному составу атмосферы.

На 99,96% сухой, без водяного пара, воздух состоит из трех газов: азот ( $N_2 - 78,08\%$ ), кислород ( $O_2 - 20,95\%$ ) и аргон ( $Ar - 0,93\%$ ). Оставшиеся 0,04% делят между собой благородные газы: неон, гелий, криптон, ксенон, а также водород, метан, закись азота, двуокись углерода, озон, двуокись серы, двуокись азота и ряд других.

Водяного пара в атмосфере относительно много – от 0 до 4% по объему. Он сосредоточен преимущественно в нижних слоях тропосфе-

ры до 5 км, к уровню 10 км его количество становится очень малым, а в стратосфере выше 10–15 км практически нет, по крайней мере, для образования там облаков.

К основным парниковым газам, дающим в сумме парниковый эффект, оцениваемый в  $\Delta T = 33,2$  °С, относятся:

- 1) водяной пар ( $H_2O$ ) – вклад  $\Delta T = 20,6$  °С;
- 2) углекислый газ ( $CO_2$ ) – вклад  $\Delta T = 7,2$  °С;
- 3) озон ( $O_3$ ) – вклад  $\Delta T = 2,4$  °С;
- 4) закись азота ( $N_2O$ ) – вклад  $\Delta T = 1,4$  °С;
- 5) метан ( $CH_4$ ) – вклад  $\Delta T = 0,8$  °С;
- 6) дополнительно  $NH_4$  + фреоны +  $NO_2$  +  $CCl_4$  +  $CF_4$  +  $O_2$  +  $N_2$  с суммарным вкладом 0,8 °К.

Современная концентрация этих газов составляет:

- водяной пар  $n = 0$ –4% (по объему);
- озон  $n = 0,032$ % (по объему);
- углекислый газ  $n = 375$  частей на млн.;
- метан  $n = 750$  частей на млрд.;
- закись азота  $n = 315$  частей на млрд.

#### *Характеристика изменения во времени основных парниковых газов.*

**Водяной пар.** Этот основной по вкладу парниковый газ ( $\Delta T = 20,6$  °С) имеет естественное происхождение. Главный его источник – Мировой океан, затем следует испарение с суши. Среднеглобальное содержание пара в атмосфере около  $2,4$  г/см<sup>2</sup> слоя осажденной воды. Среднее время жизни молекулы  $H_2O$  в атмосфере за счет естественного влагооборота – 10 дней. Концентрация водяного пара сильно меняется во времени и пространстве. Он имеет много полос поглощения в спектре инфракрасной радиации. Пока не получено данных о глобальном повышении влажностного содержания в атмосфере, и поэтому считается, что вклад  $H_2O$  в парниковый эффект хотя и большой, но не увеличивается. В то же время ряд континентальных мониторинговых станций дают положительный тренд  $H_2O$ . Например, Иссык-Кульская станция (Кыргызстан) за 1980–99 гг. дала положительный тренд роста  $H_2O$  около 1% в год.

**Углекислый газ.** Сейчас – это второй по вкладу в наблюдающийся парниковый эффект газ ( $\Delta T = 7,2$  °С) за счет сильной полосы поглощения в области 13–17 мкм. Однако его содержание непрерывно растет, и, следовательно, за счет этого должен увеличиваться и его вклад. Примерно до 1700–1750 гг. (доиндустриальная эпоха) наблюдался ровный ход  $CO_2$ , после чего началось резкое повышение концентрации от уровня 280 на млн.<sup>-1</sup> до современного 370–375 млн.<sup>-1</sup>. Этот рост связывается с сжиганием углеродного топлива – угля, газа, нефти, дров, торфа и

другими антропогенными выбросами  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Выбросы  $\text{CO}_2$  поглощаются при фотосинтезе растениями суши и верхнего слоя океана, а также частично растворяются в океане. Примерно 50% выброшенного  $\text{CO}_2$  накапливается в атмосфере.

Время жизни молекулы  $\text{CO}_2$  в атмосфере около пяти лет.

**Метан.** Участвует во многих химических реакциях в атмосфере и образуется в основном на суше при процессах прямого освобождения при добыче ископаемого топлива, процессах гниения, таяния вечной мерзлоты, болотных процессах и на заливных рисовых полях, из отходов крупного рогатого скота и др. По росту концентрации и вкладу в радиационное воздействие в полосе поглощения 7,7 мкм его можно поставить на следующее за  $\text{CO}_2$  место. Концентрация  $\text{CH}_4$  долгое время была на уровне около 750 млрд<sup>-1</sup> и также, как и для  $\text{CO}_2$ , начала быстро расти после 1700–1750 гг., достигнув в 2000 г. значения около 1750 млрд<sup>-1</sup> с радиационным воздействием 0,5 Вт/м<sup>2</sup>.

Концентрация метана убывает с высотой, составляя 1 500 млрд<sup>-1</sup> в стратосфере. Время жизни молекулы метана в атмосфере оценивается значением  $10 \pm 2$  года.

**Закись азота.** Основными источниками закиси азота являются микробиологические процессы в почве и океане, разложение азотных удобрений, являющихся основой современного земледелия, и сжигание ископаемого топлива. По темпам роста концентрации и радиационного воздействия  $\text{N}_2\text{O}$  выходит на следующее место после метана в усилении парникового эффекта. Концентрация закиси азота примерно оставалась на уровне 280 млрд<sup>-1</sup> и начала сильно расти в индустриальную эпоху после 1700–1750 гг., достигнув в настоящее время 315 млрд<sup>-1</sup> при ежегодном тренде в 0,3%. Время жизни молекулы  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосфере относительно велико и оценивается в пределах 80–150 лет.

**Тропосферный озон.** Озон имеет сильную полосу поглощения с центром  $\lambda = 9,6$  мкм, которая и обуславливает его вклад в парниковый эффект. Он возникает за счет переноса из стратосферы (слой 20–55 км, где его содержание повышено за счет фотохимических реакций в озоносфере), при фотоокислении метана, окиси углерода, различных производственных процессах, а разрушается как активный окислитель при соответствующих реакциях. Мониторинг его сильно затруднен ввиду большой изменчивости. При концентрациях более 60 млрд<sup>-1</sup> приповерхностный озон опасен для здоровья человека и вредно действует на всю биоту. Время жизни молекулы  $\text{O}_3$  в атмосфере порядка 30 дней. Средняя годовая глобальная концентрация составляет около 25–35 млрд<sup>-1</sup>. Хотя его вклад в парниковый эффект относительно велик, но он пока остается,

как и у водяного пара, примерно постоянным, т. е. заметного усиления эффекта не наблюдается.

**Хлорфторуглероды (ХФУ), или фреоны.** Это целиком антропогенные газы, содержащие углерод, хлор и фтор, в которых хлор и фтор частично или полностью замещают углерод. Они являются сильнейшими по парниковому эффекту, будучи в 14 000–18 000 раз более эффективными по сравнению с  $\text{CO}_2$ .

Главная надежда здесь на то, что их концентрация мала, меньше 2 млрд.<sup>-1</sup>, и таковой останется благодаря Монреальскому протоколу (1987 г.), по которому многие страны выводят  $\text{CFC}_3$  из производства, так как фреоны сильно разрушают слой защитного стратосферного озона. Поэтому ХФУ не включены

МГЭИК в Киотский протокол как парниковые газы, так как они регулируются Монреальским протоколом.

Сравнительное радиационное разогревающее действие различных парниковых газов оценивается численно параметром – потенциалом глобального потепления ПГП. Параметр ПГП определяет радиационное воздействие молекулы заданного парникового газа относительно молекулы  $\text{CO}_2$ , принятого за эталон (чтобы можно было делать все расчеты в одном  $\text{CO}_2$ -эквиваленте). Так, ПГП метана равен 21, т. е. парниковый эффект 1 т метана равен парниковому эффекту 21 т  $\text{CO}_2$ . Для закиси азота ПГП равен 310, или 1 т  $\text{N}_2\text{O}$  эквивалентна по эффекту потепления 310 т  $\text{CO}_2$ .

**Аэрозоли.** Это легкие, свободно плавающие в атмосфере твердые (пыль, сажа, частички солей и органики и т. д.) частицы, а также капельки воды, представляющие собой растворы солей и кислот.

Аэрозоль может быть естественный и антропогенный. По происхождению тропосферный аэрозоль делится на шесть видов: морской, сульфатный, пустынный, биогенный, дымовой и вулканический. В антропогенном аэрозоле значительную долю представляют сульфатные аэрозоли – частицы, образующиеся из выбросов сернистого газа  $\text{SO}_2$ . Они приводят к выпадению кислотных дождей и, как компонент парникового эффекта, рассеивают около 3% прямой солнечной радиации, тем самым ослабляя парниковый эффект. Радиационный парниковый эффект сульфатных аэрозолей в Северном промышленном полушарии составляет около 1 Вт/м<sup>2</sup>. При этом все парниковые газы здесь дают эффект 2–2,5 Вт/м<sup>2</sup> ( $\text{CO}_2$  дает 1,5 Вт/м<sup>2</sup>), так что ослабление, вносимое сульфатными аэрозолями, весьма существенно.

После сильных извержений вулканов концентрация естественного аэрозоля возрастает в 50–100 раз, однако его охлаждающее действие, вследствие самоочищения атмосферы, длится 1–3 года.

Антропогенный аэрозоль не является долгоживущим компонентом, но он непрерывно поступает в атмосферу, за счет чего его концентрация практически остается постоянной.

С другой стороны, исследования показывают очень сильный рост концентрации  $\text{SO}_2$  (тонн серы в год) с 1600 по 2000 г. Это говорит о возможном существенном влиянии  $\text{SO}_2$  как источника сульфатных аэрозолей, могущих заметно снизить парниковый эффект.

Таким образом, концентрации углекислого газа, закиси азота и метана существенно растут за счет интенсивной антропогенной деятельности, и это должно усиливать парниковый эффект. Другие парниковые газы пока не увеличивают свою концентрацию вследствие естественных причин (водяной пар), ограничений, налагаемых Монреальским протоколом (фреоны), или пренебрежимо малой их концентрации. Но они остаются потенциально опасными и могут заявить о себе в будущем.

Первым, кто обратил внимание на парниковый эффект, был Тиндал (1863 г.). Несколько позже Аррениус (1896 г.) и Чемберлен (1899 г.) указали на существенный вклад в него углекислого газа. По оценкам Аррениуса, а затем Коллендара (1938 г.) удвоение концентрации  $\text{CO}_2$  ведет к глобальному потеплению на  $6^\circ\text{C}$ . Потом в 1970 г. эта цифра уменьшилась до  $2,5\text{--}3^\circ\text{C}$ . По данным современных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, к 2100 г. за счет парникового эффекта глобальная температура Земли может увеличиться на  $1,5\text{--}5,8^\circ\text{C}$ , при различных сценариях роста парниковых газов.

Метеорологическими станциями зафиксирован рост глобальной температуры Земли за 100 лет на  $0,6^\circ\text{C}$  (с ошибкой  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ). Все это, казалось бы, бесспорно указывает на то, что начавшееся потепление есть следствие роста концентрации парниковых газов за счет антропогенного фактора.

Однако целый ряд авторитетных ученых и полученные ими результаты указывают на многофакторную, многокомпонентную природу парникового эффекта. Они призывают не преувеличивать значимость антропогенно обусловленных изменений климата, поскольку наблюдаемое потепление не выходит за рамки ее естественной изменчивости за последние 10 000 лет, когда закончилась фаза последнего оледенения. В фундаментальном исследовании, выполненном в рамках государственной программы России «Глобальные изменения природной среды и климата», отмечается: «В истории Земли наблюдались периодические «кризисы» или катастрофические изменения климата на фоне плавных или незначительных изменений в течение сотен миллионов лет. Сверхдлинная, длинная и средняя периодичности «климатических» и «биотических» перестроек составляют 150, 30–35 и 3–4 млн. лет; периодич-

ность оледенений в плейстоцене и голоцене – 0,02–0,1 млн. лет; периодичность изменения климата в голоцене и в историческое время – 2 000 лет, 500–600 лет, 20–22 года. Пока не существует теории климата, способной объяснить и пересказать такую многоуровневую периодичность».

## 1.2. Геомагнитное поле и образование магнитосферы

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза магнитного гидродинамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра на глубинах 2900 км – 5120 км. Тепловая конвекция во внешнем ядре способствует образованию кольцевых электрических токов (рис. 1.7). Скорость перемещения вещества в верхней части жидкого ядра будет несколько меньше, а нижних слоев - больше относительно мантии в первом случае и твердого ядра - во втором. Подобные медленные течения вызывают формирование кольцеобразных (тороидальных) замкнутых по форме электрических полей, не выходящих за пределы ядра. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями во внешнем ядре возникает суммарное магнитное поле дипольного характера в первом приближении.

Ядро - внутренняя наиболее плотная центральная часть Земли (около  $12,3 \text{ г/см}^3$ , составляет 32,18% массы всей Земли). Делится на внешнее ядро (слой на глубинах 2920-4980 км, объемом 15,16% и массой 29,8% от массы Земли), переходной слой (толщиной около 140 км) и внутреннее ядро радиусом 1250 км. Внутреннее ядро имеет объем около 0,7% и массу около 1,2% земной. Внешнее ядро находится в расплавленно-жидком состоянии, а внутреннее - в твердом. Причем внутреннее ядро может вращаться иначе, чем мантия.

Ядро обладает высокой электропроводностью, поэтому относительное движение внутренней части относительно внешней должно порождать электрические токи, что создает геомагнитное поле Земли.

Вследствие гравитационной дифференциации плотность вещества и, соответственно, давление с глубиной увеличиваются, что ведет к уменьшению потенциальной энергии всей Земли. При этом высвобождается значительное количество энергии в виде внутриземного тепла, которая в свою очередь вызывает подъем гор и опускание морского дна. С момента образования Земли по настоящее время этот энергетический источник дал  $1,61 \cdot 10^{31}$  Дж, в то же время за счет распада радиоактивных элементов выделилось  $0,9 \cdot 10^{31}$  Дж тепла. То есть в 2 раза меньше энергии, высвободившейся при гравитационной дифференциации.

Температура недр Земли к центру растет. Так на границе земная кора - мантия температура превышает  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление 2000 МПа, а на границе мантия - ядро температура достигает  $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ , а давление около 300 ГПа

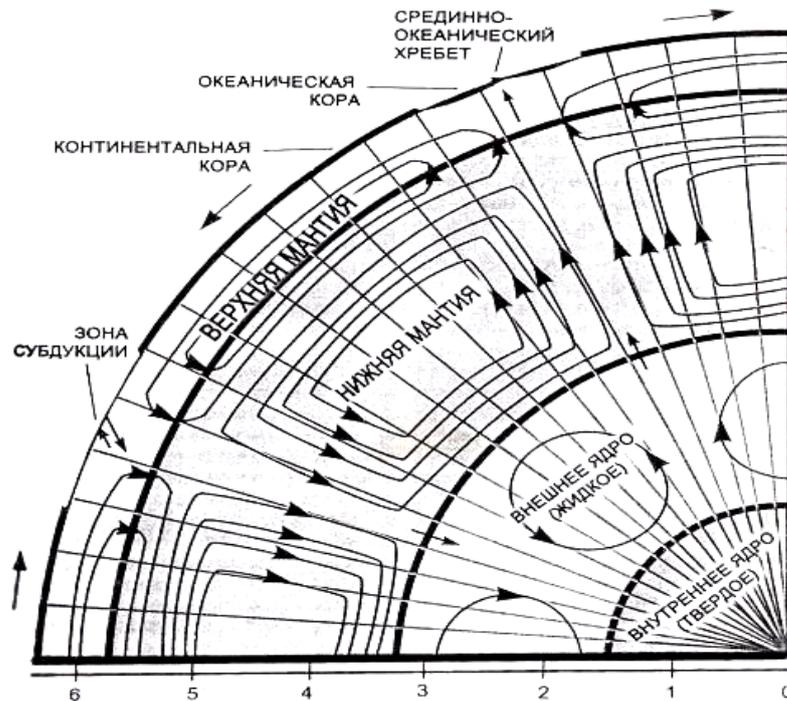


Рис. 1.7. Современные представления о внутреннем строении Земли

Магнитная ось Земли почти параллельна ее оси вращения, поэтому многие исследователи предполагали, что магнитное поле возникает вследствие вращения Земли.

Но расчеты показали, что, если бы магнитное поле Земли возникло таким путем, оно было бы в  $10^9$  раз меньше.

Другая гипотеза связывала возникновение магнитного поля Земли с тем, что на ее поверхности имеется отрицательный электрический заряд. Вращаясь вместе с Землей, этот заряд образует круговой электрический ток, а там, где есть круговой ток, есть и магнитное поле, направленное по оси круга. Но отрицательный заряд на поверхности Земли слишком мал, чтобы могло возникнуть поле нужной величины. Обе эти гипотезы не могли объяснить инверсии геомагнитного поля.

В 1947 г. советский физик Я. И. Френкель совсем иначе объяснил образование магнитного поля в Земле. Он предположил, что вещество земного ядра обладает электрической проводимостью и совершает вихреобразные перемещения. Если имеется какое-то небольшое начальное магнитное поле, то земное ядро будет представлять собой некое подобие генератора электрического тока: движение проводника в магнитном поле приведет к возникновению электрического тока, а электрический ток вызовет магнитное поле, которое будет складываться с первоначальным и усилит его. Часть ядра Земли, в интервале 1,5—3 тыс. км от центра Земли, ведет себя как жидкое пластичное тело, и перемещения вещества в нем возможны. Вызвать вихревые перемещения конвективного характера может сильный нагрев за счет распада радиоактивных веществ в центральной части ядра или же изменение вещества в самом жидком слое.

Впоследствии гипотеза Я. И. Френкеля была значительно переработана и развита другими учеными в стройную теорию происхождения магнитного поля Земли. Появилось направление в науке, занимающееся связью движущейся проводящей среды с магнитным полем, — магнитогидродинамика.

Удалось выяснить, что проводящая жидкость, движущаяся в магнитном поле, искажает его: магнитные силовые линии как бы захватываются и увлекаются движущейся жидкостью. Жидкая, пластичная часть ядра при вращении увлекает за собой силовые линии начального магнитного поля.

В результате образуются два круговых соленоида, один из которых опоясывает ядро по широте в Южном полушарии, а другой — в Северном. Вещество жидкого ядра совершает, кроме того, конвективные перемещения. Взаимодействие этих конвективных движений с кольцевыми полями внутри ядра и приводит к возникновению того магнитного поля, которое мы наблюдаем на поверхности Земли.

Ось такого магнитного поля должна быть близка к оси вращения, а возбужденное таким образом магнитное поле, как показывает теория, будет пульсировать. С этими пульсациями и связаны, очевидно, вариации магнитного момента. Увеличиваясь по амплитуде, пульсации в какой-то момент приводят к изменениям знака магнитного момента — происходит инверсия геомагнитного поля.

### ***Происхождение магнитного поля***

Наблюдаемые свойства магнитного поля Земли согласуются с представлением о его возникновении благодаря механизму гидромагнитного динамо. В этом процессе первоначальное магнитное поле усиливается в результате движений (обычно конвективных или турбулентных) электропроводящего вещества в жидком ядре планеты.

При температуре вещества в несколько тысяч К его проводимость достаточно высока, чтобы конвективные движения, происходящие даже в слабо намагниченной среде, могли возбуждать изменяющиеся электрические токи, способные, в соответствии с законами электромагнитной индукции, создавать новые магнитные поля. Затухание этих полей либо создает тепловую энергию (по закону Джоуля), либо приводит к возникновению новых магнитных полей. В зависимости от характера движений эти поля могут либо ослаблять, либо усиливать исходные поля. Для усиления поля достаточно определенной асимметрии движений.

Таким образом, необходимым условием гидромагнитного динамо является само наличие движений в проводящей среде, а достаточным — наличие определенной асимметрии (спиральности) внутренних потоков среды. При выполнении этих условий процесс усиления продолжается до тех пор, пока растущие с увеличением силы токов потери на джоулево тепло не уравновесят приток энергии, поступающей за счет гидродинамических движений.

Динамо-эффект — самовозбуждение и поддержание в стационарном состоянии магнитных полей вследствие движения проводящей жидкости или газовой плазмы. Его механизм подобен генерации электрического тока и магнитного поля в динамо-машине с самовозбуждением. С динамо-эффектом связывают происхождение собственных магнитных полей Солнца Земли и планет, а также их локальные поля, например, поля пятен и активных областей.

Геомагнитное поле в целом состоит из нескольких полей:

$$T = H_0 + H_M + H_a + H_B + \delta H. \quad (1.16)$$

Здесь  $H_0$  – напряженность дипольного поля, создаваемая однородной намагниченностью земного шара,  $H_M$  – напряженность недипольного, или материкового, поля, создаваемого внутренними причинами, обусловленными неоднородностью глубинных слоев Земли,  $H_a$  – напряженность аномального поля, создаваемая различной намагниченностью верхних слоев земной коры,  $H_B$  – напряженность поля от внешних источников,  $\delta H$  – напряженность поля внешних вариаций.

Сумма полей  $H_0+H_M$  образует главное магнитное поле Земли.

**Геомагнитное поле (ГМП)** в первом приближении эквивалентно полю диполя с магнитным моментом  $M_3=8,8*10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$  в центре Земли (центральный диполь). Этот эквивалентный диполь представляет поле более точно, если ось диполя смещена на 540 км (2000 г.) от центра Земли в сторону Тихого океана (эксцентричный диполь). Сейчас ось земного диполя наклонена к оси вращения Земли на  $10^\circ$  и пересекает земную поверхность в точке с координатами  $79^\circ 32'$  с.ш. и  $71^\circ 34'$  з.д. (модель IGRF-2000) в Гренландии (южный геомагнитный полюс). Магнитный полюс прецессирует относительно географического с периодом  $\sim 1200$  лет.

Пример: для создания потока магнитной индукции, подобного земному, нужно обхватить Землю проводником по экватору и пропустить по нему ток  $I=600$  млн. А.

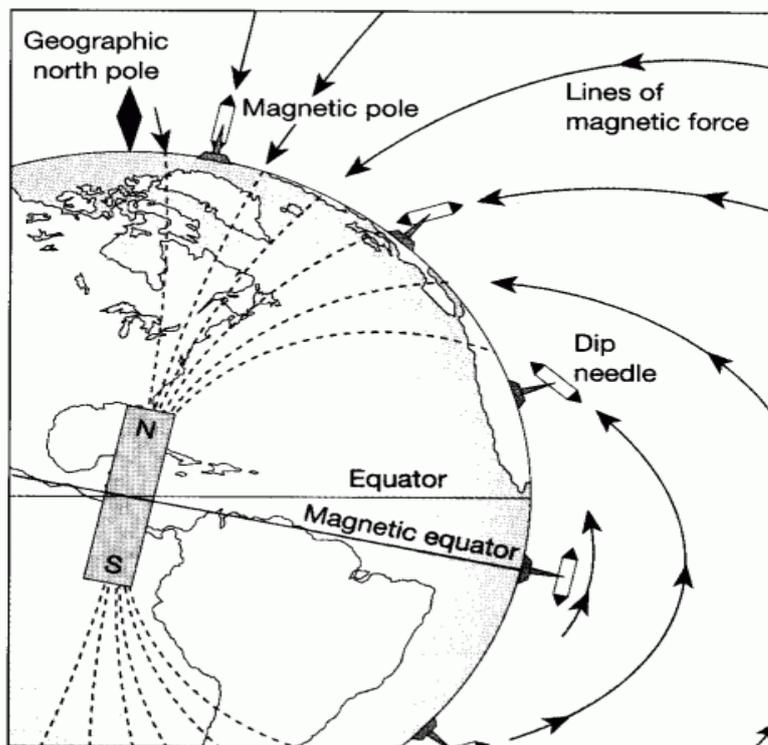


Рис. 1.8. Магнитный диполь Земли и положение магнитного полюса

Поскольку магнитный диполь является лишь приближённой моделью магнитного поля Земли, геомагнитные полюса несколько отличаются по своему расположению от истинных магнитных полюсов, в которых магнитное склонение равно  $90^\circ$ .

**Магнитный полюс** — условная точка на земной поверхности, в которой магнитное поле Земли направлено строго под углом  $90^\circ$  к поверхности. Стрелка компаса здесь расположена вертикально.

**Геомагнитными полюсами** называются точки, где ось магнитного диполя (представляющего из себя основную компоненту разложения магнитного поля Земли по мультиполям) пересекает поверхность Земли.

Для описания геомагнитного поля Гауссом впервые (1839 г.) был произведен его анализ: в связи со сферичностью Земли все геополя разлагаются по сферическим функциям. Этот анализ дал компоненты разной мультипольности — дипольное поле, квадрупольное поле и компоненты высшей мультипольности. Оказалось, что дипольное геомагнитное поле по величине на порядок превосходит поля высшей мультипольности.

Таким образом, геомагнитное поле определяется путем разложения магнитного потенциала  $W$  по сферическим функциям

$$W = R_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+1} \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\} P_n^m(n, \theta)$$

где  $R_3$  - радиус Земли,  $r$  - расстояние от центра Земли, в котором помещено начало сферических координат,  $\theta$  - полярное расстояние,  $\lambda$  - восточная долгота,  $g_n^m$  и  $h_n^m$  - коэффициенты Гаусса,  $P_n^m$  - присоединенные полиномы Лежандра - полиномы  $n$ -го порядка относительно  $\cos \theta$  и  $\sin \theta$ . Коэффициенты  $g_n^m$  и  $h_n^m$  измеряются в тех же единицах, что и напряженность магнитного поля — «Гаусс» (Гс) в СГС. Величины  $g_n^m$  и  $h_n^m$  испытывают небольшие вековые вариации. Первые коэффициенты ряда (1) можно наглядно интерпретировать. Пусть в центре Земли вдоль полярной оси  $z$  расположен магнитный диполь  $\mathbf{M}$ . В произвольной точке  $P$  вектор  $\mathbf{M}$  создает магнитный потенциал  $W = \mathbf{M} \cdot \mathbf{r} / r^3$ . В рассматриваемом случае  $\mathbf{M} = (0, 0, M_z)$ , тогда

$$W = \frac{M_z}{r^2} \cos \theta = \frac{M_z}{r^2} (\cos \theta)$$

Полагая в (1) и (2)  $r = R_3$  и сравнивая оба выражения, найдем  $g_1^0 = M_z / R_3^3$ . Аналогично коэффициенты  $g_1^1$  и  $h_1^1$  выражаются через компоненты магнитного диполя  $M_x$  и  $M_y$  как  $g_1^1 = M_x / R_3^3$ ,  $h_1^1 = M_y / R_3^3$ . Следовательно, первая сферическая гармоника геомагнитного поля эквивалентна полю магнитного диполя, расположенного в центре Земли, причем величина магнитного момента диполя равна

$$M = R_3^3 \{ (g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \}^{1/2},$$

а направление диполя определяется углами  $\theta_0$  и  $\lambda_0$ :

$$\cos \theta_0 = (g_1^0)^{-1} \{ (g_1^0)^2 + (h_1^1)^2 \}^{1/2}, \quad \tan \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1}.$$

Отметим, что если диполь расположить не в начале координат, а в некоторой точке  $r_0(x_0, y_0, z_0)$ , то координаты  $r_0$  могут быть определены как через дипольные ( $n=1$ ), так и через квадрупольные ( $n=2$ ) компоненты поля. Соответствующая геометрическая конфигурация называется эксцентрическим диполем. Центр земного магнитного диполя смещен относительно центра планеты на  $r_0 = 0,0 \mathcal{R}_3$ .

Полный вектор напряженности  $B_m$  и составляющие геомагнитного поля определяются как (рис. 1.9).

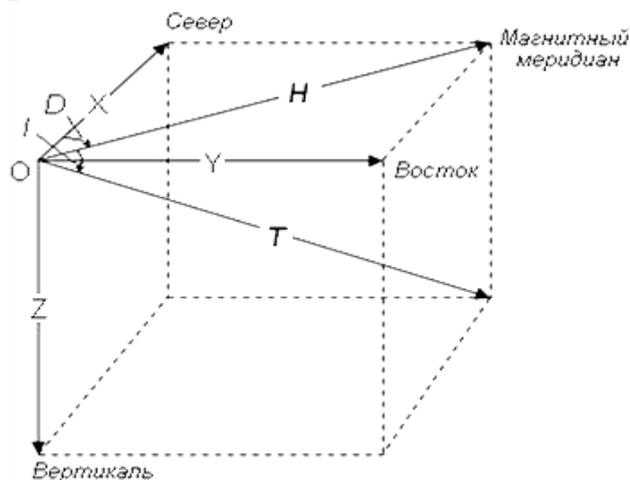


Рис. 1.9. Элементы земного магнетизма

Полный вектор индукции  $T$  и составляющие геомагнитного поля определяются как

$$T = M_3 * \sqrt{1 + 3s^2} \cdot \frac{1}{4\pi r^3}, \quad (1.17)$$

$$Z = M_3 * s \cdot \frac{1}{2\pi r^3}, \quad H = M_3 * c \cdot \frac{1}{4\pi r^3}, \quad \text{tg } D = \frac{Y}{X}, \quad \text{tg } I = \frac{Z}{H}, \quad (1.18)$$

где  $H, X, Y, Z$  – горизонтальная, северная, восточная и южная составляющие;  $D$  и  $I$  – соответственно магнитные склонение и наклонение,  $r$  – расстояние от центра Земли до точки наблюдения на ее поверхности, для приближенных расчетов принимается равным среднему экваториальному радиусу Земли  $R_{\text{земли}} = 6378,2$  км.

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

Таблица 1.1.

## Единицы магнитных величин

Величина	Единица	Определение единицы	Формула	Размерность
Индукция магнитного поля, $B$	Тесла	Магнитная индукция, при которой магнитный поток через поперечное сечение проводника площадью $1 \text{ м}^2$ равен одному Веберу	$B = \frac{\Phi}{S}$	$\text{Вб}/\text{м}^2$
Магнитный дипольный момент, $P$ или $M$	Ампер* $\text{м}^2$	Магнитный момент проводящего контура, охватывающего площадь в $1 \text{ м}^2$ , при силе тока в нем $1 \text{ А}$	$P_m = I * S$	$\text{А} * \text{м}^2$
Магнитный поток, $\Phi$	Вебер	Магнитный поток, при убывании которого до нуля в сцепленном с ним контуре сопротивлением $1 \text{ Ом}$ проходит заряд $1 \text{ К}$	$\Delta\varphi = \Delta q * R$	Вб
Напряженность магнитного поля, $H$	Ампер/м			$\text{А}/\text{м}$

## Связь между единицами измерения магнитных величин:

$$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$$

$$1 \text{ А} * \text{м}^2 = 10^3 \text{ эрг}/\text{Гс}$$

$$1 \text{ А}/\text{м} = 4\pi * 10^3 \text{ Э}$$

$$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Гс} * \text{см}^2$$

В земном и космическом магнетизме употребляется

единица «гамма» ( $\gamma$ ),

$$1\gamma = 10^{-3} \text{ Гс}$$

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

$$M_3 = (8,27 - 0,003951 * t) * 10^{15} \text{ Тл} * \text{м}^3, \quad (1.19)$$

где  $t$  – время в годах с 1900.0.

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

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

В разные геологические эпохи геомагнитное поле имело разную полярность: переполюсовка его происходила с периодом от сотен тысяч до десятков миллионов лет. Причем, в настоящее время скорость южного (то есть находящегося в северном полушарии) истинного геомагнит-

ного полюса резко возросла до (51 км/год в 2001 г.). Его движение происходит через северный географический полюс по направлению к Восточно-Сибирской магнитной аномалии, что и является, по мнению некоторых авторов, прямым признаком переполюсовки общепланетарного поля (Дмитриев А.Н., 1995).

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

Кроме того, существуют магнитные вариации - изменения во времени геомагнитного поля, обусловленные существованием как внутренних, так и внешних по отношению к поверхности Земли источников поля. Магнитные вариации с характерными временами от 10 до 10 тыс. лет, обусловленные процессами в жидком ядре Земли и тесно связанные с механизмом генерации геомагнитного поля, называются вековыми – рис. 1.10 (Энциклопедия «Физика космоса», 1973).

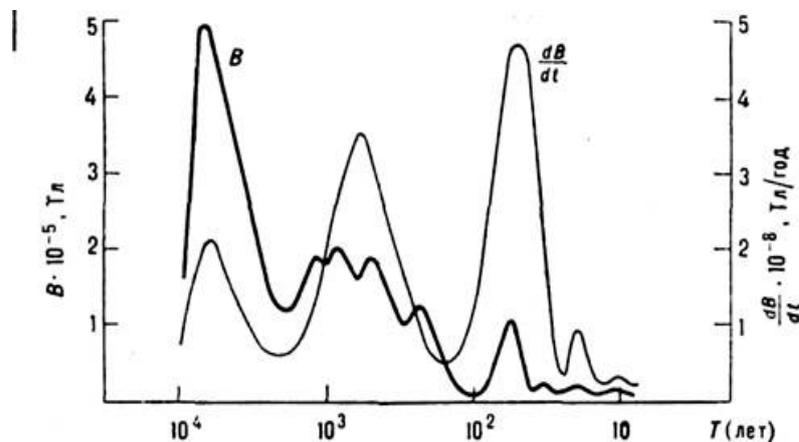


Рис. 1.10. Схематическое изображение спектра вековых вариаций и скорости годовых изменений геомагнитного поля

Вековые вариации геомагнитного поля возникают вследствие движения вещества и волновых процессов в жидком электропроводящем ядре Земли и служат основным источником информации об электропроводности нижней мантии и ядра, о физических процессах, приводящих к конвекции вещества, и о механизме генерации магнитного поля Земли. Их спектр схематически представлен временной кривой на рис. 1.10: амплитуда достигает  $10^{-6}$  Тл, а максимальные характерные времена

$10^4$  лет соответствуют изменению дипольного магнитного момента и имеют, таким образом, глобальное распространение. Более короткие периоды связаны с изменением геомагнитного поля меньших масштабов. Характерные размеры  $L$ -вариаций, отнесённые к поверхности ядра, и связанные с ними соотношением  $T=L^2/D$  характерные времена  $T$  приведены в таблице 1.2 ( $D$ -коэффициент магнитной диффузии).

Таблица 1.2

Характерные параметры вековых магнитных вариаций

T, лет	L, км	D, км <sup>2</sup> /год
7000	$6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
600	$2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$
60	$0,6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$

Для всех типов вековых магнитных вариаций магнитное число Рейнольдса  $R_m = \nu L/D \gg 1$ , где  $\nu$  - характерная скорость движения вещества в жидком ядре Земли, приводящего к данному типу вековых вариаций.

Число Рейнольдса – безразмерное соотношение, которое, как принято считать, определяет ламинарный или турбулентный режим течения жидкости или газа.

В магнитной гидродинамике магнитное число Рейнольдса характеризует взаимодействие проводящих движущихся жидкостей и газов (плазмы) с магнитным полем.

Конвективная природа генерирующих ГМП движений подтверждается наличием западного дрейфа, который проявляется в наблюдаемом на поверхности Земли движении к западу структурных особенностей ГМП в приэкваториальных широтах. Западный дрейф свидетельствует о перераспределении момента вращения при радиальном конвективном перемещении вещества в ядре. Условие вмороженности магнитного поля приводит к вытягиванию магнитных силовых линий полюс-дальнего ГМП ( $H_p$ ) и образованию сильного тороидального магнитного поля. Таким образом, вследствие вращения Земли основная структура конвективных движений близка к осесимметричной. Турбулентные движения нарушают осевую симметрию конвективных движений и снимают запрет на генерацию магнитного поля (теорема Каулинга). Наличие иерархически упорядоченного спектра вековых вариаций свидетельствует о турбулентном характере конвекции, которая приводит к значительным флуктуациям скорости вещества в поверхностных слоях ядра. Поскольку высокая электропроводность нижней мантии обеспечивает наличие сильной электромагнитной связи в системе мантия - ядро, изменение движений в последнем приводит к перераспределению

момента вращения в этой системе, что проявляется в вековой вариации скорости суточного вращения Земли, определяемого по астрономическим данным. Хорошо известны вековые вариации скорости суточного вращения Земли с периодом ~60 лет и изменением длины суток до 2 миллисекунд.

В вековых вариациях как ГМП, так и скорости суточного вращения уверенно выделяется составляющая с периодом 20 лет. Предполагают, что эта вариация вызывается распространением *альвеновских волн* вдоль полоидального поля в жидком ядре Земли.

Если при скорости  $v = H/\sqrt{4\pi\rho}$  в объёме ядра возникает стоячая волна длиной  $2R_j$  ( $\rho$ - плотность вещества,  $R_j$ - радиус ядра Земли) и поперечные перемещения вещества направлены вдоль широтных кругов, то это приводит к крутильным колебаниям поверхностного слоя ядра, которые путём электромагнитного взаимодействия передаются мантии и фиксируются как вековые вариации магнитного поля и скорости суточного вращения.

Выделяют магнитные вариации с меньшими характерными временами, вплоть до 10 и менее лет, но их амплитуда на поверхности Земли невелика (-5÷20 нТл), что не позволяет идентифицировать их природу. Малая амплитуда этих вариаций связана в значительной мере с высокой электропроводностью нижней мантии Земли, которая действует как частотный фильтр, практически не пропуская к поверхности Земли любые изменения магнитного поля, если их характерное время меньше 10 лет

### **Образование магнитосферы**

Одной из важнейших в ОКП является магнитосфера – структура, образованная взаимодействием солнечного ветра с геомагнитным полем.

Строгой границы между магнитосферой и ионосферой не существует. На высоте 1-2 тыс. км обнаруживается ряд явлений, относящихся более к ионосферным, но испытывающим заметное влияние магнитосферы. Внешний слой магнитосферы в подсолнечной точке определяется балансом динамического давления солнечного ветра  $2nt_p v^2$  и давления магнитного поля Земли  $B^2/8\pi$ .

Сила идеально упругого удара протона массой  $m$  о магнитосферу, отнесенная к единице времени, составляет

$$mv - (-mv) = 2mv \quad (1.20)$$

для  $N$  частиц

$$2mvN = 2mvpv = 2ntmv^2 \cos^2 \alpha, \quad (1.21)$$

где  $n$  – концентрация протонов,  $v$  – их скорость,  $\alpha$  – угол падения на магнитосферу.

Давление магнитного поля индукцией  $B$

$$p_{mag} = \frac{B^2}{8\pi}. \quad (1.22)$$

Тогда основное уравнение задачи определения границы магнитосферы

$$2n m v^2 \cos^2 \alpha = \frac{B^2}{8\pi}. \quad (1.23)$$

Далее, геомагнитное поле на границе магнитосферы представляется как  $B_g + B_b$ , где  $B_g$  – собственно геомагнитное поле,  $B_b$  – поле, порожденное током на границе магнитосферы, которое в свою очередь представляется как  $B_p + B_c$  ( $B_p$  – поле на внутренней стороне поверхности,  $B_c$  – поправка на кривизну границы).

Эксперименты показывают, что  $B = 2(B_g + B_c)$ . При определении границы магнитосферы в первом приближении в подсолнечной точке при нормальном падении протонов  $\alpha=0$ ,  $B_c=0$ . Тогда для этой точки  $B=2B_g$ ,  $B_g = \frac{M_3}{R_M^3}$ , а  $R_M^3$  определится выражением (Акасофу, Чепмен, 1974; Сюняев, 1986)

$$2n m v^2 = \frac{1}{8\pi} * \left(\frac{2M_3}{R_M^3}\right)^2, \quad (1.24)$$

где  $M_3$  – дипольный магнитный момент Земли.

Это расстояние от центра Земли (так называемый радиус Чепмена-Ферраро  $M_3$ ) составляет 9-11 ее радиусов.

Перед магнитосферой на расстоянии 13-17 радиусов Земли образуется бесстолкновительная ударная волна, отклоняющая поток солнечной плазмы, обтекающей затем магнитосферу (рис. 1.11).

Скорость солнечного ветра в районе орбиты Земли составляет, в среднем,  $V \sim 4 \cdot 10^5$  м/сек, характерный размер обтекаемой магнитосферы  $L \sim 10 R_E \sim 6,4 \cdot 10^7$  м,  $n_m \sim 10^{10}$  м<sup>2</sup>/сек, т.е. магнитное число Рейнольдса  $Re_m \sim 10^{11} \gg 1$ . Таким образом, при обтекании Земли солнечным ветром осуществляется случай  $Re_m \gg 1$ , т.е., в силу принципа «вмороженности», солнечный ветер не может проникнуть в магнитосферу Земли, а обтекает ее, поджимая магнитосферу с подветренной стороны и вытягивая ее в хвостовой части. То есть, переходная область на рис. 1.11 заполнена солнечным ветром, параметры которого за ударной волной отличаются от параметров солнечного ветра, который в свою очередь не проникает в магнитосферу Земли.

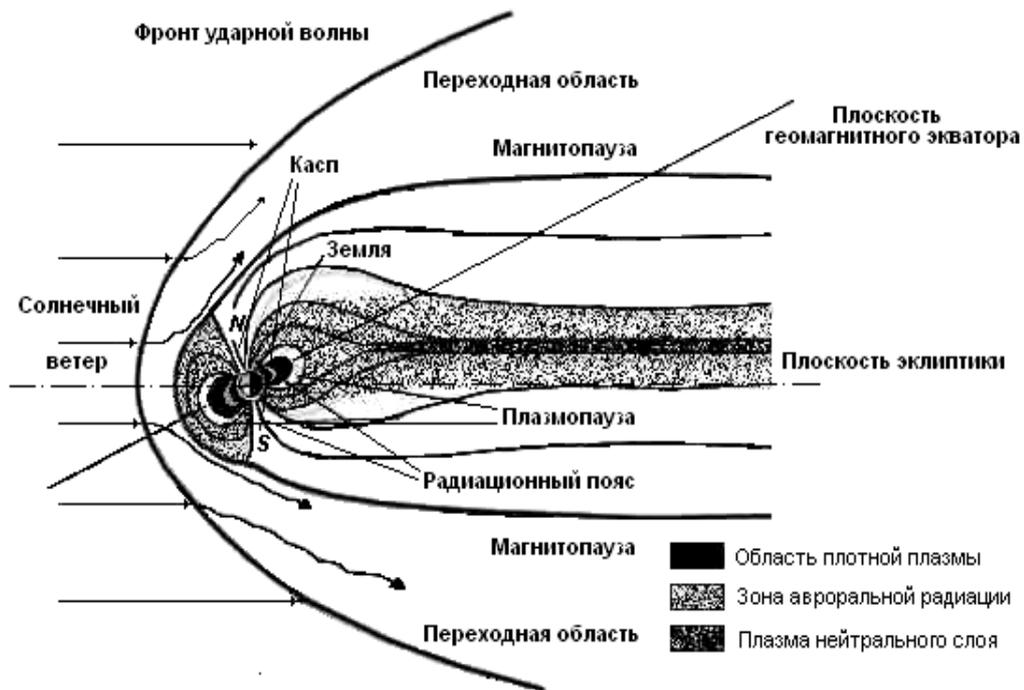


Рис. 1.11. *Магнитосфера Земли*

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

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

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

$$\mu = mv_{\perp}^2/2B, \quad (1.25)$$

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

Под действием электрического поля частицы медленно движутся к Земле в магнитном поле. Здесь происходит также сохранение и второго адиабатического инварианта

$$I_2 = mv_{\parallel}l/\pi, \quad (1.26)$$

где  $v_{\parallel}$  – средняя скорость частицы вдоль магнитной силовой линии,  $l$  – длина силовых линий между точками отражения.

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

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

В плазмосфере магнитное поле удерживает как в ловушке потоки быстрых частиц с энергиями до сотен МэВ. Это протоны, электроны, альфа-частицы и ядра более тяжелых химических элементов. Они образуют так называемые радиационные пояса Земли

**Во внутреннем радиационном поясе** (расстояние, выраженное в земных диаметрах, соответствует магнитному параметру  $L = r/R_3$ ) наблюдается наличие протонов высоких энергий до 800 МэВ и электронов с энергиями до 1 МэВ. С наружной стороны этот пояс ограничен магнитной оболочкой с  $L=2-3$ , пересекающейся с земной поверхностью на геомагнитных широтах  $\sim 45^\circ$ . На нижней границе внутреннего пояса ( $L=1$ ) на высотах порядка 100-200 км заряженные частицы в результате частых соударений с атомами и молекулами атмосферы теряют свою энергию и рассеиваются в атмосфере (Гальпер, 1999; Сюняев, 1986).

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

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

Современная картина общей структуры радиационных поясов Земли приведена на рис.1.12 (Гальпер, 1998; Merabtime, et al., 2004).

Кроме этих стационарных поясов в магнитосфере Земли время от времени возникают квазистационарные пояса, происхождение которых

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

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

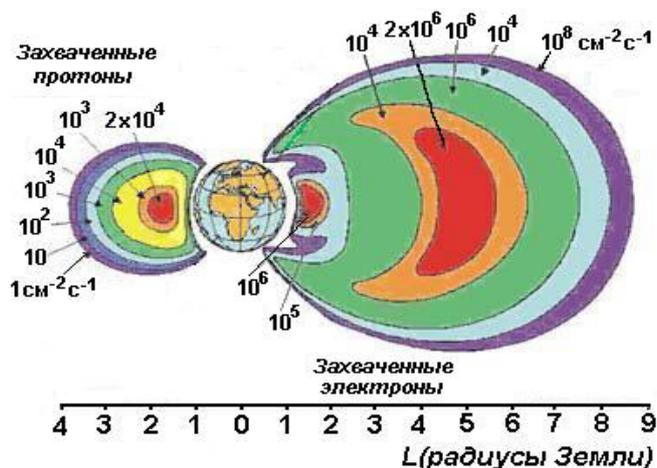


Рис. 1.12. Поток заряженных частиц в радиационных поясах Земли

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

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

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

При осуществлении механизма радиальной диффузии плазма солнечного ветра попадает в магнитосферу со стороны хвоста, захватывается геомагнитным полем и совершает в нем колебательное движение между магнитными зеркалами на линии  $L$ , соответствующей ее энергии. При резком изменении давления солнечного ветра магнитное поле сильно меняется в короткий промежуток времени. Тогда нарушается условие адиабатичности (1.24.-1.25) и частица переходит на оболочку с меньшим  $L$ . При этом происходит увеличение энергии за счет изменения магнитного поля. Этот механизм обеспечивает магнитосферу протонами и электронами с энергиями до  $\sim 30$  МэВ и формирует основную часть внешнего пояса.

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

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

### **Движение заряженных частиц в магнитосфере**

На заряженную частицу, движущуюся в магнитосфере, действуют силы как со стороны магнитных полей  $\vec{B}$ , так и наведенных электрических  $\vec{E}$ . В общем виде уравнение движения частицы в магнитосфере записывается в виде

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = q\vec{E} + q[\vec{v} * \vec{B}], \quad (1.27)$$

где  $m$  – релятивистская масса заряженной частицы  $m = m_0 * (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-0.5}$ .  
 Для нерелятивистского движения масса постоянна ( $m=m_0$ ). Тогда

$$m_0 * \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + q[\vec{v} * \vec{B}] \quad (1.28)$$

Преобладающим движением является движение заряженных частиц под действием магнитного поля – силы Лоренца. Частицы в магнитосфере описывают спирали вокруг силовых линий геомагнитного поля, и движутся, как-бы наматываясь на них от одного магнитного полюса к другому.

Выходу заряженных частиц из радиационного пояса Земли мешает особая конфигурация силовых линий геомагнитного поля, создающего для заряженных частиц своеобразную магнитную ловушку. Под действием сил Лоренца захваченные в неё частицы совершают сложное движение, которое можно представить как колебательное по спиральной траектории вдоль силовой линии магнитного поля из Северного полушария в Южное и обратно с одновременным более медленным перемещением вокруг самой Земли (рис. 1.13).

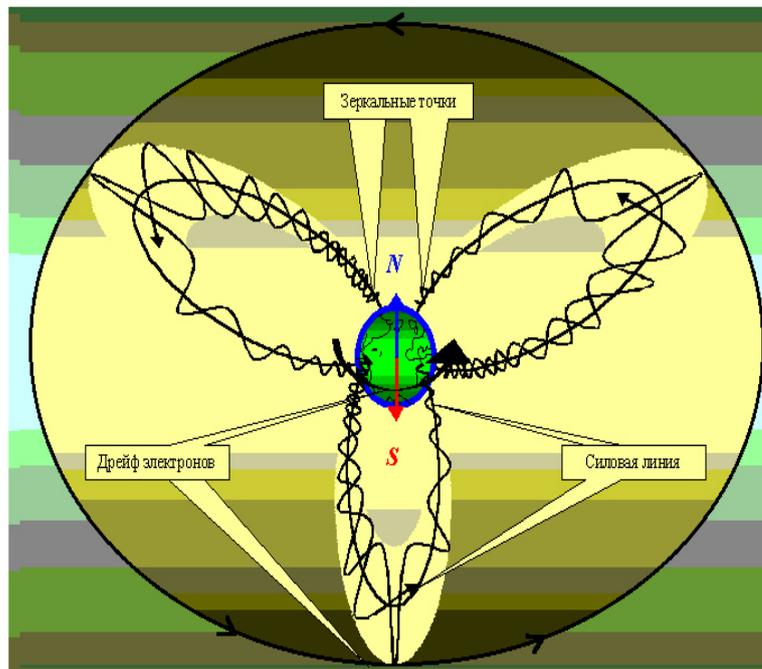


Рис. 1.13. Движение заряженных частиц (электронов), захваченных в геомагнитную ловушку

Дрейф протонов происходит в обратном направлении. Частицы движутся по спирали вдоль силовой линии магнитного поля Земли и, одновременно, дрейфуют по долготе. Когда частица движется по спирали в сторону увеличения магнитного поля, приближаясь к Земле, радиус

спирали и её шаг уменьшаются, а вектор скорости, оставаясь неизменным по величине, приближается к плоскости, перпендикулярной направлению геомагнитного поля. Наконец, в некоторой точке, называемой «зеркальной», происходит как бы «отражение» частицы и она начинает двигаться в обратном направлении к сопряжённой «зеркальной» точке в другом полушарии.

Одно колебание вдоль силовой линии из Северного полушария в Южное протон с энергией  $\sim n \cdot 10^8$  эВ совершает за время  $\sim 3 \cdot 10^{-1}$  с, а время жизни такого протона в геомагнитной ловушке может достигать 100 лет ( $\sim 3 \cdot 10^9$  с).

Долготный дрейф, также характерный для заряженных частиц, попавших в геомагнитную ловушку, происходит со значительно меньшей скоростью: от нескольких минут до суток. При этом положительные ионы дрейфуют в западном направлении, а электроны и отрицательные ионы – в восточном.

### ***Совместная эволюция ГМП и околоземного пространства***

Околоземное космическое пространство (ОКП) включает в себя ряд структур, основной среди которых является магнитосфера. Как известно, эта структура во многом определяет степень воздействия процессов во внешнем пространстве на биосферу и её устойчивость: магнитосфера регулирует уровень корпускулярных потоков различного происхождения в ОКП и биосфере.

Магнитосфера в ОКП обязана своим существованием геомагнитному полю, которое взаимодействует с частицами солнечного ветра. Естественно, эволюция ОКП происходила в прямой зависимости от эволюции Земли как планеты (*Муртазов, 2004*).

Несомненно, также, что эволюция ОКП достаточно тесно связана с эволюцией целого ряда факторов внеземного происхождения: эволюцией межпланетного магнитного поля в процессе образования Солнечной системы, эволюцией плотности потоков тел метеорного происхождения проходящих через него, эволюцией потоков галактического излучения и т.д.

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза гидромагнитного динамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра на глубинах 2900 – 5100 км и дифференциальном вращении ядра вследствие конвективных течений в нем. Согласно теореме Альвена о вмороженности магнитного поля в жидкую проводящую среду, величина индуцируемого поля связана со скоростью вращения внешнего ядра относительно внутреннего и вязкостью. Основное уравнение магнитной гидродинамики для МАК-

волн характеризует в данном случае образование ГМП во внешнем ядре. В целом оно выражает равновесие между силами Кориолиса  $2\rho(\omega v)$ , градиентом давления без гидростатического ( $gradP$ ), полем силы тяжести ( $g$ ), электромагнитными силами ( $i+B$ ) и внешними силами ( $F$ ):

$$2\rho(\vec{\omega}\vec{v}) = -g \quad r + \vec{g}\alpha + (\vec{i} \nabla \vec{B}) + P\vec{F} \quad (1.29)$$

(здесь  $\rho=10 \text{ г/см}^3$  – плотность ядра).

В ряде работ (*Орленок, 2000*) обосновывается вывод о том, что сила  $F$ , определяемая прецессией земной оси, вызывает различные крутящие моменты в ядре и мантии и способствует возникновению несимметричной конвекции во внешнем жидком ядре и тем самым генерирует ГМП. Другие авторы (*Короновский, 1996*) считают, что для «запуска» подобного процесса необходимо начальное, хотя бы очень слабое, магнитное поле, которое может генерироваться *гиромангнитным эффектом*, когда вращающееся тело намагничивается в направлении оси его вращения. В дальнейшем мелкомасштабное генерирующее поле в результате статистического усреднения дает крупномасштабное полоидальное (меридиональное) ГМП, наблюдающееся в ОКП (*Жарков, 1983*).

Предположение о существовании в жидком ядре объемной конвекции, контролируемой магнитными, архимедовыми и кориолисовыми силами (МАК-волны), в результате которой возникают тороидальные магнитные поля находит подтверждение в следующих чертах геомагнитного поля: а) возможность существования магнитного момента как одного, так и противоположного направления (в уравнение входят квадраты скоростей вращения Земли и конвективных движений – *Трухин и др., 2005*); б) близость геомагнитной оси к оси вращения (влияние кориолисовых сил), в) наличие вариаций, являющихся отражением принципиальной неустойчивости процесса генерации поля МАК-волнами (*Петрова, 1998*).

Магнитное поле, наблюдаемое на поверхности Земли (полоидальное поле), не может генерироваться при симметрии конвективных движений. МАК-волны создают короткоживущую асимметрию магнитных полей и конвективных движений. Однако, механизм МАК-волн является неотъемлемой частью любого гидромагнитного динамо. Возможно, что наличие сильного магнитного поля у Земли связано именно с асимметрией строения ядра Земли. К тому же, проекция на поверхность магнитного центра лежит в той же области, что и третий (экваториальный) радиус геоида.

Таким образом, появление ГМП и его эволюция тесно связаны с появлением у Земли двухкомпонентного ядра, то есть с эволюцией са-

мой Земли. Большинство исследователей сходятся на том, что появление наидревнейших пород земной коры произошло около 3,8 млрд. лет назад (Жарков, 1983; Сорохтин, Ушаков, 1998). С этого же времени началась плотностная дифференциация земного вещества с выделением железа и его окислов, образовавших затем земное ядро. По мере продвижения фронта дифференциации вглубь Земли, постепенно расширялась кольцевая зона дифференциации земного вещества. В.В. Орленок (2000) указывает, что внешнего ядра не существовало в течение первых 0,5-1 млрд. лет эволюции Земли. Палеомагнитные данные показывают, что дипольное магнитное поле современного типа у Земли появилось около  $2,6 \cdot 10^9$  лет назад на рубеже архея и протерозоя (Сорохтин, Ушаков, 1998). Основываясь на этом можно принять, что обособление земного ядра произошло только в самом конце архея около 2,6 млрд. лет назад, хотя процесс его выделения продолжается и в настоящее время. Вместе с тем, ГМП за последние 2,0-2,5 млрд. лет, что составляет больше половины геологической истории, принципиально не изменялось (Короновский, 1996). То есть, ГМП сформировалось в период 1-1,5 млрд. лет от образования Земли. К концу этого периода дипольный магнитный момент Земли достиг современного значения  $M \approx 8 \cdot 10^{22}$  А·м<sup>2</sup> (рис. 1.14).

Рост толщины внешнего ядра должен был сопровождаться усилением конвекции и размеров конвективных ячеек, что увеличивало напряженность дипольного поля. Дальнейшее увеличение твердого ядра в будущем приведет к уменьшению внешнего жидкого ядра и, соответственно, уменьшению ГМП (Короновский, 1996).



Рис. 1.14. Процесс образования ГМП: I – окончательное обособление ядра Земли; II – современная величина магнитного момента Земли

Здесь следует учесть, что величина магнитного момента Земли в периоды переполюсовок может уменьшаться примерно на 25%. Однако, эти периоды весьма коротки по сравнению с общей хронологической шкалой, поэтому они не отображены на рисунке.

Таким образом, следствием образования ГМП явилось формирование примерно 2,4-2,0 млрд. лет назад главного компонента ОКП - магнитосферы, - основного экрана, защищающего биосферу от корпускулярных потоков солнечного и часто галактического происхождения.

### ***Сравнительные характеристики магнитосфер планет Солнечной системы***

Магнитосферы планет Солнечной системы можно описывать теми же параметрами, что и земную. Принимая во внимание, что плотность солнечного ветра обратна расстоянию от Солнца, отношение радиусов Чепмена-Ферраро  $R_M$  планеты и  $R_{M3}$  Земли можно записать как

$$\frac{R_M}{R_{M3}} = \left(\frac{a}{M_3}\right)^{0,5}, \quad (1.30)$$

где  $a$  – большая полуось орбиты планеты в а.е.

Основные параметры известных магнитосфер планет представлены в табл. 1.3

Таблица 1.3

Магнитные поля и магнитосферы планет Солнечной системы

	Меркурий	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
Расстояние планеты от Солнца, <i>a.e.</i>	0,39	1	1,53	5,05	9,63
Радиус планеты, <i>км*10<sup>3</sup></i>	2,43	6,38	3,4	71,6	60,0
Напряженность магнитного поля на (поверхности), <i>Э</i>	$2 \cdot 10^{-3}$	0,5	-	10	0,5
Дипольный магнитный момент, <i>Гс*см<sup>3</sup></i>	$5 \cdot 10^{22}$	$8 \cdot 10^{25}$	$2,5 \cdot 10^{22}$	$1,6 \cdot 10^{30}$	$4,4 \cdot 10^{28}$
Радиус Чепмена-Ферраро, <i>в радиусах планеты</i>	1.6	10	1,4	100	20
Перепад электростатического потенциала поперек магнитосферы, <i>кВ</i>	-	100	-	1000	200
Мощность диссипации энергии, <i>Вт</i>	-	$3 \cdot 10^{11}$	-	$2,5 \cdot 10^{13}$	$10^{12}$

Наиболее изучена магнитосфера Юпитера, размеры которой в сотни раз превосходят размеры самой планеты. Отличием магнитосферы Юпитера является ее совместное вращение с системой долгот  $\Pi$  для средних широт и Красного Пятна. Радиационные пояса Юпитера были обнаружены задолго до полетов КА по их радиоизлучению, являюще-

муся синхротронным излучением релятивистских электронов на длинах волн 3-70 см. Интерференционная картина Юпитера в этом диапазоне имеет весьма характерную для радиационных поясов форму «бублика».

До последнего времени считалось, что полярные сияния на Юпитере вызваны быстрым вращением планеты и потоком плазмы, испускаемой спутником Ио. Этот спутник известен своей вулканической активностью - каждую секунду он выбрасывает в межпланетное пространство одну тонну вещества.

Однако сейчас стало ясно, что энергия передается магнитосфере планеты посредством солнечного ветра, а механизм возникновения полярных сияний подобен земному. Это объясняет, кроме всего прочего, и тот факт, что Юпитер имеет температуру выше расчетной.

Кроме того, при генерации альвеновских волн, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера и многократно отражающихся от его ионосферы, возникает сильное радиоизлучение в декаметровом диапазоне. Это излучение является одним из самых сильных в Солнечной системе.

То же можно сказать и о процессах, происходящих в магнитосфере Сатурна, уступающей лишь магнитосфере Юпитера.

На процессы взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля планеты оказывают влияние как размеры планеты, так и структура ее магнитного поля. Так, для планет, лишенных магнитного поля и атмосферы (ионосферы), все взаимодействие сводится к обтеканию солнечным ветром их поверхности с образованием с ночной стороны плазменной тени. Пример – Луна. В случае Венеры, имеющей ионосферу без магнитного поля, взаимодействие солнечного ветра с ионосферой образует ионопаузу. Магнитное поле Меркурия ввиду малых размеров планеты останавливает частицы солнечного ветра весьма близко от поверхности, хотя магнитосфера у планеты и образуется. Собственное магнитное поле Марса еще слабее, поэтому характер взаимодействия его с солнечным ветром зависит от солнечной активности. Если активность Солнца низкая, то магнитное поле находится под ионосферой. При высокой активности Солнца солнечный ветер отжимает ионосферу вниз. Тогда образуется картина взаимодействия, близкая к земной. В последнее время выяснилось, что на Марсе есть локальные магнитные поля ([www.spcenews.ru](http://www.spcenews.ru) - 14.12.2005). Эти магнитные «пятна» располагаются главным образом в южном полушарии. Поэтому весьма слабые полярные сияния на Марсе фиксируются преимущественно в этих районах.

Уран имеет магнитосферу. Она необычна тем, что ось симметрии ее наклонена почти на  $60^\circ$  к оси вращения (у Земли этот угол составляет  $10^\circ$ ). Магнитное поле вблизи облаков составляет  $13 \cdot 10^3$  нТл. Вероятно,

магнитное поле вокруг планеты генерируется движениями в сравнительно поверхностных областях Урана, а не в его ядре. Источник поля - неизвестен; существование гипотетического электропроводящего океана воды или аммиака пока не подтверждено исследованиями.

Интенсивность поля на поверхности Урана в общих чертах сравнима с земной, хотя оно и сильнее изменяется в разных точках поверхности из-за большого смещения оси симметрии поля от центра Урана

Как у Земли, Юпитера и Сатурна, у Урана есть магнитный хвост, состоящий из захваченных полем заряженных частиц, растянувшийся на миллионы километров за Уран от Солнца. КА «Вояджер 2» регистрировал поле, по крайней мере, в 10-ти миллионах километров от планеты.

Магнитная ось Нептуна наклонена на  $47^\circ$  к оси вращения. Кроме того, ось симметрии магнитного поля Нептуна не проходит через центр планеты, а отстоит от него более, чем на полрадиуса, что очень похоже на обстоятельства существования магнитного поля вокруг Урана. Поле, вероятно, создается движениями проводящего вещества (возможно, воды), расположенной в средних слоях планеты, выше ядра.. Соответственно, и напряжение поля непостоянно на поверхности в разных ее местах и меняется от трети земного до утроенного (в среднем  $6,5 \cdot 10^3$  нТл). В какой-либо одной точке поверхности поле также непостоянно, как положение и интенсивность источника в недрах планеты. При подлете к Нептуну КА «Вояджер» двигался почти точно в направлении южного магнитного полюса планеты, что дало возможность провести ряд уникальных исследований. В частности, были обнаружены явления в атмосфере, схожие с земными полярными сияниями.

Можно также отметить, что подобное взаимодействие наблюдается между солнечным ветром и комой комет. Оно связано с тем, что ионы, образующиеся в голове кометы, составляют кометную ионосферу. Солнечный ветер обтекает ее, как ионосферу Венеры или Марса, образуя характерную ударную волну и формируя кометные хвосты.

Подведя некоторые итоги, можно отметить следующее.

Характер взаимодействия магнитных полей и ионосфер тел Солнечной системы с солнечным ветром имеет универсальный характер. Магнитосферы планет подразделяются на собственную магнитосферу, наведенную магнитосферу, комбинированную магнитосферу.

Собственная магнитосфера обладает таким магнитным моментом, который обеспечивает уравнивание динамического давления солнечного ветра за пределами ионосферы и, таким образом, образуется собственная магнитная область с силовыми линиями, свободная от солнечного ветра. Такую магнитосферу имеют Земля и большие планеты.

Магнитное поле Меркурия ввиду малых размеров планеты останавливает частицы солнечного ветра весьма близко от поверхности, хотя магнитосфера у планеты и образуется.

Наведенная магнитосфера обладает незначительным магнитным полем и плотной ионосферой. При взаимодействии ионосферы с солнечным ветром образуются электрические токи, создающие магнитное поле (закон электромагнитной индукции) и, соответственно, наведенную магнитосферу. Так для Венеры, имеющей ионосферу без магнитного поля, взаимодействие солнечного ветра с ионосферой образует ионопаузу. Ионы, образующиеся в голове кометы, составляют кометную ионосферу. Солнечный ветер обтекает ее, как ионосферу Венеры или Марса, образуя характерную ударную волну

Комбинированная магнитосфера имеет собственное магнитное поле, соизмеримое с величиной наведенного поля. Характер взаимодействия магнитного поля Марса с солнечным ветром зависит от солнечной активности. Если активность Солнца низкая, то магнитное поле находится под ионосферой. При высокой активности Солнца солнечный ветер отжимает ионосферу вниз. Тогда образуется картина взаимодействия, близкая к земной.

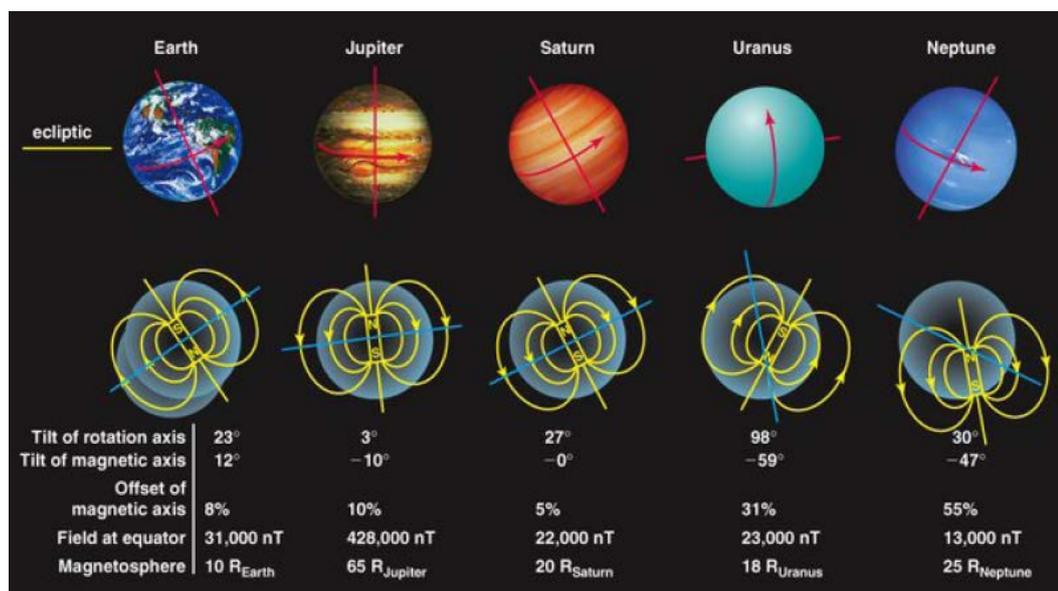


Рис. 1.15. Магнитные поля планет Солнечной системы

### 1.3. Эволюция кислорода в атмосфере Земли и образование озонового слоя

Процессы в озоновом слое оказывают сильнейшее воздействие на биосферу.

Приземный озон опасен для здоровья и входит как компонент в состав фотохимического смога. Выхлопные газы и промышленные выбросы, пары бензина, химические растворители и природные источники различного вида выбрасывают в природу  $\text{NO}_2$  и летучие соединения, принимающие участие в образовании приземного озона.

Наличие же озонового слоя – озоносферы, - на высотах 18 – 50 км является одним из важнейших факторов, обуславливающих устойчивость биосферы.

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

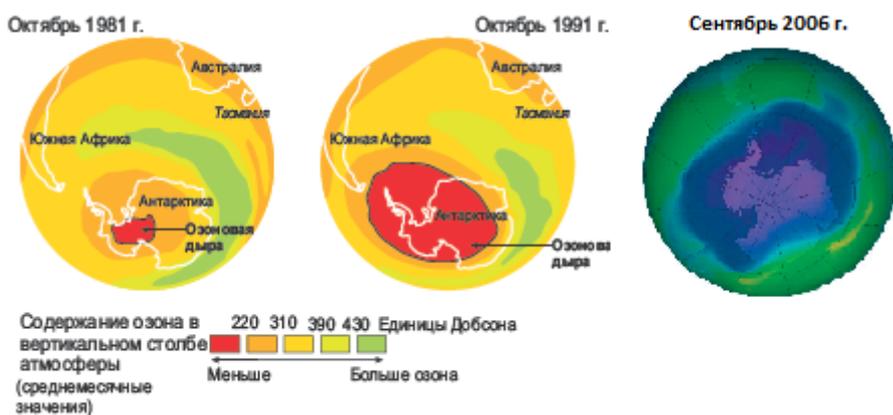


Рис. 1.16. Озоновая дыра в районе Антарктиды

Процесс формирования озонового слоя (его максимальная концентрация приходится на высоты 25-30 км) происходит при совокупном воздействии солнечного излучения, динамических и химических процессов в атмосфере. Образование самого озона идет при фотолизе кислорода ультрафиолетом. То есть, при повышении солнечной активности происходит увеличение концентрации озона в стратосфере.

**Добсона шкала** – шкала, используемая для оценки общего содержания озона в атмосфере. Единица шкалы соответствует одной тысячной коли-

чества озона в вертикальном столбе атмосферы, численно равного толщине слоя и выражающегося в атм  $\square$  см.  
 Толщина озонового слоя, приведенного к нормальным условиям ( $p=760$  мм рт. ст.,  $t=0$   $\square$ 30 мм на среднем д. высоких широтах до 4 мм, в экваториальной зоне – до 2 мм). Таким образом, в процентном отношении содержание озона в атмосфере ничтожно мало.

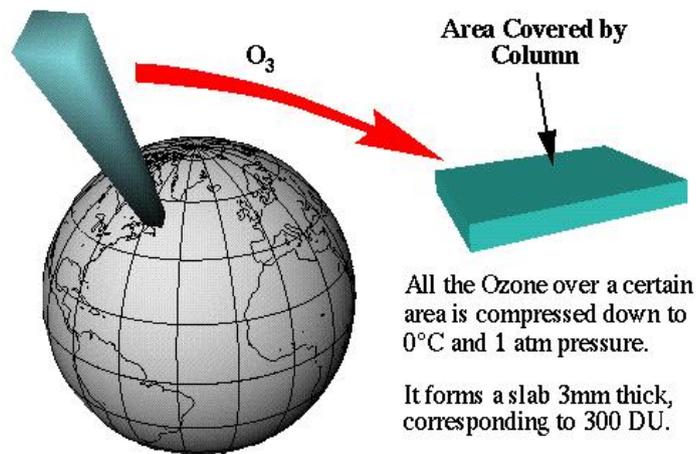
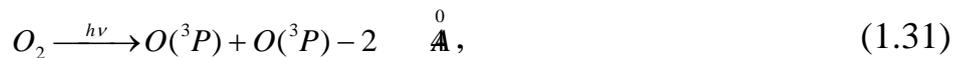


Рис. 1.17. Единица Добсона (сайт службы TOMS)

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



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

Образование молекул озона и их взаимодействие с атомами и молекулами кислорода и катализатора  $M$  в наиболее общем случае описывается циклом Чепмена



$$O_2 + O + M = O_3 + M \quad (1.35)$$

$$O_3 + h\nu(\lambda \leq 0,3 \text{ м } 8) \rightarrow O_2 + O \quad (1.36)$$

$$O_3 + O = 2O_2 \quad (1.37)$$

$$O + O + M = O_2 + M \quad (1.38)$$

Следует отметить, что при усилении солнечной активности происходит увеличение концентрации озона в стратосфере.

Последующее разложение озона образует полосы поглощения излучения в различных диапазонах спектра. Наиболее важные (полосы Хартли) лежат в области 200-300 нм, Здесь коэффициент поглощения озоном солнечного излучения составляет в максимуме  $k=135 \text{ см}^{-1}$ , что дает величину общего поглощения  $10^{40}$ . К полосам Хартли примыкают полосы Хаггинса (320 нм) и Шалона-Лефевра (340 нм) с коэффициентами поглощения на несколько порядков меньше. В видимом участке спектра расположена широкая полоса Шапьюи (500-700 нм), с которой связана синяя окраска озона. Очень сильное поглощение озона наблюдается в области вакуумного ультрафиолета (100-200 нм), что вместе с полосами Хартли приводит к обрыву солнечного спектра у поверхности Земли при длинах волн, меньших 290 нм, что и является защитой органического вещества от жесткого излучения (рис. 1.18).

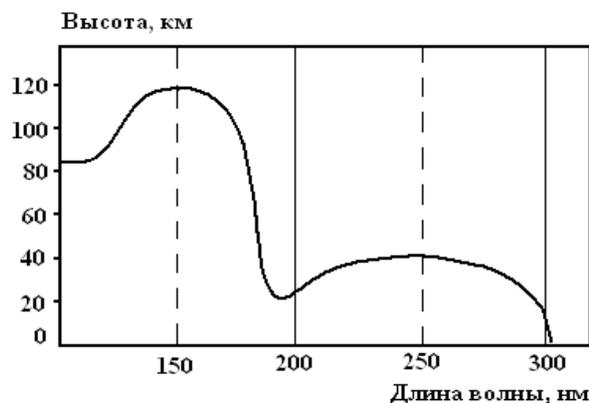


Рис. 1.18. Зависимость высоты, на которой происходит поглощение 90% солнечного света, от длины волны излучения. Коротковолновое излучение (130-170 нм) поглощается уже на высоте 100 км молекулами кислорода  $O_2$ . А на высоте 40 км озон  $O_3$  поглощает ультрафиолет длиной волны от 220 до 280 нм. В отсутствие озона это излучение доходило бы до Земли беспрепятственно.

### **Эволюция химического состава атмосферы и образование озона**

Параллельно происходила и эволюция атмосферы Земли. Можно привести достаточное количество моделей атмосферы на различных этапах ее существования, однако, отметим, что они едины в одном: на

первичном этапе существования Земли кислород практически отсутствовал.

Многими исследователями отмечено, что большая часть свободного кислорода в атмосфере не является продуктом обезгаживания горных пород; кислород должен был бы выделяться из них в виде  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  и т.д. но не в свободном состоянии. Отсюда можно предполагать, что свободный кислород в атмосфере является продуктом фотодиссоциации водяного пара



Однако, этот процесс является саморегулируемым, поскольку образовавшийся в ходе его  $O_2$  поглощает часть солнечного излучения, необходимую для указанной диссоциации. Кроме того, часть  $O_2$  быстро расходуется в ходе различных окислительных реакций. Поэтому можно полагать, что первичная атмосфера содержала менее 0,1% нынешнего количества кислорода и что последующее возрастание количества кислорода в обозримое геологическое время обусловлено процессами фотосинтеза.

Таким образом, скорее всего первый 1 млрд. лет атмосфера была восстановительной, имелись возможности для процессов абиогенного образования и накопления многих соединений (*Акасофу, Чепмен, 1974; Орленок, 2000*).

По всем данным, наиболее обильным газом являлся углекислый газ.

Согласно одной из современных моделей (*Сорохтин, Ушаков, 2004*) углекислый газ поступал в атмосферу только благодаря дегазации земной мантии. При этом скорость дегазации  $CO_2$  была пропорциональна тектонической активности Земли и достигала своего максимума в архее. Если бы весь дегазированный углекислый газ сохранялся в атмосфере, то его парциальное давление в современную эпоху достигало бы 90-100 атм. (как на Венере). Однако на Земле, одновременно с поступлением  $CO_2$  в атмосферу происходило его связывание в карбонатах.

Суммарное давление архейской атмосферы могло превышать 10 бар (рис. 1.19 - сплошные линии), а парниковый эффект повышал температуру атмосферы почти до  $120^\circ C$ .

В середине архея около 3,4 млрд. лет назад уже возник Мировой океан. В результате заметно усилилась гидратация существенно базальтовой океанической коры, а скорость роста парциального давления  $CO_2$  в позднеархейской атмосфере несколько снизилась. Наиболее радикальное же падение давления углекислого газа произошло только на рубеже архея и протерозоя после выделения земного ядра и связанного с этим резкого уменьшения тектонической активности Земли. По этой причи-

не, ко времени около 2,4 млрд. лет назад парциальное давление углекислого газа в раннепротерозойской атмосфере резко упало (примерно в  $10^4$  раз) до равновесного уровня, приблизительно равного 0,5 мбар, а общее давление атмосферы снизилось с 7–8 бар в самом конце архея до 1,12 бар в раннем протерозое. При этом весь процесс удаления  $CO_2$  из атмосферы на рубеже архея и протерозоя, по-видимому, занял не более 100 – 150 млн. лет. В результате состав раннепротерозойской атмосферы стал существенно азотным (с небольшой добавкой аргона около 9,6 мбар).

Давление кислорода, по-видимому, только около 1,1 млрд. лет назад достигло уровня 1 мбар (Акасофу, Чепмен, 1974).

С наступлением фанерозоя и, особенно в конце палеозоя, давление земной атмосферы вновь начало подниматься за счет усиленной генерации кислорода и достигло своего относительного максимума около 400–200 млн. лет назад. По данным (Акасофу, Чепмен, 1974) относительное содержание кислорода могло достигать  $N=10$  (рис. 1.19 – штрих).

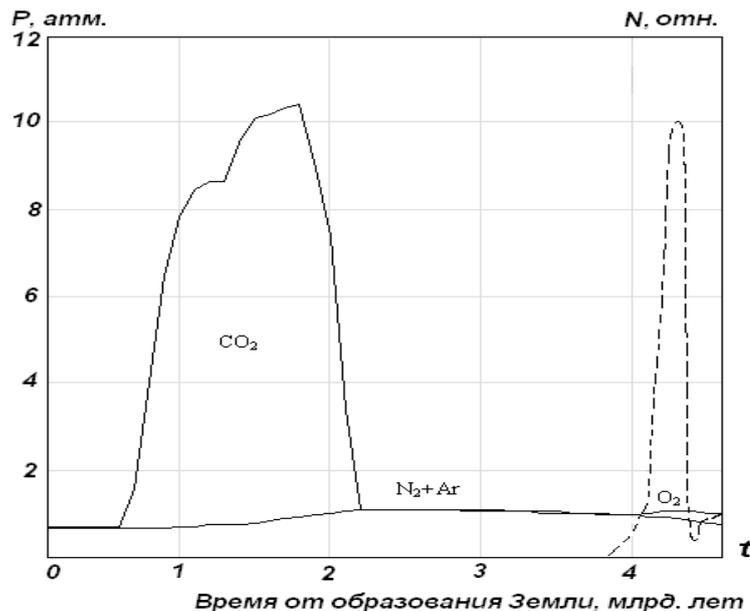


Рис. 1.19. Эволюция состава и давления  $P$  земной атмосферы в модели (Сорохтин, Ушаков, 1998) – сплошные линии, штрих - изменение концентрации  $N$  кислорода по одной из моделей (Акасофу, Чепмен, 1974; Трофимук и др., 2000)

Можно выделить основные геологические периоды образования кислорода в земной атмосфере (Трофимук, Молчанов, Параев, 2000)

(Докембрийский)– Первичная восстановительная атмосфера. Один из основных механизмов выделения свободного кислорода – реакция фотодиссоциации водяных паров под действием ультрафиолетового

излучения. II. (*Кембрийский 570-505 млн. лет до современной эпохи*) – содержание кислорода в атмосфере достигло 0,1% современного и стало экраном губительного для живого вещества ультрафиолета (эффект Юри). Расширяются ареалы и разнообразие водорослей. Помимо гетеротрофов с системой водородного дыхания появляются кислородпотребляющие организмы. III. (*Ранне-среднеордовикский 505-438 млн. лет*) – необратимость становления кислородной атмосферы. Экспансия водорослей с последующим выходом их к поверхности и соответствующим усилением фотосинтеза. Фотодиссоциация, как основной механизм пополнения атмосферы кислородом, сменяется процессами фотосинтеза. Масса генерируемого при фотосинтезе кислорода превышает его расход на окисление в литогенезе и достигает уровня 1% от современной его концентрации в атмосфере (точка Пастера). Организмы от брожения переходят к более энергетически выгодным процессам дыхания. По мере накопления кислорода в атмосфере создаются условия для образования стабильного озонового экрана и появления многочисленных форм жизни. Концентрация кислорода в атмосфере в 10% современной (критический уровень Беркнера-Маршалла) подготовила эволюционный скачок в биосфере. IV. (*Позднеордовикско-среднедевонский 438-400 млн. лет*) – динамическое равновесие в производстве и потреблении кислорода. Разнообразие органической жизни, выход растений на сушу. V. (*Позднедевонско-раннекаменноугольный 400-360 млн. лет*) – резкое увеличение массы кислорода. Экспансия и расцвет наземной растительности и как следствие – расширение масштабов фотосинтеза. Масса воздушного кислорода впервые достигает современной и более никогда уже не опускается ниже этого уровня. VI. (*Среднекарбон-раннеюрский 320-220 млн. лет*) – динамическое равновесие «приход-расход» кислорода. Продолжение экспансии наземной растительности. VII. (*Мезокайнозойский 180 млн. лет*) – генерация биогенного кислорода значительно превышает его расход в литогенезе. Богатая и разнообразная растительность, господство покрытосеменных с интенсивным фотосинтезом. Раскрытие Атлантики с общим ростом гидросферы и сульфатизации морских вод, потребовавшая  $2500 \cdot 10^{12}$  т кислорода, компенсировали интенсивность его выделения при фотосинтезе в послейорское время. Распад Гондваны. Мощный орогенез, интенсивный вулканизм.

В среднем концентрация озона в атмосфере определяется выражением (Хргиан, 1978)

$$N_3 = \sqrt{\frac{k_2 I_2 N_2^2 N_4}{k_3 I_3}}, \quad (1.39)$$

где  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  – соответственно концентрация кислорода, озона и любого вещества, молекулы которого участвуют в реакции образования озона (азот, кислород, в некоторых моделях -  $CO_2$ ),  $k_2 = 8 \cdot 10^8 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$  - постоянная образования озона,  $k_3 = 6 \cdot 10^8 \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$  - постоянная разрушения озона,  $I_2$  - поглощенное кислородом число квантов солнечного излучения,  $I_3$  – число квантов, дошедшее и поглощенное озоном при его разрушении, достаточно удовлетворительно описывающее форму наблюдаемого вертикального распределения озона с максимумом на высоте 22-26 км.

Соответственно, на этих высотах происходит максимальное поглощение УФ-излучения. К примеру, на длине волны 255 нм коэффициент поглощения  $\alpha_\lambda = 126 \text{ см}^{-1}$ .

Согласно закону Бугера поглощение света в атмосфере зависит от числа поглощающих атомов вдоль луча зрения

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} * e^{-\alpha_\lambda l}, \quad (1.40)$$

где  $l$  – оптическая длина пути луча в атмосфере,  $I_{\lambda 0}$  и  $I_\lambda$  - внеатмосферная и наземная интенсивности солнечного излучения,  $\alpha_\lambda$  – коэффициент поглощения.

Результаты расчетов показывают, что концентрация кислорода в атмосфере в период 570-400 млн. лет возросла практически экспоненциально (рис. 1.20). В соответствии с выражением (5.3) количество озона нарастало по такому же закону (принималось, что неравенство  $I_2 N_2 < I_3 N_3$  выполнялось в любой период эволюции атмосферы). Поскольку коэффициент поглощения коротковолнового излучения озоном  $\alpha_\lambda$  определяется логарифмом числа поглощающих частиц на пути распространения луча, то в итоге для указанного периода 570-360 млн. лет увеличение коэффициента поглощения происходило в среднем по линейному закону (Murtazov, 2005).

Можно отметить, что кислородно-углеродные ( $CO_2$ ) и кислородно-азотные модели палеоатмосферы (Thomas, et al., 2005) дают несколько отличающиеся количества образующегося озона

Таким образом, нижняя граница ОКП – озоновый слой – была сформирована в период 570-360 млн. лет назад как экран, защищающий биосферу от жестких электромагнитных излучений.

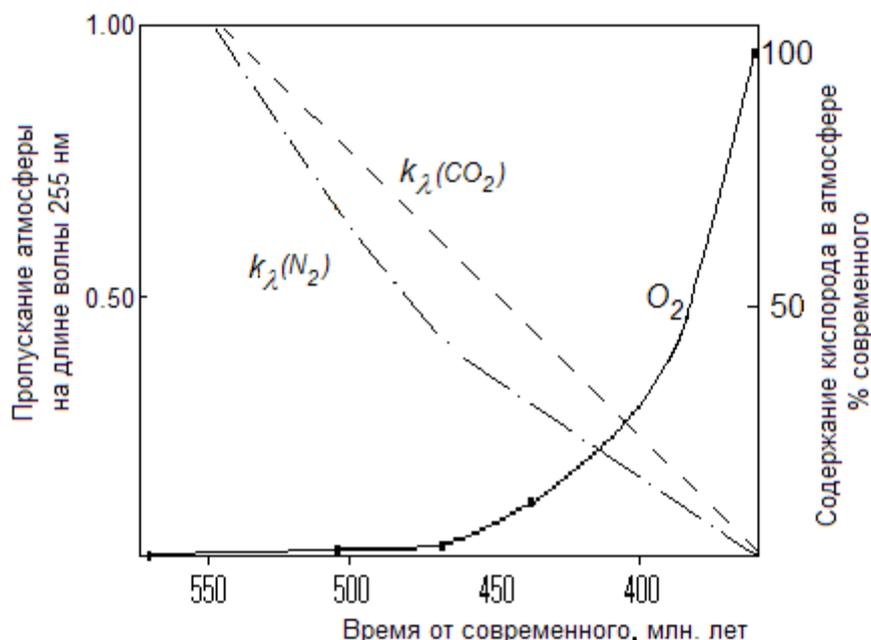
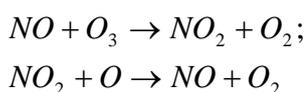


Рис. 1.20. Рост количества кислорода в палеоатмосфере (сплошная линия) и соответствующие ему изменения пропускания  $k_\lambda$  на длине волны  $\lambda=255$  нм атмосферы для кислородно-углеродной (штрих) и кислородно-азотной (штрих-пунктир) модели

### Проблемы, связанные с озоновым слоем

Наиболее эффективным веществом, являющимся катализатором реакций, подобных реакциям Чепмена, является оксид азота (Ортенберг, Трифонов, 1990),



Реакции, подобные последней, можно записать для хлора, фтора и некоторых других веществ. Однако, по сравнению с потоком хлорфторметанов все остальные техногенные источники дают относительно малый вклад. Именно хлорфторметаны - фреоны, имеющие химические формулы типа  $CFCl_3$ ,  $CHFCl_2$ ,  $C_3H_2F_4Cl_2$  и др., являются, как считает наибольшее число исследователей, наиболее ощутимыми катализаторами реакций разрушения озонового слоя Земли.

В связи с общепринятым мнением о воздействии хлорфторуглеродов на озоновый слой в 1985 г. была принята Венская конвенция по защите озонового слоя, а 1.01.1989 г. был составлен Международный (Монреальский) протокол о запрещении производства фреонов. В России последнее постановление Правительства №1368 о

ввозе и вывозе из страны озонобразующих веществ подписано 10.12.1999 г.

В природе основным источником оксида азота  $NO$  является оксид диазота  $N_2O$ , образующийся в бактериальных процессах на земной поверхности и проникающий в стратосферу.

Основными техногенными источниками фреонов в атмосфере являются:

1. Выбросы в атмосферу компонентов и отходов химической и электронной промышленности.
2. Транспорт.
3. Авиация.
4. Запуски ракетной техники. На их долю приходится уже до 5-7% от общего фона загрязнения атмосферы транспортными средствами.
5. Высотные ядерные взрывы являются мощнейшим катализатором диссоциации озона.

Разрушение озона и потепление климата – две разные проблемы, их нельзя разделить, поскольку обе изменяют глобальные циклы. Полный масштаб взаимосвязи этих проблем пока не выяснен. Однако, можно отметить некоторые общие моменты (ЮНЕП, 2009):

- оба процесса, как многие считают, вызваны техногенными причинами;
- многие озоноразрушающие вещества являются еще и парниковыми газами. ГХФУ, которые должны заменить ХФУ, зачастую имеют больший потенциал глобального потепления, чем заменяемые ими вещества;
- разрушение озона в стратосфере в некоторой степени «помогает» снижению потепления, поскольку озон является парниковым газом.

Механизм подобной связи, рекомендованный ЮНЕП, приведен на рис. 1.21.

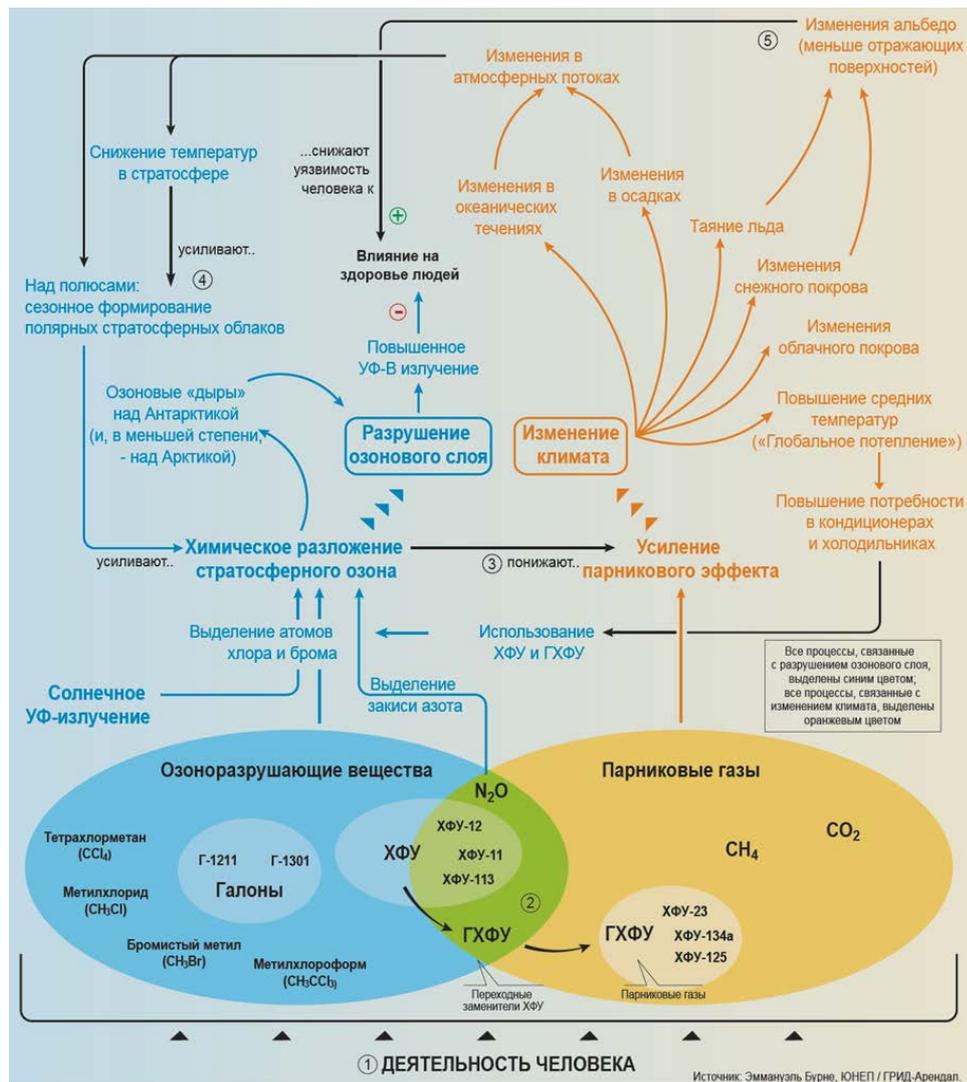


Рис. 1.21. Механизм связи содержания озона в стратосфере с изменением климата по версии ЮНЕП

Вместе с тем, в начале XXI века появились исследования целого ряда естественных причин нарушения озонового слоя.

#### Опасные космические тела

Попадание космических тел естественной или техногенной природы из ОКП в стратосферу способствует резкому повышению образования оксида азота. Так, при падении Тунгусского метеорита в 1908 г. на высотах 30-100 км образовалось около  $30 \cdot 10^9$  кг оксида азота, что резко уменьшило прозрачность атмосферы в УФ-области спектра в последующие 3 года (Ортенберг, Трифионов, 1990). С другой стороны, такое количество оксида азота – отличного удобрения, - стимулировало рост леса в районе падения Тунгусского тела (Боярчук, 1999).

#### Космические лучи

К образованию большого количества оксида диазота может привести резкое увеличение потока космических лучей больших энергий в

ОКП как вследствие солнечной вспышки, так и вспышки близкой сверхновой.

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

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

Интенсивность космических лучей изменяется в зависимости от широты (над полюсами она на несколько десятков процентов больше, чем на экваторе), что связано с влиянием магнитного поля Земли на заряженные частицы. Также известно, что интенсивность космических лучей меняется в пределах 11-летнего цикла солнечной активности, причем интенсивность космических лучей изменяется в противофазе с солнечной активностью. Анализ данных многолетних измерений интенсивности космических лучей и содержания озона в стратосфере (в зависимости от географической широты, высоты, времени года) показал, что существует явно выраженная корреляция между образованием областей с пониженным содержанием озона и интенсивностью космических лучей. При попадании в атмосферу высокоэнергетичные частицы испытывают столкновения с ядрами атомов азота и кислорода. Одним из результатов многоступенчатых процессов распада образующихся при этих взаимодействиях частиц является появление большого числа низкоэнергетичных электронов. Взаимодействие электронов с фреонами ведет к диссоциации молекул фреонов, например, по следующей схеме  $e^- + CF_2Cl_2 \rightarrow Cl + CF_2Cl$ , причем сечение этого процесса на 3 - 4 порядка больше, чем для фотохимической диссоциации. Показано, что при низких температурах (менее 200 К) такие процессы должны достаточно интенсивно протекать для молекул фреонов, адсорбированных на поверхность частичек льда. Именно такие условия существуют в огромных приполярных массивах стратосферных (существующих на высоте 15 - 20 км) облаков в зимний период (заметим, что недавно было показано, что увеличение интенсивности космических лучей приводит к увеличению площади поверхности Земли, закрытой облаками). Предполагаемая последовательность процессов, ведущих к обеднению озонового слоя, изображена на рис. 1.22. Космические лучи создают в частичках льда, содержащихся в плотных приполярных облаках (PCS),

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

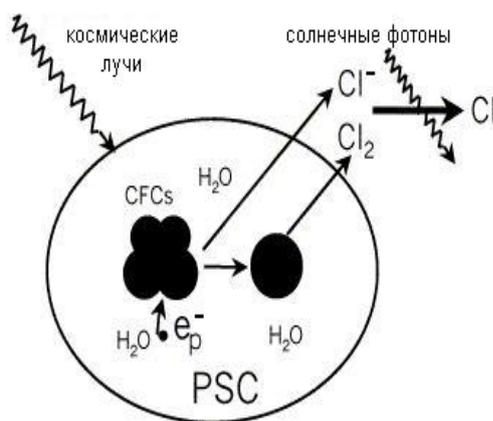


Рис. 1.22. Разрушение фреонов под действием космических лучей

### Дегазация земных недр

Систематизация данных по потокам природных газов, корреляция положения центров дегазации Земли с наиболее устойчивыми озоновыми аномалиями позволил сделать ряд выводов (Веймарн и др., 1998; Сывороткин, 1998): 1. Озоновый слой подвержен разрушению флюидными потоками, восходящими из расплавленного земного ядра; 2. Распределение локальных минимумов озонового слоя контролируется мировой рифтовой системой, дегазационная активность которой возрастает в южном направлении, достигая максимума над Антарктидой. Центры озоновых аномалий совпадают также с поясами развития кимберлитового алмазоносного магнетизма; 3. Изучение осадочной оболочки Земли приводит к выводу о периодичности разрушения озонового слоя в прошлом в связи с импульсами усиления водородной дегазации ядра планеты.

### Полярные стратосферные облака

1) Разрушение озонового слоя над Арктикой происходит намного быстрее, чем предполагалось, из-за побочных эффектов глобального потепления.

Если верхние слои арктической атмосферы становятся холоднее – это последствие изменений климата, – тогда скорость истощения озо-

нового щита могла бы быть в три раза выше, чем принято считать. Потери озона жёстко связаны с количеством полярных стратосферных облаков (Rex M., et al, 2004). Химические реакции в облаках преобразовывают промышленный хлор в реактивную форму, которая разрушает молекулы озона.

2) В течение холодной антарктической зимы, когда температура нижней стратосферы падает до 80 градусов ниже нуля, холодный воздух начинает опускаться вниз, в результате чего под действием сил Кориолиса на высотах 10-20 км образуется полярный вихрь, изолирующий воздух внутри своего объема от остального пространства. В этом воздухе образуются стратосферные полярные облака, содержащие молекулы воды и азотной кислоты (она в небольших количествах постоянно образуется из окислов азота природного происхождения). На поверхности частиц облаков протекают реакции, приводящие к образованию из слабоактивных, достаточно устойчивых соединений хлора малоустойчивых молекул  $Cl_2$  и  $HOCl$ . Процессы идут в течение всей зимы, в результате чего к ее концу в полярном вихре накапливается значительное количество этих слабосвязанных компонент. С восходом солнца в начале весны, то есть в начале сентября, они легко распадаются, и образуются активные хлорные частицы, начинающие разрушать озон цепным путем.

Поскольку вихрь еще существует и никакого обмена с соседними, богатыми озоном областями стратосферы нет, содержание озона быстро уменьшается, и внутри вихря, на высоте 10-15 км, озон полностью исчезает. Далее происходит разогрев воздуха, распад вихря и расползание остатков дыры по Южному полушарию (Ларин, 2001).

Результаты анализа содержания озона в 2000-2004 гг. показывают (Крученицкий и др., 2004), что озоновый слой Земли несколько восстановился. В северном полушарии его параметры вернулись к уровню 1970-х гг., то есть того времени, когда озоновый слой считался невозмущенным. Так, практически исчезли хорошо известные озоновые дыры над Восточной Сибирью. Перестала расти и знаменитая Антарктическая озоновая дыра. Вместе с тем, в 2010-2012 гг. уровень стратосферного озона над Арктикой претерпевал значительные колебания (NASA). Такое быстрое восстановление озонового слоя может происходить даже при максимальных концентрациях в атмосфере хлорфторуглеродов. Кроме того, озоновая дыра в Антарктике ведет себя год от года достаточно стабильно, тогда как в Арктике наблюдаются значительные содержания озона. Полученные результаты ставят под сомнение чисто химическую теорию разрушения озона, где главный виновник – фреоны.

Напротив, анализ поведения во времени общего содержания озона указывает на то, что пространственное расположение крупных озоновых аномалий подчиняется определенным закономерностям. Например, с большой вероятностью озоновой дыре в Северном полушарии соответствует зона с повышенным содержанием озона в южном. А аномалии в высоких широтах ( $60^{\circ}$ – $80^{\circ}$ ), как правило, наблюдаются спустя месяц-два после аномалий в средних широтах ( $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ). Эти факты свидетельствуют в пользу того, что появление и исчезновение озоновых дыр объясняется динамикой самого озонового слоя и изменениями климата. Однако в полной степени исследовать долговременную цикличность этого процесса пока сложно, поскольку серьезно наблюдать за озоновым слоем начали не так давно – менее 50 лет назад. Тем не менее уже обнаружена связь изменений в озоновом слое с двухлетним (с периодом около 28 месяцев) и одиннадцатилетним циклами солнечной активности, а также с так называемыми Североатлантическим и Южным (связанным с явлением Эль-Ниньо) колебаниями.

Следует отметить, что некоторое восстановление в последние годы озонового слоя нельзя объяснить мерами, принятыми мировым сообществом для снижения выбросов в атмосферу, поскольку это восстановление происходит в условиях максимально повышенных концентраций хлорфторуглеродов в атмосфере. По сути, несмотря на все предпринятые человечеством усилия, содержание этих, считающихся «озоноопасными» веществ еще не начало возвращаться к доиндустриальному уровню. Это говорит о том, что мы пока еще очень мало знаем о природе озонового слоя и причинах его изменений и не можем делать точных прогнозов о состоянии озонового слоя даже в ближайшем будущем. Ясно одно – необходимо развивать и совершенствовать систему наблюдений за этим жизненно важным щитом Земли.

Многолетние наблюдения за общим содержанием озона (ОСО) в стратосфере показывают, что оно испытывает значительные как пространственные, так и временные вариации и, в среднем, имеет выраженную зависимость от широты и сезона.

Измерения ОСО в атмосфере проводятся с 1920-х годов. С тех пор методы измерений эволюционировали от наземных до бортовых (аэростатов, самолетов, ракет) и спутниковых. Достижения в развитии приборного оснащения позволили расширить измерения озона от столба атмосферы над наземной станцией до ежедневного глобального охвата озоносферы Земли (рис. 1.23).

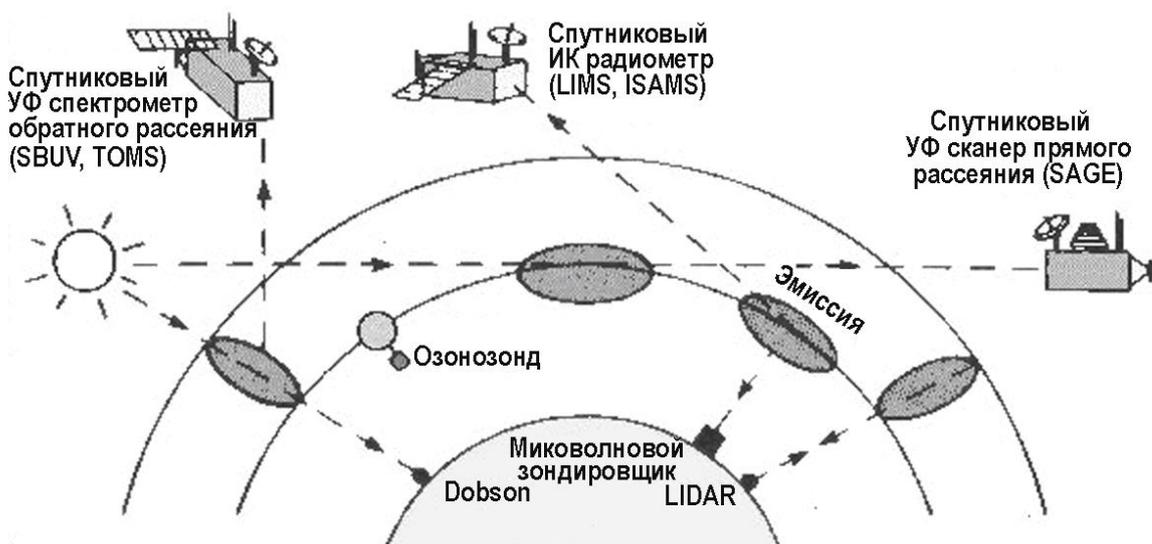


Рис. 1.23. Приборы и методы измерения атмосферного озона (2010)

В настоящее время основу мировой наземной сети измерения ОСО составляют станции, оснащенные озонными спектрофотометрами Добсона, автоматизированными спектрофотометрами Брюера и фильтровыми озонметрами М-124. Эта сеть является составной частью Глобальной службы атмосферы ВМО. Результаты измерений поступают в международный центр данных об озоне и ультрафиолетовой радиации в Канаде (*WMO WOUDC* □ *World Meteorological Organization World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre, Toronto, Canada*).

Для анализа пространственно-временных вариаций озонного слоя также широко используются регулярные спутниковые измерения ОСО. С этой целью с 1978 года запускаются искусственные спутники Земли с аппаратурой *TOMS* (*Total Ozone Mapping Spectrometer*), основной задачей которых является проведение регулярных измерений ОСО и формирование баз данных. С 2005 года по настоящее время *TOMS*-программу продолжает находящийся на орбите (ИСЗ *Aura*) более совершенный спектрометр *OMI* (*Ozone Meter Instrument*).

Всемирный банк данных по наблюдениям общего содержания озона *TOMS* охватывает всю поверхность Земли (от 90°с.ш. до 90°ю.ш. и от 180°з.д. до 180°в.д.). Данные представлены среднесуточными значениями ОСО для пространственной сетки с ячейкой широта × долгота = 1° × 1,25° (для *OMI* / *Aura* 1° × 1°). Многочисленные сравнения этих данных с результатами измерений наземными приборами показали, что информация носит доверительный характер и может быть использована для анализа.

Мониторинг состояния озонового слоя над Россией обеспечивается измерениями ОСО на 30 станциях Росгидромета, 16 российских станций расположены в широтной зоне 60-85°с.ш., что весьма повыша-

ет ценность полученной на них информации. В зоне ответственности Северного УГМС работают 3 станции: Архангельск, Диксон, Печора. Наблюдения на них проводятся под методическим руководством ГГО с помощью фильтровых озонметров М-124 более 30 лет.

EP/TOMS Total Ozone Sep 6, 2004

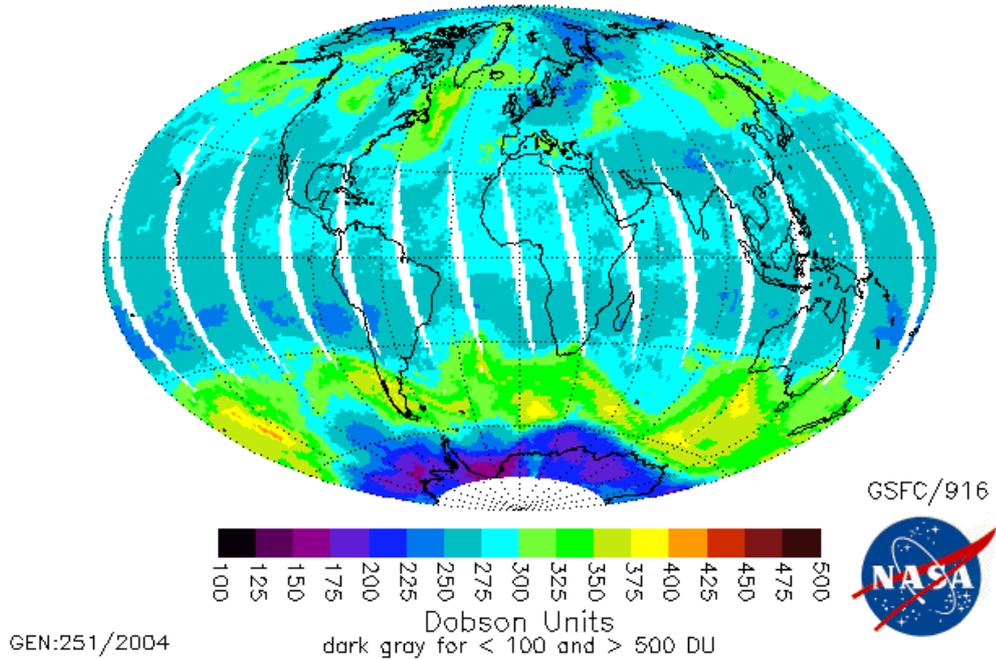


Рис.1.24. Карта озона по данным TOMS

**Total Ozone Mapping Spectrometer**

Ozone Processing Team - NASA/GSFC Code 613.3

**Earth Probe TOMS Data & Images**

Earth Probe TOMS, along with the Ozone Monitoring Instrument (OMI) onboard AURA, are currently the only NASA spacecraft on orbit specializing in ozone retrieval. The EP TOMS instrument, which was launched on July 2, 1996, is currently experiencing calibration problems. Go to the [News Section](#) for more details. Data from OMI are now available.

Check out our [Data Quality Assessment](#). Select Day, Month and Year of interest. Choose a product type, then click **Request**. ([Data Formatting](#)). [What is a Dobson Unit?](#)

**Output Type:**  
Global Ozone - TIFF (1280 X 960)

**For Date:** Jan 1 2004

**Data Coverage:** 7/22/1996 - 12/14/2005  
(Not all dates within this period are available.)

**Other Earth Probe Data**

- Monthly Averages Data & Images
- Zonal Means
- Ozone Over Selected Locations

Find out more about the [Earth Probe TOMS instrument and satellite](#)

Рис. 1.25. Страницка TOMS в Интернете

## Вопросы к главе 1

1. Вывести формулу теплового баланса Земли, используя различные исходные данные.
2. Определить температуры тел Солнечной системы на основании уравнения теплового баланса. Соответствуют ли эти температуры реальным?
3. Определить параметры движения заряженной частицы в магнитосфере Земли.
4. Вывести формулы, определяющие адиабатические инварианты магнитосферы.
5. Проиллюстрировать вывод формулы Паркера для связи скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца законами механики, газового состояния и течения жидкостей.
6. Оцените давление солнечного ветра в районе земной орбиты.
7. Какова роль геомагнитного поля в эволюции биосферы?
8. Нарисовать и объясните схему магнитного поля Земли.
9. Объясните схему образования магнитосферы Земли и планет.
10. Каков механизм поглощения УФ-излучения Солнца в земной атмосфере?
11. Существует ли озоновый слой на планетах Солнечной системы?
12. Какие функции выполняют озоновый слой и магнитосфера для биосферы Земли?

## Глава 2

### Космические воздействия на геоэкосистемы

#### 2.1. Корпускулярное воздействие Солнца

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

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

В табл. 2.1 (Бруцек, Дюран, 1980) приведены параметры солнечного ветра, каким он является на границе ОКП. Средняя плотность числа частиц в солнечном ветре  $n=10 \text{ см}^{-3}$ . Состав солнечного ветра определяется, в основном, протонами и электронами. Однако, кроме них, здесь присутствуют ядра  $He^3$ ,  $He^4$ ,  $O$ ,  $Ne$ ,  $Si$ ,  $Ar$ ,  $Fe$ .

Таблица 2.1.

Параметры солнечного ветра в окрестностях Земли

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

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

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

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

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

Развитие конвективной турбулентности в верхних слоях Солнца сопровождается генерацией интенсивных магнитозвуковых волн. Распространяясь в атмосфере Солнца, где плотность плазмы быстро уменьшается с высотой, звуковые волны трансформируются в ударные. Они эффективно поглощаются веществом, в результате чего температура последнего увеличивается до  $1-3 \cdot 10^6$  в солнечной короне. При этом значительная часть протонов в короне не может удерживаться гравитационным полем Солнца. Это приводит к непрерывному расширению короны в окружающее пространство, то есть к генерации солнечного ветра. Уравнение, связывающее изменение скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца, полученное Паркером из уравнений движения, газового состояния и Бернулли, имеет вид

$$0,5 * v^2 - \frac{G}{r} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} * \frac{M p_0}{\rho_0} * \frac{v_0 A_0}{v} = 0,5 * v_0^2 - \frac{G}{r_0} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} * \frac{M p_0}{\rho_0}, \quad (2.1)$$

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

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

Волны в плазме с магнитным полем.

Во всякой упругой среде возможно распространение волн. В воздухе - это звуковые волны. Они являются продольными, т.е. частицы газа колеблются вдоль направления, по которому распространяется волна. В плазме с магнитным полем может распространяться не один тип волн, как в воздухе, а несколько типов. Один из них, называемый альвеновскими волнами, похож на волну, которая распространяется вдоль натянутого резинового шнура, если потряхнуть его конец. Роль такого упругого шнура играют силовые линии. Смещенные вместе с газом в поперечном направлении, они благодаря натяжению начинают колебаться. Возникают поперечные к направлению магнитного поля колебания газа. Эти колебания распростра-

няются вдоль силовых линий со скоростью  $v_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ , называемой альвеновской скоростью. В альвеновской волне плотность газа  $\rho$  не меняется, весь слой колеблется поперёк поля как целое.

Кроме волн Альвена, возможны еще два типа волн, которые называются магнитозвуковыми. Их возникновение обусловлено, с одной стороны, натяжением и давлением силовых линий, с другой - давлением газа, как у звуковых волн. Эти волны не являются ни чисто продольными, ни чисто поперечными. В отличие от волн Альвена, где энергия распространяется вдоль силовых линий, в магнитозвуковых волнах энергия может распространяться практически в любом направлении по отношению к силовым линиям.

Таблица 2.2.

Потоки и плотности энергии в спокойном солнечном ветре

Плотность потока кинетической энергии	0,22 эрг/см <sup>2</sup> *с
Плотность электронного потока тепла	~ 0,01 эрг/см <sup>2</sup> *с
Плотность протонного потока тепла	~ 10 <sup>-5</sup> эрг/см <sup>2</sup> *с
Плотность кинетической энергии	7*10 <sup>-9</sup> эрг/см <sup>3</sup>
Плотность тепловой энергии протонов	6*10 <sup>-11</sup> эрг/см <sup>3</sup>
Плотность тепловой энергии электронов	1,5*10 <sup>-10</sup> эрг/см <sup>3</sup>
Плотность энергии магнитного поля	10 <sup>-10</sup> эрг/см <sup>3</sup>

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

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

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

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

*Рекуррентные потоки* высокоскоростного солнечного ветра появляются в ОКП с периодом, равным периоду осевого вращения Солнца (27 суток). Эти потоки зарождаются на Солнце в области корональных дыр – обширных областях пониженной интенсивности излучения с

температурой около  $8 \cdot 10^5 \text{K}$  и плотностью 0,25 плотности спокойной короны.

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

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

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

Солнечный ветер простирается до расстояний порядка 100 астрономических единиц, где давление межзвездной среды уравнивает его динамическое давление. В результате образуется своеобразная полость, называемая гелиосферой (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Гелиосфера

На 26.08.2013 г. КА Вояджер находится на расстоянии в 125,241 а. е. (18,735 млрд. км) от Солнца и 0,00197 светового года. Он является самым дальним от Земли и самым быстро движущимся объектом, созданным человеком. На 30.08.2013 г. КА Вояджер-2 находится на расстоянии в 102,600 а. е. (15,348 млрд. км) от Солнца

Солнечный ветер вместе с замороженным в него магнитным полем препятствует проникновению в Солнечную систему галактических космических лучей малых энергий и приводит к вариациям космических лучей высоких энергий.

Сейчас считаются установленными основные типы энергетических потоков (частиц и излучения) от Солнца, воздействие которых приводит к тому или иному характеру возмущенности в околоземной среде (магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли): а) потоки сравнительно плотной ( $n \sim 1 \div 70 \text{ см}^{-3}$  на орбите Земли) квазинейтральной и низкоэнергичной ( $E < 10 \text{ кэВ}$ ) плазмы солнечного ветра, вызывающие магнитосферные и ионосферные бури с длительностью от 1 сут и более; б) потоки энергичных ( $E \sim 10 \div 100 \text{ МэВ}$ ) «вспышечных» протонов малой плотности ( $n \sim 10^{-10} \div 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ ) длительностью порядка нескольких часов, вызывающие явление «поглощения в полярной шапке»; в) всплески потоков ультрафиолетового излучения от солнечных вспышек, вызывающие изменения концентрации в различных областях ионосферы, с характерным временем порядка 1 час; г) всплески потоков мягкого и жесткого рентгеновского излучения от вспышек, вызывающие внезапные ионосферные возмущения в  $D$ -области ионосферы, характерное время - несколько минут (Ковалевский, 1976; Еселевич, 2005).

Наиболее сильную глобальную перестройку магнитосферы и ионосферы вызывают потоки СВ типа (а), состоящие из двух больших классов: квазистационарные потоки СВ, время жизни источников которых более суток, и спорадические потоки СВ, источники которых характеризуются величиной менее суток. В свою очередь квазистационарный СВ подразделяется на два типа: быстрый СВ, истекающий из области корональных дыр и достигающий на орбите Земли  $V \sim 400 \div 800 \text{ км/с}$  и медленный СВ, текущий в поясе стримеров или цепочках стримеров, с  $V \sim 250 \div 400 \text{ км/с}$ . Пространственное распределение квазистационарных потоков СВ в гелиосфере показано на рис. 2.2 (Еселевич, 2005). Основными источниками спорадического СВ являются выбросы корональной массы включающие в себя эруптивное волокно и возможно, вспышки.



Рис. 2.2. Вид Солнца и гелиосферы от Земли

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

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

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

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

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

Здесь можно привести пример торможения искусственных космических объектов и космической пыли верхней атмосферой и ионосферой. Их орбиты испытывают сложный комплекс вариаций, связанных, главным образом, с солнечной и геомагнитной активностью. Важнейшими из них являются вариации, обусловленные 11- и 22-летним циклом солнечной активности. Плотность плазмы и нейтрального газа на высоте нескольких сотен километров в периоды максимума солнечной активности увеличивается в десятки раз по сравнению с минимумом: в 1958 г. плотность атмосферы на высоте 500 км была в 50 раз выше, чем в эпоху минимума 1964-65 гг. (Касименко, Рыхлова, 1995). Кроме того, заметными вариациями являются полугодовая (минимум в январе, максимум в июле), суточная, геомагнитная (связанная с геомагнитными бурями). Среднее значение изменений плотности нижней атмосферы в этих вариациях приведено в табл. 3.3 (Касименко, Шематович, 1990).

Таблица 2.3

Относительное изменение плотности плазмы в ОКП, связанные с солнечной и геомагнитной активностью

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

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

Понятно, что наиболее заметным фактором воздействия на ОКП и биосферу являются **солнечные вспышки**, сопровождающиеся испусканием большого количества заряженных частиц. Самые энергичные из солнечных космических лучей достигают околоземного пространства через ~10 мин. после максимума вспышки.

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

- дополнительная ионизация ионосферы, увеличение плотности и температуры нейтрального газа и плазмы;
- внезапное прекращение радиосвязи на частотах 5-20 МГц (15-60 м) через дневную половину земного шара (эффект Мегеля-Деллинджера);
- полное прекращение отражений от ионосферных слоев и усиление поглощения радиоизлучения космических источников на волнах 10-15 м;
- внезапное усиление атмосферных помех или сигналов от очень удаленных станций на очень длинных волнах (>10 км);
- понижение высоты ионосферного слоя *D*;
- магнитные бури, наступающие обычно не позднее двух суток после хромосферной вспышки, но чаще всего через 17-21 час;
- усиление потока мягкой составляющей космических лучей на поверхности Земли с небольшим запозданием против начала вспышки;
- эффект Форбуша – значительное ослабление на 5-10 суток интенсивности космических лучей после начала магнитной бури;
- полярные сияния, обычно совпадающие по времени с магнитными бурями, и другие ионосферные возмущения;
- нарушения озонового слоя.

Протоны и  $\alpha$ -частицы, ускоренные до десятков и сотен Мэв, являются главным источником радиационной опасности во внешней магнитосфере. Они также вызывают и кратковременные ухудшения радиационной обстановки во внутренней магнитосфере, в том числе и на высотах, используемых для пилотируемых полетов. Наиболее глубоко в магнитосферу энергичные частицы проникают в *полярных каспах*. В приэкваториальных районах действие лоренцевой силы со стороны геомагнитного поля изменяет траекторию движения частиц на спиральную и уводит их в сторону. Поэтому трассы полетов КА, проходящие в высоких широтах, значительно более опасны с точки зрения риска радиационного поражения, чем низкоширотные. Это касается и авиации. На высотах 9-11 километров годовая доза, обусловленная общим фоном космической радиации, получаемая экипажами, оборудованием и часто летающими пассажирами, должна контролироваться по правилам, установленным для радиационно опасных видов деятельности. Лайнеры «Конкорд», поднимавшиеся на еще большие высоты, имели на борту счетчики радиации и летели, отклоняясь к югу от кратчайшей северной трассы перелета между Европой и Америкой, если текущий уровень радиации превышал безопасную величину (*Петрукович, Зеленый, 2001*).

Во время геомагнитной бури внезапному изменению подвергается вертикальная составляющая геомагнитного поля. Такое внезапное начало бури означает приход ударной волны из межпланетного пространства к Земле. Далее планета погружается в плазму и магнитное поле за фронтом ударной волны (начальная фаза). Она продолжается от 30 минут до нескольких часов. В этой фазе напряженность геомагнитного поля на низких широтах больше, чем перед внезапным началом бури, а в полярных областях наблюдаются увеличенные и весьма иррегулярные флуктуации. Магнитосфера подвергается воздействию больших флуктуаций плазмы и поля солнечного ветра с характерным временем от нескольких секунд до нескольких часов (*Сюняев, 1986*). На рис. 2.3 показано изменение положения магнитопаузы при воздействии на магнитосферу плазмы солнечной вспышки (*Застенкер, Зеленый, 2003*).

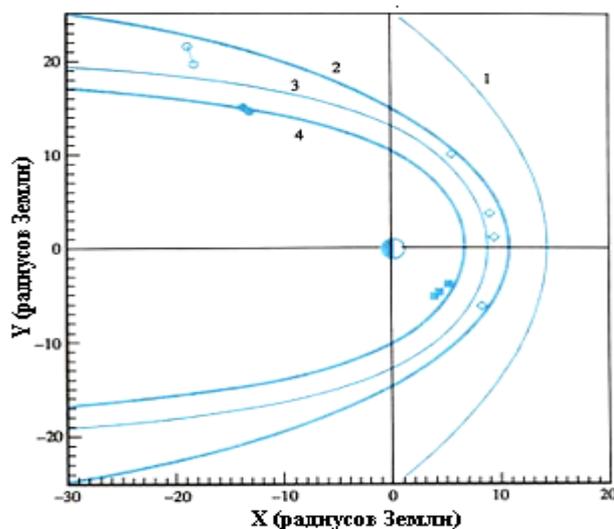


Рис. 2.3. Стандартные и необычные положения магнитопаузы во время сильных возмущений 10-11 января 1997 г.

**1** - среднее (типичное) положение околоземной ударной волны; **2** - среднее (типичное) положение магнитопаузы; **3** - положение магнитопаузы в момент сильного сжатия 10 января по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1 (светлые кружки) и Geotail (светлые ромбики); **4** - положение магнитопаузы в момент сильного сжатия 11 января по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1 (темные кружки) и LANL-084 (темные квадратики). Координата X направлена к Солнцу, координата Y - в перпендикулярном направлении.

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

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

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

В конце XX века появилось мнение, что кроме солнечных вспышек основным источником геоэффективных возмущений солнечного ветра, дающих заметное воздействие на земные процессы - магнитные

бури, нарушения радиосвязи, интенсивные полярные сияния, являются корональные выбросы. Это, в какой-то степени, возврат к модели Чепмена - выбросу сгустков плазмы при возмущениях на Солнце - но уже на фоне постоянно присутствующего солнечного ветра (Застенкер, Зеленый, 2003).

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

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

Плазменные (ленгмюровские) частоты электронов

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{4\pi N} \cdot e}{m_e} \quad (2.2)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi N}{m_i}} \cdot e \quad (2.3)$$

Гиромагнитные частоты электронов

$$\omega_H = \frac{e H_m}{m_e c} \quad (2.4)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \frac{e H_m}{m_i c}, \quad (2.5)$$

где  $m_e$ ,  $m_i$  – массы электрона и иона,  $e$  – заряд электрона,  $N$  – концентрация частиц,  $H_m$  – напряженность геомагнитного поля.

Так как  $m_i \gg m_e$ , то  $\omega_0 \gg \Omega_0$ ,  $\omega_H \gg \Omega_H$ . Например, для электронов  $\frac{\omega_p}{2\pi} = 1.4 M$  Г, а для ионов атомарного кислорода  $\frac{\Omega_H}{2\pi} = 5$  Гц.

Энергичные электроны вблизи ударной волны, движущейся перед корональным выбросом, возбуждают электрические ленгмюровские колебания межпланетной плазмы на ее собственной частоте  $\omega_0$ .

За счет нелинейного взаимодействия плазменные колебания, в свою очередь, генерируют электромагнитные волны на плазменной частоте или на ее второй гармонике. Данные волны свободно распростра-

няются во все стороны и улавливаются широкополосным приемником, установленным на борту космического аппарата, на частоте, определяемой плотностью частиц плазмы в том месте, где они возникли. Когда фронт коронального выброса находится не очень далеко от Солнца, где плотность порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , регистрируется излучение на частоте около 1 МГц, когда фронт пройдет примерно половину пути от Солнца к Земле - на частоте около 100 кГц. При приближении фронта коронального выброса к Земле, где плотность межпланетной плазмы около  $10 \text{ см}^{-3}$ , фиксируется радиоизлучение на частоте около 40 кГц.

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

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

В динамике числа авиационных аварий обнаруживаются регулярности периодического характера и наличие у нее богатой спектральной структуры. Особенно заметно это стало после того, как ведущие авиационные кампании стали публиковать детальную статистику аварийности. Часть компонент спектра имеет, видимо, гелиогеофизическое происхождение. В частности, влияние известного квазидвухлетнего периода на различные земные процессы может быть не меньшим, чем сильных магнитных бурь.

*Частота аварий в дни геомагнитных возмущений и бурь достоверно возрастает.*

Аварии имеют тенденцию группироваться во времени, формируя более благоприятные и неблагоприятные (в смысле безопасности полетов) периоды. Эти результаты открывают путь к прогнозированию периодов повышенной частоты аварийных ситуаций (*Конрадов и др., 2004*).

Плазма наиболее эффективно поглощает радиоволны только вблизи своей резонансной частоты, зависящей от плотности заряженных

частиц и равной для ионосферы примерно 5-10 МГц (эффект Мегеля-Деллинджера). Радиоволны более низкой частоты отражаются от границ ионосферы, а волны более высокой - проходят сквозь нее, причем степень искажения радиосигнала зависит от близости частоты волны к резонансной. Спокойная ионосфера имеет стабильную слоистую структуру, позволяя за счет многократных отражений принимать радиосигнал диапазона коротких волн (с частотой ниже резонансной) по всему земному шару. Радиоволны с частотами выше 10 МГц свободно уходят через ионосферу в открытый космос. Здесь эффект многократного отражения УКВ- и FM-радиостанции доступны только в окрестностях передатчика, а частоты в сотни и МГц используются для космической связи. Во время солнечных вспышек и магнитных бурь количество заряженных частиц в ионосфере увеличивается неравномерно, чем создаются плазменные сгустки и «лишние» слои. Это приводит к генерации собственного широкополосного шумового излучения магнитосферой и ионосферой, а также к непредсказуемому отражению, поглощению, искажению и преломлению радиоволн, что создает значительные затруднения в работе систем наземной и космической связи и навигации. В приполярных районах и зонах аврорального овала ионосфера связана с наиболее динамичными областями магнитосферы и поэтому наиболее чувствительна к приходящим от Солнца возмущениям. Магнитные бури в высоких широтах могут практически полностью блокировать радиоэфир на несколько суток (*Петрукович, Зеленый, 2001*).

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

ным следствием такого явления стала поломка во время одной из магнитных бурь 1997 года американского ИСЗ *TELSTAR*, оставившая значительную часть территории США без пейджерной связи (Петрукович, Зеленый, 2001). Целую серию нарушений в работе бортовых систем (в частности, на научном спутнике *Polar*) или даже выходов из строя (научный спутник *Equator-S* и коммуникационный спутник *Galaxy 4*) вызвал приход к Земле магнитного облака 1 - 4 мая 1998 г. (Застенкер, Зеленый, 2003).

На распределение концентраций электронов и ионов и их температуру оказывают заметное влияние изменения интенсивности солнечного коротковолнового излучения в течение солнечного цикла. С этим связаны изменения температуры и распределение нейтральных компонентов верхней атмосферы и ионосферы. Движения масс воздуха в верхней атмосфере (крупномасштабная циркуляция, крупномасштабные волновые движения, турбулентные процессы перемешивания нейтральных молекул и атомов, ветры, приливные движения) также оказывают влияние на перенос заряженного компонента верхней атмосферы. С динамическими процессами связаны характерные вариации электронной плотности в ионосфере, которые увеличиваются в периоды магнитных бурь.

В результате на низких и средних широтах концентрация ионов в максимуме области *F* изменяется в пределах  $3 \cdot 10^5 \pm 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  в зависимости от различных геофизических условий (широты, местного времени, солнечной и магнитной активности и др.).

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

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

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

Достаточно большую роль в геомагнитных возмущениях играет межпланетное магнитное поле, главным образом, его южный компонент, перпендикулярный плоскости эклиптики. А со сменой знака радиального компонента межпланетного магнитного поля связана асиммет-

рия потоков солнечных космических лучей, вторгающихся в полярные области, изменения направления конвекции магнитосферной плазмы и другие явления.

Далее, при изменении направления межпланетного поля из северного полушария в южное увеличение темпа пересоединения его силовых линий и силовых линий земного магнитного поля на дневной магнитопаузе приводит к быстрому накоплению энергии в магнитосфере. В результате увеличивается хвост магнитосферы. Дальнейшее увеличение энергии магнитосферы приводит к развитию магнитосферной суббури, которая приводит к перестройке конфигурации магнитосферы и диссипации накопленной энергии. В фазе развития суббури в момент взрывного пересоединения линий межпланетного и земного магнитного полей происходит резкая интенсификация полярных сияний и электроджетов в ионосфере. При этом сначала дуги полярных сияний возникают в районе местной полуночи, а затем быстро распространяются к западу и в сторону экватора. Продолжительность полярных сияний практически близка к продолжительности суббури и может составлять время от десятков минут до 2 часов. Они происходят на геомагнитных широтах  $67^{\circ}$ - $70^{\circ}$  – в так называемых зонах полярных сияний, а также распространяются в направлении запад-восток на расстояние до 5 тыс. км в виде дуг. Ширина зон полярных сияний составляет около  $6^{\circ}$ . Максимум появления полярных сияний, соответствующий данному моменту геомагнитного местного времени, происходит в овалах полярных сияний, располагающихся асимметрично вокруг северного и южного магнитных полюсов:  $\sim 23^{\circ}$  от геомагнитного полюса в ночном секторе и  $15^{\circ}$  в дневном секторе. Визуальное полярное сияние содержит зеленую ( $\lambda=557,7$  нм) и красную ( $\lambda=630,0/636,4$  нм) эмиссионные линии атомарного кислорода и молекулярные полосы  $N_2$ , возбуждаемые частицами солнечного и магнитосферного происхождения. Эти эмиссии высвечиваются на высотах от 100 км и более, однако, энергия излучения в инфракрасной и УФ-области спектра превосходит энергию оптического излучения.

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

На высотах порядка 1-3 радиусов Земли сложные плазменные процессы вызывают ускорение частиц плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля до энергий 1-10 кэВ. Источником энергии для таких процессов являются области с быстрыми движениями и турбулентностью магнитосферной плазмы, генерирующие продольный электрический ток, замыкающийся через проводящую ионосферу в овале полярных сияний. Когда продольный ток становится слишком сильным, в

плазме возникают процессы ускорения заряженных частиц вдоль магнитных силовых линий. Ионы из ионосферы при этом ускоряются вверх. Ускорение происходит под действием электрического поля, направленного вдоль магнитного, таким образом, что плазменный слой на высотах в несколько радиусов Земли находится под отрицательным потенциалом относительно ионосферы как в Северном, так и в Южном полушарии (дуги полярных сияний почти симметричны на обоих концах магнитной силовой линии). Пучки заряженных частиц, выбрасываемых с этих высот в магнитосферу, образованы протонами и ионами верхней атмосферы  $O^+$  и  $He^+$ . Часть этих ионов захватывается в пояс кольцевого тока и в итоге может попасть в радиационные пояса, откуда могут в итоге через хвост магнитосферы выбрасываться в межпланетное пространство. Ускоренные к Земле электроны переносят из магнитосферы в ионосферу отрицательный заряд, что соответствует продольному току, направленному вверх, с плотностью в несколько мкА/м<sup>2</sup>. Учтя ширину и длину дуги полярного сияния можно получить общий ток полярной зоны в несколько кА. Рядом с дугой течет примерно такой же продольный ток, но направленный вниз, что соответствует оттоку тепловых ионосферных электронов вверх, в плазменный слой магнитосферы. Из-за мощной ионизации верхней атмосферы пучком электронов в дуге полярного сияния ее проводимость резко возрастает. Плазма в этих слоях ионосферы излучает ввиду этого волны как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне. От возникающих здесь цугов сжатий и разрежений в концентрации электронов ионосферной плазмы на высотах 90-120 км способны отражаться радиоволны метрового диапазона (Сюняев, 1986).

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

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

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

людей. Через полярные сияния и связанные с ними процессы в ОКП космос воздействует на биосферу Земли.

Кроме того, магнитные вариации генерируют вторичные электрические токи в проводящих слоях литосферы Земли, в соленой воде и в оказавшихся поблизости искусственных проводниках. Наводимая разность потенциалов невелика и составляет примерно несколько вольт на километр (максимальное значение было зарегистрировано в 1940 году в Норвегии и составило около 50 В/км), но в протяженных проводниках с низким сопротивлением - линиях связи и электропередач, трубопроводах, рельсах железных дорог - полная сила индуцированных токов может достигать десятков и сотен ампер. Наименее защищены от подобного влияния воздушные низковольтные линии связи, например, телеграфные линии. Заметное воздействие геомагнитная активность оказывает на железнодорожную автоматику в приполярных районах. В трубах нефтепроводов, тянущихся на многие тысячи километров, индуцированные токи могут значительно ускорять процесс коррозии металла. В линиях электропередач, работающих на переменном токе частотой 50-60 Гц, индуцированные токи, меняющиеся с частотой менее 1 Гц, практически вносят только небольшую постоянную добавку к основному сигналу и должны были бы слабо влиять на суммарную мощность. Однако после аварии, произошедшей во время сильнейшей магнитной бури 1989 года в канадской энергетической сети и на трансформаторе АЭС в Нью Джерси выяснилось, что даже небольшая добавка постоянного тока может вывести из строя трансформатор, предназначенный для преобразования переменного тока, в котором постоянная составляющая тока вводит его в неоптимальный режим работы с избыточным магнитным насыщением сердечника. Это приводит к избыточному поглощению энергии, перегреву обмоток и в конце концов к аварии всей системы (Трухин и др., 2005). Последовавший анализ работоспособности всех энергетических установок Северной Америки выявил и статистическую зависимость между количеством сбоев в зонах повышенного риска и уровнем геомагнитной активности (рис. 2.4 - Петрукович, Зеленый, 2001).

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

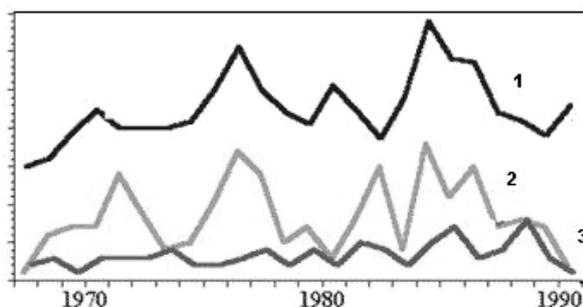


Рис. 2.4. Число аварий в энергосетях США в районах повышенного риска (близких к авроральной зоне) возрастает вслед за уровнем геомагнитной активности. В годы минимума активности вероятности аварий в опасных и безопасных районах практически уравниваются  
(1. уровень геомагнитной активности; 2. число аварий в геомагнитно-опасных районах; 3. число аварий в безопасных районах)

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

Существует мнение (Кокоуров, 2003), что солнечная активность может проявляться даже как геологический фактор. Эти проявления могут объясняться крупными вариациями экзогенных явлений, определяемых, в частности, метеорологическими процессами и палеоклиматическими колебаниями (таяние или образование ледников).

Следует отметить, что идея о прямом влиянии солнечной активности на состояние погоды многими геофизиками отвергается. В данном случае мощность атмосферных процессов на несколько порядков превышает поток энергии, попадающий в ОКП с солнечным ветром. В связи с этим представляется крайне маловероятным, чтобы солнечная активность могла существенно влиять на состояние нижней атмосферы (Пудовкин, 19996).

Здесь, видимо, можно говорить о вторичных (триггерных) механизмах такого влияния.

Во-первых, в ОКП и далее в атмосферу попадают наиболее энергичные протоны, генерируемые во время солнечных вспышек. В то же

время связанные со вспышками магнитные поля экранируют ОКП от галактических космических лучей (Форбуш-эффект). Наложение этих процессов создает сложную и неоднозначную вариацию интенсивности потоков частиц, попадающих в атмосферу Земли.

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

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

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

На рис. 2.5 приведена схема, иллюстрирующая воздействие солнечных космических лучей на состояние климата Земли (Ogurtsov et al., 2002).

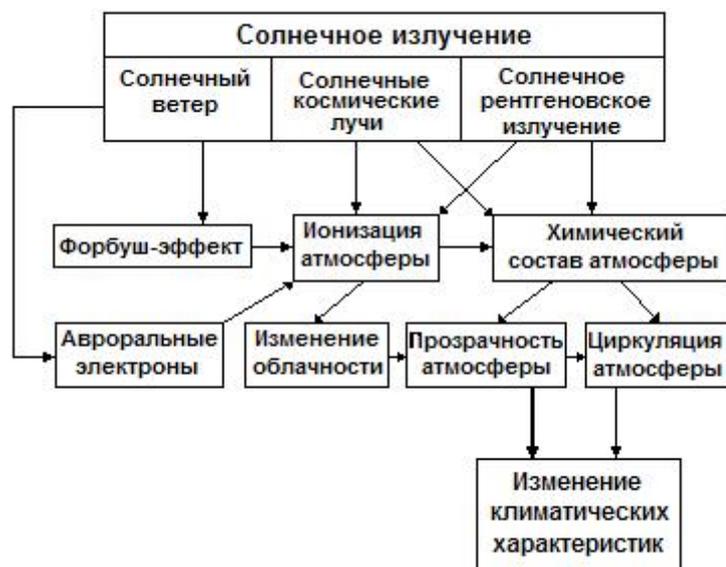


Рис. 2.5. Механизм воздействия солнечного ионизирующего излучения на климат Земли

## 2.2. Космические лучи

Космические лучи - это потоки заряженных частиц высокой энергии, преимущественно протонов, а также электронов, позитронов, атомных ядер высоких энергий, приходящих к Земле приблизительно изотропно со всех направлений космического пространства.

Кроме того, к космическим лучам принято относить и вторичное излучение, возникшее в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли.

Космические лучи напоминают сильно разреженный газ, частицы которого практически не сталкиваются друг с другом, но взаимодействуют с веществом и электромагнитными полями межзвёздного (межгалактического) и межпланетного пространства.

Космические лучи были открыты в 1912 г. австрийским физиком Виктором Францем Гессом с помощью ионизационной камеры на воздушном шаре. В 1921-1925 годах американский физик Роберт Милликен, изучая поглощение космического излучения в атмосфере Земли в зависимости от высоты наблюдения, обнаружил, что в свинце это излучение поглощается так же, как и гамма-излучение ядер. Р. Милликен первым и назвал это излучение космическими лучами.

В 1925 году советские физики Л.В. Мысовский и Л.А. Тувим провели измерение поглощения космического излучения в воде: оказалось, что это излучение поглощалось в десять раз слабее, чем гамма-излучение ядер. Они обнаружили также, что интенсивность излучения зависит от барометрического давления - открыли «барометрический эффект». Опыты Д.В. Скобельцына с камерой Вильсона, помещенной в постоянное магнитное поле, дали возможность «увидеть» за счет ионизации следы (треки) космических частиц. Д.В.Скобельцын открыл ливни космических частиц.

Интенсивность космического излучения в период минимума солнечной активности составляет  $J \sim 0,23 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ .

Энергия космических частиц заключена в широком диапазоне от  $10^9$  до  $10^{20}$  эВ. Самые высокие зарегистрированные значения энергии частиц достигают  $2 \cdot 10^{20} - 10^{21}$  эВ.

Один электронвольт (эВ) равен энергии, необходимой для переноса электрона в электростатическом поле между точками с разностью потенциалов в 1 В. Так как работа при переносе заряда  $q$  равна  $qU$  (где  $U$  — разность потенциалов), а заряд электрона  $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, то  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Дж

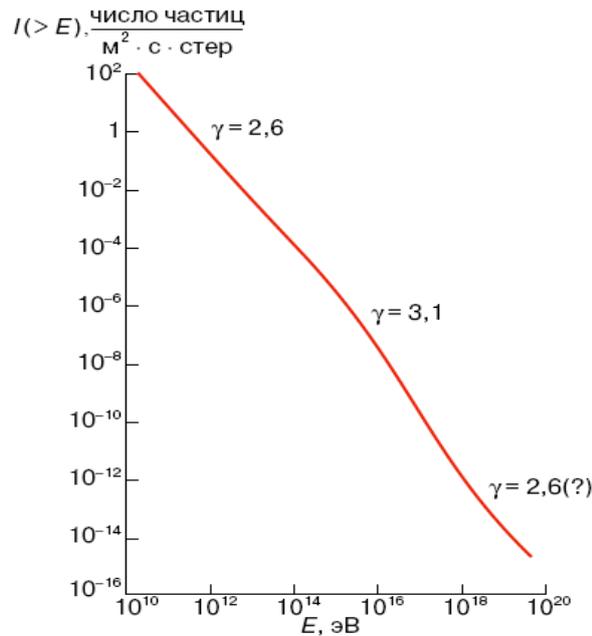


Рис. 2.6. Энергетический спектр космических лучей в интервале  $10^{10} - 10^{20}$  эВ

В космических лучах при исследовании поведения химического состава принято объединять ядра в определенные группы в зависимости от величины заряда  $Z$ . В таблице 1 приведены интенсивности различных групп ядер для энергии свыше 2,5 ТэВ/нуклон. В группу Р входят протоны, дейтоны и ядра трития, а группу  $\alpha$  составляют ядра гелия. Группа L (легкие ядра) объединяет ядра лития (Li), бериллия (Be) и бора (B); группа М (средние ядра) состоит из ядер углерода (С), кислорода (О), азота (N) и фтора (F). Группу тяжелых ядер (Н) образуют ядра с  $Z > 10$  и группу сверхтяжелых – ядра с  $Z > 20$ .

Таблица 2.4

Химический состав первичного космического излучения

Группа ядер	Z	Интенсивность м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> ср <sup>-1</sup>
Р	1	1300±100
$\alpha$	2	94±4
L	3-5	2,0±0,3
М	6-9	6,7±0,3
Н	10	2,0±0,3
VH	20	0,5±0,2

Исследования, проведенные в последние годы на спутниках и на Луне, показали, что химический состав первичного космического излу-

чения очень слабо меняется с энергией: доля ядер группы L и ядер с зарядом  $17 < Z < 25$  уменьшается с ростом энергии (при энергиях порядка нескольких ГэВ / нуклон).

Различают следующие типы космических лучей (рис. 2.7):

1. Галактические космические лучи – космические частицы, приходящие на Землю из нашей галактики. В их состав не входят частицы, генерируемые Солнцем.
2. Солнечные космические лучи – космические частицы, генерируемые Солнцем.

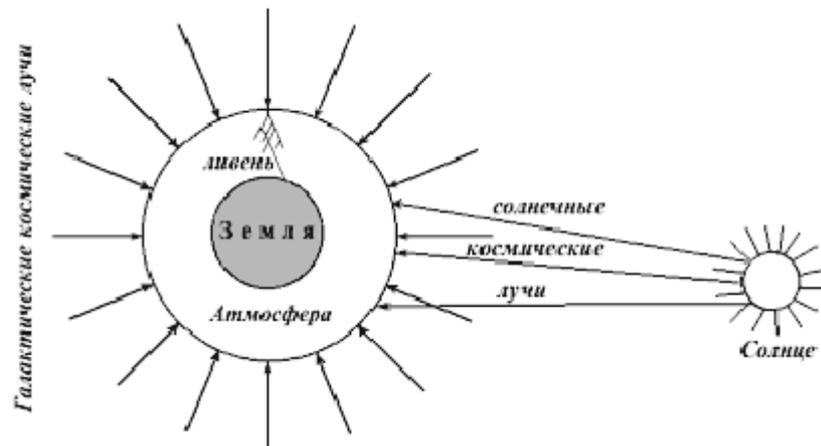


Рис. 2.7. Галактические и солнечные космические лучи

Кроме этих двух основных типов космических лучей рассматривают также *метagalactic космические лучи* – космические частицы, возникшие вне нашей галактики. Их вклад в общий поток космических лучей невелик.

Космические лучи, не искаженные взаимодействием с атмосферой Земли, называют *первичными*. Поток галактических космических лучей, бомбардирующих Землю, примерно изотропен и постоянен во времени и составляет  $\sim 1$  частица/см<sup>2</sup> с (до входа в земную атмосферу). Плотность энергии галактических космических лучей  $\sim 1$  эВ/см<sup>3</sup>, что сравнимо с суммарной энергией электромагнитного излучения звезд, теплового движения межзвездного газа и галактического магнитного поля. Таким образом, космические лучи – важный компонент Галактики.

Распределение первичных космических лучей в общем потоке приведено в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Характеристики первичных космических лучей (галактических и солнечных)		
	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек до $\sim 10^{10} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ядерная компонента - ~95% протонов, ~4-5% ядер гелия, &lt;1% более тяжелых ядер</li> <li>2. Электроны (~1% от числа ядер)</li> <li>3. Позитроны (~10% от числа электронов)</li> <li>4. Антиадроны &lt;1%</li> </ol>	98-99% протоны, ~1.5% ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}$	$10^5 - 10^{11} \text{ эВ}$

Одна из первых гипотез происхождения космических лучей была разработана В.Л. Гинзбургом (1963 г.). Он оценил, какие космические объекты могут обеспечить наблюдаемую мощность космических лучей.

Наша Галактика Млечный Путь – гигантская звёздная система, в которой находится Солнечная система, все видимые невооружённым глазом отдельные звёзды, а также огромное количество звёзд, сливающихся вместе и наблюдаемых в виде Млечного Пути.

Диаметр Галактики - порядка 100 000 световых лет, при средней толщине порядка 1000 световых лет. Галактика содержит, по самой низкой оценке, около 200 миллиардов звёзд. Основная масса звёзд расположена в плоском диске. Масса Галактики оценивается в  $3 \cdot 10^{12}$  масс Солнца или  $6 \cdot 10^{42}$  кг. Большая часть массы Галактики содержится не в звёздах и межзвёздном газе, а в несветящемся гало из тёмной материи.

Солнечная система находится в 26-28 тыс. св. лет от центра Галактики и совершает один оборот вокруг него за 225-250 млн. лет.

Космические лучи заполняют Галактику – окружающую ее сферу радиуса  $R \sim 5 \cdot 10^{22}$  см. Объем  $V$  такой сферы равен  $V_R \sim 5 \cdot 10^{68}$  см<sup>3</sup>. Плотность энергии космических лучей принимается постоянной во времени и равной плотности космических лучей около Земли. Плотность энергии космических лучей составляет  $W_C \sim 10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup>. Тогда полная энергия  $W_{к.л.}$  космических лучей будет

$$W_{к.л.} = W_C \cdot V_R \sim 10^{56} \text{ эрг} \sim 10^{68} \text{ эВ} \quad (2.6)$$

Во время путешествия космических лучей от их источника к Земле они проходят путь  $L \sim 5 \cdot 10^{16}$  г/см<sup>2</sup>. Отсюда можно оценить время  $T$  жизни космических лучей:

$$T = L/\rho c \sim 5/10^{-26} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ с} \sim 1,5 \cdot 10^{16} \text{ с} \sim 5 \cdot 10^8 \text{ лет}, \quad (2.7)$$

где  $\rho \sim 10^{-26}$  г/см<sup>3</sup> - плотность межзвездного вещества,  $c$ - скорость движения частиц принимается равной скорости света. Теперь можно оценить мощность, которой обладают источники космических лучей:

$$P = W_{к.л.} / T \sim 10^{56} \text{ эрг} / 10^{16} \text{ с} = 10^{40} \text{ эрг/с}. \quad (2.8)$$

Какие же из межзвездных объектов могут обеспечить такую мощность? Светимость Солнца составляет  $\sim 10^{33}$  эрг/с. Звезд типа Солнца в Галактике  $\sim 10^{11}$ , следовательно, они могут обеспечить суммарную мощность лишь  $10^{34}$  эрг/с, что много меньше требуемой.

В Галактике есть и более мощные, чем Солнце, звезды, но и их суммарная мощность далека от требуемой.

В.Л. Гинзбург показал, что наиболее возможными источниками космических лучей могут быть вспышки сверхновых звезд. Суммарная энергия космических лучей от сверхновых, по оценке, близка к  $10^{49}$  эрг/с. Частота вспышек сверхновых звезд – два-три раза в столетие. Можно найти среднюю мощность  $P_{с.н.}$  сверхновых:

$$P_{с.н.} = W_{к.л.} / T \sim 10^{40} \text{ эрг/с}. \quad (2.9)$$

Следовательно, вспышки сверхновых звезд могут обеспечить постоянную наблюдаемую интенсивность первичных космических лучей.

Нерешенным остается вопрос о происхождении космических лучей с энергиями, большими  $2 \cdot 10^{15}$  эВ. Энергии взрыва сверхновых в Галактике для их образования для этого недостаточно.

К внегалактическим источникам космических лучей относятся радиогалактики и квазары.

Светимость радиогалактик в радиодиапазоне повышена по сравнению со светимостью обычных галактик. В настоящее время обнаружено более 500 радиогалактик. Они также могут быть источниками космических лучей.

Квазары обладают огромной светимостью и также могут быть источниками космических лучей.

Активные ядра некоторых галактик выделяют энергию до  $10^{48}$  эрг/с в диапазоне от радиоволн до гамма-излучения и также могут быть источниками космических лучей.

Гамма-всплески за короткое время вспышки (0,1 – 100 с) выделяют энергию до  $10^{52}$  эрг. Такой энергии достаточно, чтобы обеспечить плотность космических лучей с энергией более  $10^{19}$  эВ для полного объема Вселенной.

Поток космических лучей, попадающих в околоземное пространство, подвержен значительным вариациям. Амплитуда вариаций первичных космических лучей зависит как от энергии самих частиц, так и от напряженности и направления межпланетного магнитного поля. Эффект Форбуша, представляющий собой кратковременное понижение интенсивности космических лучей (на 50% в межпланетном пространстве и на 20-30% вблизи поверхности Земли), вызывается рассеянием заряженных частиц магнитными полями, выносимыми из атмосферы Солнца высокоскоростными потоками солнечного ветра. Таким образом, этот эффект наблюдается в периоды максимумов солнечной активности и во время солнечных вспышек. Он подтверждается также данными экспериментальной палеоастрофизики: во время маундеровского минимума солнечной активности (1640-1710 гг.), когда пятна на Солнце практически отсутствовали, наблюдалось повышение интенсивности галактического космического излучения – форбуш-эффект. Период колебаний интенсивности космических лучей близок как к 11-летнему периоду числа солнечных пятен, так и к 22-летнему периоду переполюсовки магнитного поля Солнца (рис. 2.8).

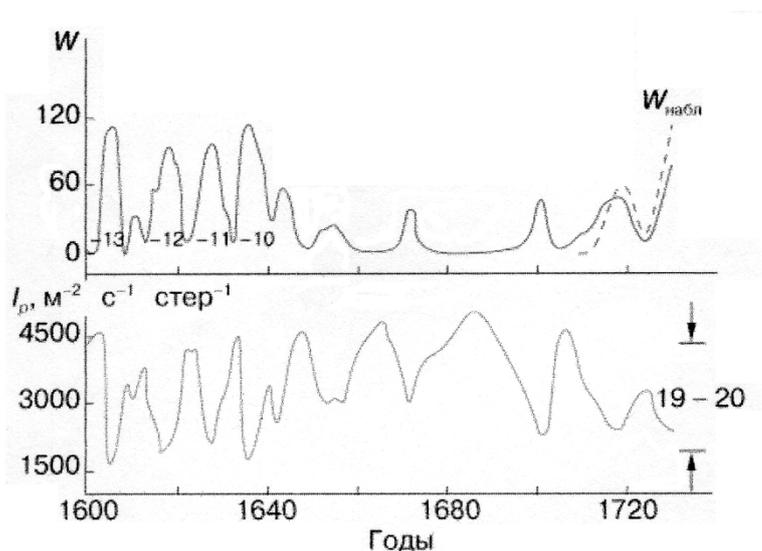


Рис. 2.8. Активность Солнца в числах Вольфа ( $W$ ) и интенсивность галактических космических лучей ( $I_p$ ) в эпоху маундеровского минимума

Попадая в геомагнитное поле, частицы под действием лоренцевой силы отклоняются от практически прямолинейной траектории. На за-

данную широту вблизи Земли с данного направления приходят частицы с энергией, превышающей некоторое пороговое значение (эффект геомагнитного обрезания). Воздействие геомагнитного поля усиливается с уменьшением географической широты. В табл. 2.6 представлены данные по этому эффекту для заряженных частиц различного происхождения (Аллен, 1977).

Таблица 2.6

Магнитная широта обрезания потоков частиц различного происхождения

$lg E$ (эВ)	Геомагнитные частицы			Потоки полярных областей			Космические лучи		
Протоны	85	83	80	77	72	65	54	18	0
Электроны	-	87	86	84					

На широте Москвы критическая энергия составляет  $2 \cdot 10^9$  эВ независимо от знака заряда и направления прихода частиц. На магнитном экваторе ее величина составляет  $15 \cdot 10^9$  для частиц, приходящих в вертикальном направлении. Для частиц, приходящих под большими углами к вертикали, критические энергии оказываются разными в зависимости от знака заряда. То есть, для западных протонов критическая энергия оказывается в 6 раз меньше энергии восточных протонов. Для отрицательных электронов критическая энергия меньше для случая восточного направления прихода.

Таким образом, поскольку основной составляющей космических лучей являются протоны, общий заряд их потока является положительным. С этим связана восточно-западная асимметрия космических лучей: из-за отклонения в геомагнитном поле с запада приходит больше частиц, чем с востока.

Карта энергий обрезания рассчитывается в режиме реального времени в университете Берна (<http://cosray.unibe.ch/>). Полярные регионы - протоны с энергиями ниже 125 МэВ могут проникнуть в атмосферу (20 км над поверхностью Земли). Энергии выше 15 ГэВ требуются для проникновения в экваториальные районы выше южной Азии в Северном полушарии. В целом, поскольку ось геомагнитного поля наклонена по отношению к оси вращения Земли, можно отметить, что чем ближе приближаться к магнитному экватору, тем выше требуется минимальная энергия, необходимая космическим лучам для достижения атмосферы. Энергии обрезания выше в рамках замкнутого контура над территорией Южной Азии, поскольку диполь Земли находится вне центра Земли, ближе к южной Азии, чем этот регион на противоположной стороне Земли над западной частью Атлантического океана.

При прохождении заряженных частиц космических лучей и фотонов высокой энергии через вещество имеют место процессы, обусловленные электромагнитным взаимодействием их с электронами и ядрами атомов среды (*Добротин, 1954*).

Частица или фотон постепенно тормозится за счет потери энергии на отрыв электронов от атомов (ионизация и образование  $\delta$ -электронов) и возбуждение атомов.

Фотон может вырвать электрон из атома, передав ему свою энергию, то есть вызвать фотоэффект.

При взаимодействии фотона и электрона может произойти рассеяние фотона с передачей части его энергии электрону – комптон-эффект.

При взаимодействии с ядром атома заряженная частица может резко затормозиться, испустив при этом квант тормозного излучения.

Фотон высокой энергии в поле ядра атома может образовать электронно-позитронную пару, передав этим частицам свою энергию.

Космическая частица с энергией около  $10^{10}$  эВ за время жизни в Галактике проходит толщину вещества всего  $5 \text{ г/см}^2$ . Толщина атмосферы Земли составляет  $1030 \text{ г/см}^2$ . Поэтому она практически полностью поглощает первичное космическое излучение.

Первичные космические лучи проходят ОКП и верхние слои атмосферы практически без столкновений с атомами и ионами. Для протонов, составляющих большинство в первичных космических лучах, средний пробег без столкновений составляет  $\approx 70 \text{ г/см}^2$  (количество граммов вещества, заключенного в столбе сечением  $1 \text{ см}^2$ ). Для  $\alpha$ -частиц средний пробег  $\approx 25 \text{ г/см}^2$ , для более тяжелых ядер еще меньше (*Сюняев, 1986*). Толща атмосферы, равная среднему пробегу протонов, соответствует высоте над поверхностью Земли 20 км. Поэтому первые столкновения первичных космических лучей с ядрами атмосферных газов происходят на нижней границе ОКП – высотах 20-25 км.

Так как падающие частицы космических лучей сталкиваются с атомами или молекулами воздуха, они производят много вторичных частиц. Если речь идет о тяжелых ионах, то они будут разбиты на более легкие ядра, протоны или нейтроны. Все эти частицы продолжают двигаться вниз и могут вновь взаимодействовать с другими молекулами воздуха, если они имеют достаточно энергии. Это порождает **каскад космических лучей**. Чем глубже частицы проникают в атмосферу, тем больше энергии они теряют. Первичные космические лучи должны иметь минимальную энергию около 450 МэВ для получения значительного числа вторичных частиц, которые смогут достичь уровня моря. Поток вторичных частиц образует конус, ось которого совпадает с направлением движения первичной космической частицы. Пересечение

конуса с поверхностью Земли может покрывать десятки квадратных километров. Такие потоки называют широкими атмосферными ливнями (ШАЛ).

Протоны космических лучей разрушают атомы азота и кислорода и порождают каскад вторичных частиц (рис. 2.9), поток которых условно разделяют на три компонента: электронно-фотонный (1), мюезонный (2) и нуклонный (3).

Именно ионизация атмосферы вторичным излучением регистрируется наземными приборами.

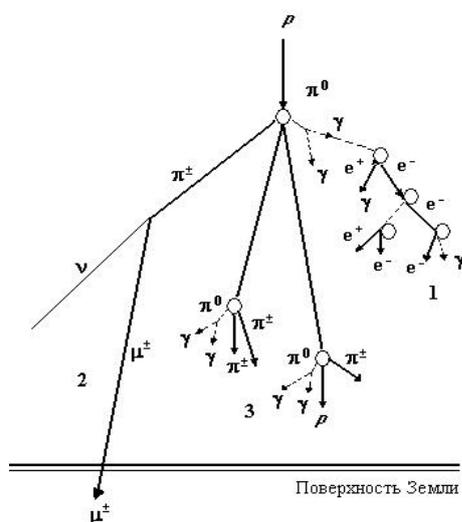


Рис. 2.9. Взаимодействие космических лучей с атмосферой Земли на нижней границе ОКП ( $\gamma$  - ядра атомов атмосферы)

Фотоны и электроны принято называть мягкой компонентой космических лучей, так как они легко поглощаются плотным веществом. Мюоны с энергией больше 10 ГэВ способны преодолевать толстые слои вещества и называются жесткой компонентой космических лучей.

Численный состав частиц в ШАЛ на первых этапах растет в приближении к Земле, затем начинает уменьшаться. Протон с энергией  $10^{15}$  эВ порождает в максимуме ливня  $10^6 - 10^9$  частиц. До уровня моря могут доходить только тысячи вторичных частиц: мюоны, фотоны и электроны. Ядерная компонента на уровне моря мала.

Космические лучи оказывают значительное влияние на процессы ионизации составляющих ионосферы и атмосферы и обеспечивают электризацию нижних слоев атмосферы. Баланс образующихся при этом ионов описывается линейным уравнением

$$q = b * n \quad (2.10)$$

где  $q$  - скорость образования ионов,  $n$  - их концентрация,  $b$  - коэффициент линейной рекомбинации ионов в атмосфере

Установление правильного вида уравнения, описывающего баланс ионов в атмосфере, крайне важно для расчетов климатических моделей Земли. Учет этого влияния весьма важен при проведении расчетов климатических моделей Земли.

### ***КЛ и грозное электричество***

Ионы, образованные космическими лучами, обеспечивают проводимость атмосферы. Ток, текущий в атмосфере, является одним из основных элементов глобальной электрической цепи, которая поддерживает постоянным отрицательный заряд Земли  $6 \cdot 10^5$  К. Генератором электрических зарядов в атмосфере являются разряды грозных облаков. Грозные облака образуются на атмосферных фронтах, где происходит образование и разделение облачных зарядов. Источником зарядов грозных облаков являются положительные и отрицательные ионы, образующиеся в нижней атмосфере под действием космических излучений и естественной радиоактивности Земли. Эти ионы прилипают к аэрозольным частицам, концентрация которых велика в нижней атмосфере (более  $10^4$  см<sup>-3</sup>). На заряженных аэрозольных частицах, постепенно по мере их подъема вверх восходящими потоками воздуха, вырастают водяные капли. Разделение отрицательных и положительных зарядов происходит на них вследствие того, что рост капель воды на отрицательно заряженных центрах конденсации идет в  $\sim 10^5$  раз быстрее, чем на положительных. В результате этого процесса нижняя часть облака заряжается отрицательно, а верхняя положительно. Молниевые разряды возникают тогда, когда через облако проходит широкий атмосферный ливень - до  $10^6$  заряженных частиц, образованных высокоэнергичной космической частицей. По ионизованным трекам частиц широкого атмосферного ливня и происходят молниевые разряды. На рис. 2.10 (Стойков, 2004) показаны стадии зарождения (а), зрелости (б) и распада (в) грозного облака: 1 – область теплого фронта; 2 – область холодного фронта; 3 – восходящие потоки влажного ионизованного воздуха; 4 и 5 – области максимумов частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ), рождаемых космическими частицами с энергиями  $\epsilon \geq 10^{14}$  эВ и  $\epsilon \geq 10^{15}$  эВ, соответственно; 6 – внутриоблачный молниевый разряд; 7, 8 – нисходящая и восходящая молнии;  $J$  – ток отрицательных ионов, текущий из ионосферы к вершине облака; 9 – экранирующий слой отрицательных ионов; 10 – положительный заряд у основания облака.

Таким образом, космические лучи являются необходимой составной частью процесса образования грозного электричества и молниевых разрядов (Трухин и др., 2005).

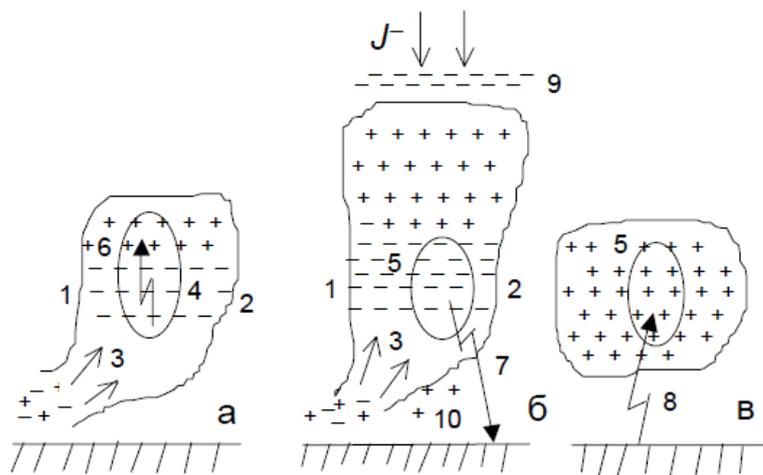


Рис. 2.10. Эволюция грозового облака

Кроме того, имеются данные о том, что в период Форбуш-эффекта, в годы высокой солнечной активности, когда уровень галактических космических лучей понижается, уменьшается количество осадков, площадь облаков над планетой и, соответственно, альбеда – рис. 2.11 (Крымский, 2005).

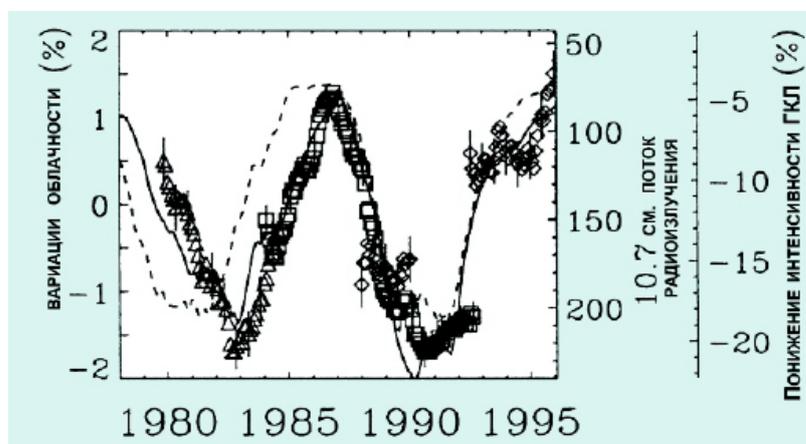


Рис. 2.11. Космические лучи и облачность (пунктир – солнечное радиоизлучение на волне 10,7 см; сплошная линия - интенсивность космических лучей; значки – облачность по спутниковым наблюдениям)

На рис. 2.11 видно, что вариации облачности происходят синхронно с изменениями интенсивности космических лучей и отстают от вариаций солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см (которое связано с солнечной активностью). То есть, космические лучи принимают участие в механизме облакообразования – важном компоненте климатической системы.

Кроме того, прослеживается влияние космических лучей на зональную циркуляцию воздуха. В период Форбуш-понижений интенсивности космических лучей, например, после солнечной протонной вспышки, вдоль параллелей с запада на восток распространяются возмущения приземного давления атмосферы. В периоды повышения интенсивности космических лучей возмущения атмосферного давления распространяются в меридиональном направлении. Таким образом, происходит как зональное, так и меридиональное перемещение масс воздуха, что также оказывает влияние на динамику климата (Пудовкин, 2001).

С другой стороны, вторжение протонов в ОКП вызывает заметное снижение содержания озона на его нижней границе и увеличение концентрации  $NO_2$ . Поглощение солнечной радиации двуокисью азота вызывает резкое потепление в нижней части ОКП и, соответственно, похолодание в тропосфере. Согласно подобной модели (Пудовкин, 1996) интенсивные потоки космических лучей в моменты солнечных протонных событий или сильных геомагнитных возмущений могут вызвать заметное похолодание на Земле, подобное явлению «ядерной зимы».

Это подтверждается исследованиями воздействия частиц солнечного ветра на климатические характеристики планеты.

Кроме того, наблюдается эффект, связанный с вековым уменьшением интенсивности галактических космических лучей.

Существует ряд предположений, что вековое уменьшение потока космических лучей, связанное с взрывом близкой Сверхновой, может быть одним из механизмов, вызывающих глобальное потепление на Земле (Кочаров, 1996, 2001; Стожков, 2001; Шкловский, 1984).

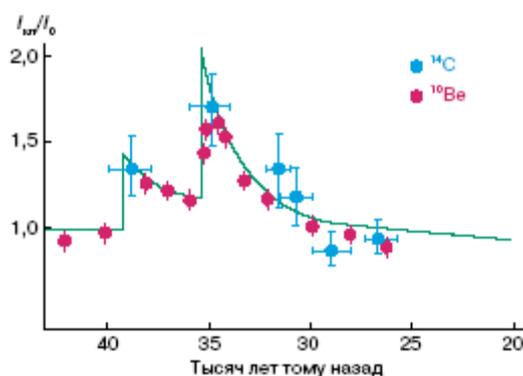


Рис. 2.12. Космогенный след взрыва Сверхновой звезды в атмосферном радиоуглероде  $^{10}\text{Be}$ .  $I_{\text{кЛ}}/I_0$  – относительная интенсивность КЛ

В 2006 г. учёные из Национального космического центра Дании предложили теорию, в соответствии с которой 2,4 миллиарда лет назад бурные всплески и угасания жизни на Земле были связаны с началом активного

звёздообразования в Млечном пути. Причиной служили взрывы звёзд, производившие космические лучи, которые при попадании на Землю вызывали изменения климата.

Такие выводы были сделаны после подсчета количества изотопа углерода  $^{13}\text{C}$  в осадочных породах на поверхности нашей планеты. Наличие в воде бактерий и водорослей увеличивает содержание изотопа  $^{13}\text{C}$ . Многие морские организмы используют  $^{13}\text{C}$  для постройки раковин. Соответственно, большая концентрация в породе углерода-13 будет означать присутствие большого количества живых организмов. В результате анализа собранных данных учёные установили большие колебания в продуктивности организмов и связали их с звёздообразованием в то время.

Попадание частицы с высокой энергией в атмосферу Земли приводит к образованию электронов, ускоряющих процесс образования скоплений молекул воды и серной кислоты, которые приводят к формированию облаков. Уплотнение облачного покрова Земли приводило к остыванию планеты из-за большего количества отражённой солнечной радиации и, тем самым, к угасанию жизни. Наблюдавшиеся же в ледниковые эпохи пики биологической продуктивности учёные связывают с перемешиванием океанов сильными ветрами, приводившим к насыщению поверхностных вод питательными веществами.

Руководитель исследования Хенрик Свенсмарк отмечает, что вероятность случайного совпадения в изменениях состояния биосферы планеты и космическими лучами равняется приблизительно одной десяти тысячной. По его мнению, установленные факты открывают новые перспективы на привязку эволюции Млечного пути к эволюции жизни на Земле в последние четыре миллиарда лет.

Проблема заметного изменения климата в последние сотни лет поднимает возможность взаимодействия между климатом и геомагнитной полем на масштабах времени от десятилетий до сотен и более лет.

Магнитное поле Земли изменяется очень динамично. Анализ связи между изменениями магнитного момента Земли в течение последних ~10 тыс. лет и косвенными данными по выпадению осадков на низких широтах, показывает, что изменения во времени геомагнитного дипольного момента может играть важную роль в контроле выпадения осадков в низких широтах в некоторых регионах земного шара.

В целом, эти результаты свидетельствуют в пользу выдвинутой Свенсмарком гипотезы о сильном влиянии ГКЛ, проникающих в атмосферу, на климат Земли. Таким образом, геомагнитное поле через эти процессы в земной атмосфере могло оказывать влияние на изменение климата Земли в прошлом (*Дергачев и др., 2010*).

### **2.3. Гравитационные воздействия на геосистемы**

Гравитационное поле Земли - по сути космический и постоянно действующий фактор для всех процессов, происходящих на ней. Оно определяет распределение вещества Земли: более тяжелое опускается вниз, а легкое поднимается вверх; вода течет вниз по уклону; происходит выветривание горных массивов и накопление осадков. В результате гравитационного притяжения Земли при подъеме тела на высоту будет

увеличиваться его потенциальная энергия. Природная тенденция состоит в уменьшении этой потенциальной энергии до минимума. Поэтому более плотное вещество стремится оказаться внизу. Движение атмосферы и океана контролируется силой градиента давления и эффектом вращения Земли. Различия в давлении в свою очередь определяются изменениями плотности воздуха и морской воды. На гидроэлектростанциях при выработке электрического тока используется часть потенциальной энергии, заключенной в падающей воде.

### 2.3.1. Движение планет. Законы Кеплера

Солнечная система - гигантский механизм, в котором движением управляет сила гравитации. Под влиянием гравитации происходит движение Земли по орбите и ее вращение вокруг своей оси. От этого зависят земной год, времена года, смена дня и ночи и их длительность. Этим обуславливаются не только основные ритмы на планете, но и ее термодинамика. Из закона тяготения Ньютона вытекает форма Земли - геоид, сплюснутый у полюсов.

Движение всех тел в Солнечной системе подчиняется законам движения планет Кеплера. В современной интерпретации их можно записать в следующем виде (Кононович, 2001).

I-й закон: под действием сил тяготения одно небесное тело движется относительно другого по одному из конических сечений, гиперболе, параболе или эллипсу (в предельном случае – по прямой или окружности). В случае Солнечной системы Солнце находится в одном из фокусов орбиты небесного тела.

В полярных координатах радиус-вектор планеты определяется из общего уравнения конических сечений с полюсом в фокусе кривой

$$r = \frac{p}{(1 + e \cos \varphi)}, \quad (2.11)$$

где  $p = \frac{C}{GM}$  - так называемый параметр,  $e$  – эксцентриситет кривой второго порядка,  $C$  – секторная скорость планеты (модуль вектора ее момента скорости),  $M$  – в нашем случае масса Солнца,  $G$  – постоянная тяготения.

Для эллиптической орбиты при  $0 < e < 1$

$$r = \frac{p}{(1 - e \cos \varphi)}. \quad (2.12)$$

Если  $e=1$ , ветви кривой уходят в бесконечность при  $\varphi=\pi$  (или  $\varphi=0$  для уравнения вида 2.2). При  $e>1$  существуют две асимптоты при  $\cos\varphi=-1/e$  (гипербола). При  $e=0$  орбита - окружность.

В этой формулировке первый закон Кеплера справедлив не только для планеты или астероида, обращающихся по эллипсу вокруг Солнца, но и для любой кометы с параболической или гиперболической орбитой.

II-й закон: радиус-вектор, характеризующий положение движущегося тела относительно неподвижного центрального в задаче двух тел, всегда лежит в неизменной плоскости орбиты и за равные промежутки времени описывает площади равной величины.

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{C}{r^2}. \quad (2.13)$$

III-й закон: отношение квадрата сидерического периода обращения планеты к кубу средней полуоси ее эллиптической орбиты есть величина, определяемая только массой Солнца.

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}. \quad (2.14)$$

### 2.3.2. Приливы и отливы

Так как размеры Земли не бесконечно малы по сравнению с расстояниями до Луны и Солнца, то, независимо от формы Земли, силы лунного и солнечного притяжения на разные точки Земли неодинаковы. В результате появляется возмущающая сила, действующая на эти точки сообразно различным расстояниям и направлениям от этих точек до притягивающего тела. Если бы Земля была абсолютно твердым телом, т.е. ее точки не могли бы изменять своего положения относительно центра Земли, то под действием этих возмущающих сил в теле Земли появились бы только едва заметные натяжения. Но Земля не абсолютно твердое тело, поэтому действие возмущающих сил на некоторые части земной поверхности вызывает явления, которые называются *приливами* и *отливами*.

Допустим для простоты (Кононович, 2004), что твердая поверхность Земли со всех сторон равномерно покрыта океаном (рис. 2.13). Луна притягивает к себе каждую частицу твердой поверхности Земли и каждую каплю воды в океане, сообщая им ускорения обратно пропорциональные квадрату расстояния между частицей и центром Луны. Равнодействующая ускорений, сообщаемых твердым частицам, проходит через центр Земли  $T$  и равна

$$w_T = G \frac{m}{r^2}, \quad (2.15)$$

где  $m$  — масса Луны, а  $r$  — расстояние центра Луны от центра Земли. Что же касается воды океана, то в точке  $A$  ускорение больше, чем  $w_T$ , а в точке  $B$  оно меньше  $w_T$ , так как

$$w_A = G \frac{m}{(r-R)^2} \quad \text{и} \quad w_B = G \frac{m}{(r+R)^2}, \quad (2.16)$$

где  $R$  — радиус Земли.

Относительное ускорение (относительно центра Земли) в точке  $A$  равно разности  $w_A - w_T$ , т.е.

$$w_A - w_T = Gm \left[ \frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{r^2} \right] \quad (2.17)$$

или

$$w_A - w_T = Gm \frac{2rR - R^2}{(r-R)^2 r^2}. \quad (2.18)$$

Так как радиус Земли  $R$  по сравнению с расстоянием до Луны  $r$  величина достаточно малая, то в числителе можно пренебречь членом  $R^2$ , а в знаменателе вместо разности  $(r - R)$  оставить только  $r$ .

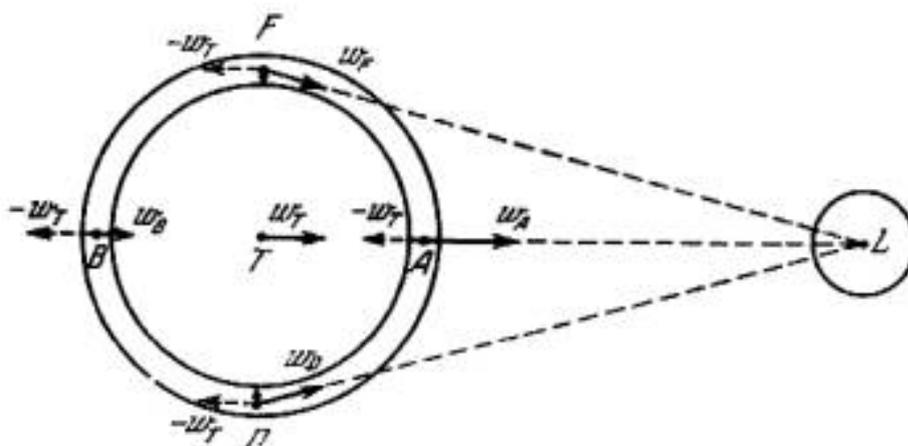


Рис. 2.13. Образование приливов

Тогда

$$w_A - w_T = Gm \frac{2R}{r^3}. \quad (2.19)$$

Эта разность ускорений направлена от центра Земли, так как  $w_A > w_T$ . Разность ускорений  $w_B - w_T$  по величине примерно такая же и направлена также от центра Земли, поскольку  $w_B < w_T$ . Следовательно, в точках  $A$  и  $B$  действие Луны ослабляет силу тяжести на земной поверхности.

В точках  $F$  и  $D$  ускорения  $w_F$  и  $w_D$ , сообщаемые Луной, направлены под тупым углом к ускорению, обратному ускорению в точке  $T$ ; рав-

нодействующие ускорения здесь направлены почти к центру Земли. Следовательно, в точках  $F$  и  $D$  действие Луны увеличивает силу земной тяжести.

В промежуточных точках между  $F$  и  $A$ ,  $A$  и  $D$  равнодействующие ускорения направлены в сторону точки  $A$ , а между  $F$  и  $B$ ,  $B$  и  $D$  — в сторону точки  $B$ . Если эти равнодействующие ускорения разложить по радиусу и по касательной, то в промежуточных точках получается небольшое усиление или ослабление силы земной тяжести и, что особенно важно, получаются ускорения, направленные к точке  $A$  на одной стороне Земли ( $FAD$ ) и к точке  $B$  на другой ( $FBD$ ). Действие этих ускорений приводит к тому, что вода в океане стремится на одной половине Земли к точке  $A$ , где Луна находится в зените, а на другой половине — к точке  $B$ , где Луна находится в надире.

Следовательно, под действием лунного притяжения водная оболочка Земли принимает форму эллипсоида, вытянутого по направлению к Луне, и близ точек  $A$  и  $B$  будет прилив, а у точек  $F$  и  $D$  — отлив.

Вследствие вращения Земли приливные выступы образуются в каждый следующий момент уже в новых местах земной поверхности. Поэтому за синодические лунные сутки - промежуток времени между двумя последовательными верхними (или нижними) кульминациями Луны, равный в среднем  $24^{\text{h}}52^{\text{m}}$ , приливные выступы обойдут вокруг всего земного шара и за это время в каждом месте произойдет два прилива и два отлива.

Под действием солнечного притяжения водная оболочка Земли также испытывает приливы и отливы, но солнечные приливы в 2,2 раза меньше лунных. Действительно, ускорение приливообразующей силы Солнца равно

$$GM_{\odot} \frac{2R}{a^3}$$

где  $M_{\odot}$  — масса Солнца, а  $a$  — расстояние Земли от Солнца (астрономическая единица). Разделив ускорение приливообразующей силы Луны на это ускорение, получим

$$\frac{m}{M_{\odot}} \frac{a^3}{r^3} \approx 2,2$$

Так как  $M_{\odot} = 333\,000$  масс Земли,  $m \approx 1/80$  массы Земли и  $a = 390r$ . Следовательно, приливная сила Солнца в 2,2 раза меньше приливной силы Луны. Солнечные приливы отдельно не наблюдаются, они только изменяют величину лунных приливов.

Во время новолуний и полнолуний (так называемых *сизигий*) солнечный и лунный приливы наступают одновременно, действия Луны и

Солнца складываются, и наблюдается самый большой прилив. Во время первой и последней четверти (так называемых *квадратур*) в момент лунного прилива происходит солнечный отлив, и действие Солнца вычитается из действия Луны: наблюдается наименьший прилив (рис. 2.14).

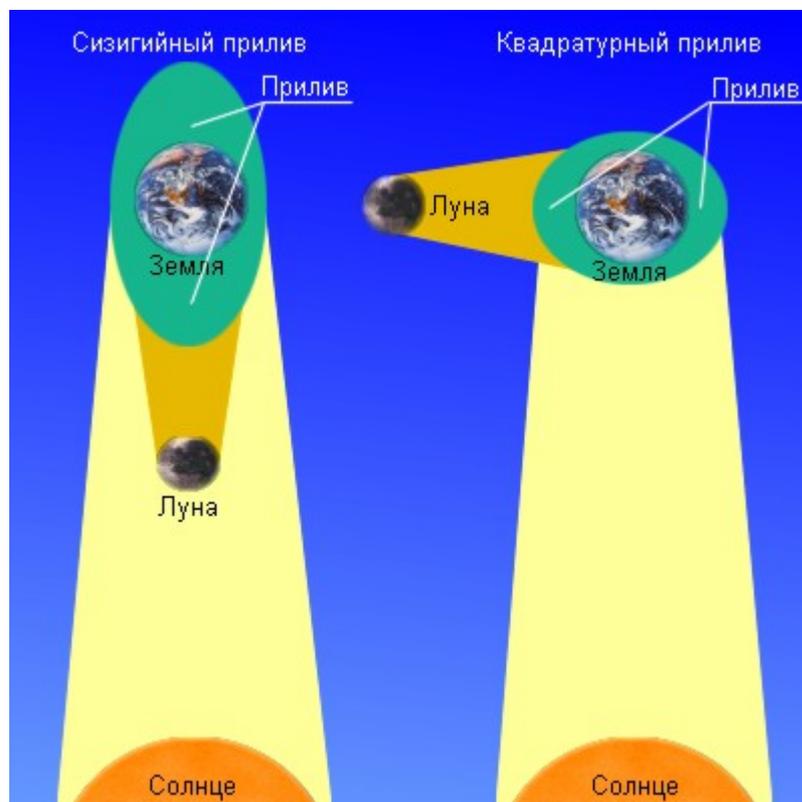


Рис. 2.14. Квадратурные и сизигийные приливы

Поскольку создаваемые Солнцем и Луной приливные эффекты складываются, воздействие этих небесных тел на Землю можно рассматривать по отдельности. В таком случае для каждой пары тел можно считать, что каждое из них обращается вокруг общего центра гравитации. Для пары Земля — Солнце этот центр находится в глубине Солнца на расстоянии 451 км от его центра. Для пары Земля-Луна он находится в глубине Земли на расстоянии  $2/3$  её радиуса.

В итоге на поверхности мирового океана возникает волна, занимающая постоянное положение в системах взаимно тяготеющих тел, но бегущая по поверхности океана совместно с суточным движением его дна и берегов. Таким образом (в пренебрежении океаническими течениями) каждая частица воды дважды совершает в течение суток колебательное движение вверх-вниз.

Горизонтальное движение воды наблюдается лишь у берегов как следствие подъёма её уровня. Скорость движения тем больше, чем более полого расположено морское дно.

В действительности явление приливов и отливов гораздо сложнее. Земля не везде покрыта океаном и приливная волна (приливной выступ), пробегая по поверхности океана, встречает на своем пути сложные береговые линии материков, различные формы морского дна и испытывает при этом трение. Как правило, в силу указанных причин момент прилива не совпадает с моментом кульминации Луны, а запаздывает приблизительно на один и тот же промежуток времени, иногда доходящий до шести часов. Этот промежуток времени называется *прикладным часом*.

Высота прилива в разных местах также не одинакова. Во внутренних морях, например, в Черном и Балтийском, приливы ничтожны — всего в несколько сантиметров.

В океане, вдали от побережья, величина прилива не превышает 1 м, но у берегов, в зависимости от их очертаний и глубины моря, приливы могут достигать значительной высоты. Так, например, в Пенжинской губе (Охотское море) наибольшая величина прилива 12,9 м, в заливе Фробишера (южное побережье острова Баффинова Земля) — 15,6 м, а в заливе Фанди (Атлантическое побережье Канады) — 18 м.

Максимальный уровень поверхности воды во время прилива называется *полной водой*, а минимальный во время отлива — *малой водой*. В океане, где дно ровное, а суша далеко, *полная вода* проявляется как два «вздутия» водной поверхности: одно из них находится со стороны Луны, а другое — в противоположном конце земного шара (см. выше). Также могут присутствовать ещё два меньших по размеру вздутия со стороны, направленной к Солнцу, и противоположной ему.

Так как Луна и Солнце перемещаются относительно Земли, вместе с ними перемещаются и водные горбы, образуя *приливные волны* и *приливные течения*. В открытом море приливные течения имеют вращательный характер, а вблизи берегов и в узких заливах и проливах — возвратно-поступательный.

Если бы вся Земля была покрыта водой, мы бы наблюдали два регулярных прилива и отлива ежедневно. Но так как беспрепятственному распространению приливных волн мешают участки суши: острова и континенты, а также из-за действия силы Кориолиса на движущуюся воду, вместо двух приливных волн наблюдается множество маленьких волн, которые медленно (в большинстве случаев с периодом 12 ч 25,2 мин) обегают вокруг точки, называемой амфидромической, в которой амплитуда прилива равна нулю. Доминирующая компонента прилива (лунный прилив M<sub>2</sub>) образует на поверхности Мирового океана около десятка амфидромических точек с движением волны по часовой стрелке и примерно столько же — против часовой (см. карту на рис.

2.15). Всё это делает невозможным предсказание времени прилива только на основе положений Луны и Солнца относительно Земли. Вместо этого используют «ежегодник приливов» — справочное пособие для вычисления времени наступления приливов и их высоты в различных пунктах земного шара. Также используются таблицы приливов, с данными о моментах и высотах малых и полных вод, вычисленными на год вперёд для *основных приливных портов*.

**Амфидромическая точка** (от греч. *amphi* — вокруг и *dromos* — бег) — это точка в океане, где амплитуда приливной волны равна нулю. Высота прилива увеличивается с удалением от амфидромической точки. Иногда эти точки называют узлами приливов: приливная волна «обегаёт» эту точку вокруг по или против часовой стрелки. В этих точках сходятся котидальные линии.

Амфидромические точки возникают благодаря интерференции первичной приливной волны и её отражений от береговой линии и подводных препятствий. Вносит свой вклад и сила Кориолиса.

Например, амфидромические точки, обегаемые приливной волной по часовой стрелке, находятся:

на севере Сейшельских островов;

к востоку от Новой Гвинеи;

на западе Галапагосских островов.

Амфидромические точки, обегаемые против часовой стрелки, находятся, например:

около острова Шри-Ланка;

к северу от Новой Гвинеи;

около Таити.

**Котидальные линии** (Co-tidal lines) — линии, радиально расходящиеся из амфидромической точки и соединяющие на карте все пункты, где гребень приливной волны появляется одновременно, т. е. пункты, в которых полная вода наступает одновременно.

Из-за океанских приливов и отливов возникает сила трения между литосферой и гидросферой, замедляющая скорость вращения Земли вокруг своей оси. Каждое столетие продолжительность суток увеличивается приблизительно на 0,002 с. Изучение годовых колец у кораллов позволило установить, что примерно 500 млн. лет тому назад продолжительность земных суток составляла приблизительно 21 час. Два миллиарда лет назад продолжительность земных суток составляла всего 10 часов, а в отдалённом будущем они будут равны одному месяцу. Уже теперь благодаря приливным силам Луна постоянно обращена к Земле одной и той же стороной. Кроме того, притяжение приливных выступов Земли увлекает Луну по орбите вперёд, в результате чего она удаляется от Земли со скоростью около 3 см в год.

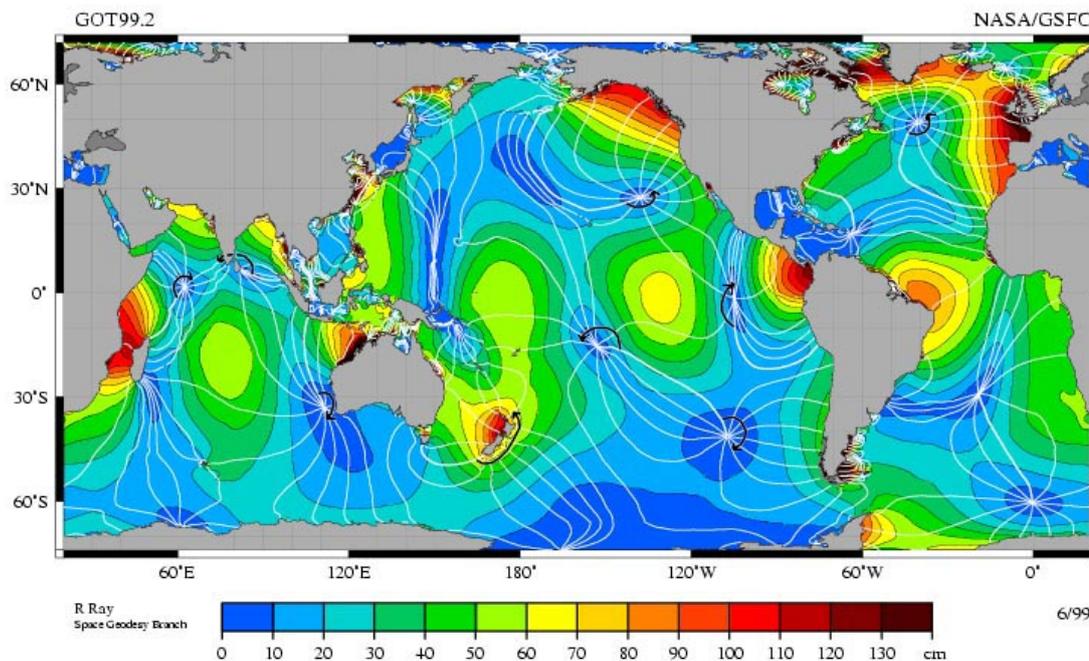


Рис. 2.15.  $M_2$  прилив. Белые линии — это котидальные линии с фазовым интервалом  $30^\circ$ . Амфидромические точки — тёмные области, где сходятся белые линии. Стрелки вокруг этих точек показывают направление «обегания»

**Атмосферные приливы.** Притяжение Солнца и Луны вызывает в атмосфере приливы, подобные земным и морским приливам. Но атмосферные приливы имеют существенное отличие: атмосфера сильнее всего реагирует на влияние Солнца, тогда как земная кора и океан – на влияние Луны. Это объясняется тем, что атмосфера нагревается Солнцем и в дополнение к гравитационному воздействию возникает мощный термальный прилив. В целом механизмы образования атмосферных и морских приливов сходны, за исключением того, что для прогноза реакции воздуха на гравитационные и термические воздействия необходимо учитывать его сжимаемость и распределение температуры. Не до конца понятно, почему полусуточные (12-часовые) солнечные приливы в атмосфере преобладают над суточными солнечными и полусуточными лунными приливами, хотя движущие силы двух последних процессов гораздо мощнее. Раньше считалось, что в атмосфере возникает резонанс, усиливающий именно колебания с 12-часовым периодом. Однако наблюдения, проведенные при помощи геофизических ракет, свидетельствуют об отсутствии температурных причин такого резонанса. При решении этой проблемы, вероятно, следует учитывать все гидродинамические и термические особенности атмосферы.

У земной поверхности близ экватора, где влияние приливных колебаний максимально, оно обеспечивает изменение атмосферного давления на 0,1%. Скорость приливных ветров составляет около 0,3 км/ч.

Благодаря сложной термической структуре атмосферы (особенно наличию минимума температуры в мезопаузе) приливные воздушные течения усиливаются, и, например, на высоте 70 км их скорость примерно в 160 раз выше, чем у земной поверхности, что имеет важные геофизические последствия.

Считается, что в нижней части ионосферы (слой E) приливные колебания перемещают ионизированный газ вертикально в магнитном поле Земли, и, следовательно, здесь возникают электрические токи. Эти постоянно возникающие системы токов на поверхности Земли устанавливаются по возмущениям магнитного поля. Суточные вариации магнитного поля достаточно хорошо согласуются с расчетными величинами, что убедительно свидетельствует в пользу теории приливных механизмов «атмосферного динамо».

Электрические токи, возникающие в нижней части ионосферы (слой E), должны куда-то перемещаться, и, следовательно, цепь должна замкнуться. Аналогия с динамо-машиной становится полной, если рассматривать встречное движение как работу двигателя. Предполагается, что обратная циркуляция электрического тока осуществляется в более высоком слое ионосферы (F), и этим встречным потоком могут объясняться некоторые своеобразные черты этого слоя. Наконец, приливный эффект должен порождать также горизонтальные потоки в слое E и, следовательно, в слое F.

Установлено, что под действием лунно-суточных приливов деформируется твёрдая оболочка Земли. Если бы Земля была абсолютно твёрдой, то такие приливы отсутствовали бы. Если бы Земля обладала свойствами жидкого тела, она деформировалась бы как Мировой океан. Под влиянием земных приливов всякий сферический слой Земли (с центром в центре Земли) превращается в слой, близкий к эллипсоиду. В результате происходят периодические колебания уровня земной поверхности и ускорения силы тяжести. Конечно, приливные явления в земной коре имеют значительно меньшую амплитуду. Максимальная амплитуда (пульсация коры два раза в сутки) колеблется от 51 см в области экватора, до 40 см на широте 50-60°. Волны приливного вздутия всё время пробегают по Земле, люди их практически не ощущают, так как они очень медленны, меньше 4 см в час.

Совместным влиянием Солнца и Луны на Землю обусловлена *лунно-солнечная прецессия*.

Земля не имеет правильной формы, а ось ее суточного вращения наклонена к плоскости эклиптики под углом 66°33'. Луна и Солнце, притягивая к себе более близкие экваториальные выступы Земли сильнее, чем более отдаленные, создают вращательный момент, который

стремится совместить плоскость земного экватора с плоскостью земной орбиты, а ось вращения Земли установить перпендикулярно к плоскости эклиптики. Но этому препятствует быстрое вращение Земли. В результате ось Земли, описывает в пространстве окружность (конус) с радиусом  $23^{\circ}26,5'$  и периодом обращения в 25 800 лет с центром в полюсе эклиптики, и этот полюс в современную эпоху находится в созвездии Дракона (рис. 2.16). Цикл прецессий земной оси называется платоническим годом.

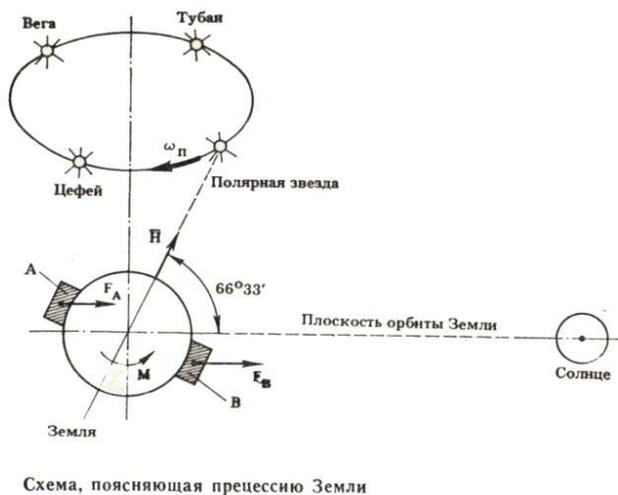


Рис. 2.16. Солнечная составляющая прецессии Земли

Таким образом, Солнце своим притяжением стремится совместить плоскость экватора с плоскостью эклиптики и полюс мира с полюсом эклиптики. Луна, которая производит на Землю более сильное влияние, чем Солнце, создает пару сил, стремящуюся повернуть Землю так, чтобы плоскость экватора совпала с плоскостью орбиты Луны. Результатом совместного действия и является явление прецессии.

Кроме Луны и Солнца, на Землю влияют планеты, но их влияние на экваториальное утолщение Земли вследствие малых масс планет (по сравнению с массой Солнца) и сравнительно больших расстояний между ними ничтожно мало.

Однако планеты оказывают влияние на положение центра тяжести системы «Земля-Луна», отчего изменяется положение плоскости земной орбиты. Это вызывает перемещение на небесной сфере эклиптики и ее полюсов, что в свою очередь вызывает (помимо лунно-солнечной прецессии) дополнительное смещение точек равноденствия, называемое прецессией от планет.

В результате прецессии точка весеннего равноденствия смещается по небесному экватору к западу со скоростью порядка 50 угловых секунд в год.

За счет прецессии расстояние от Земли до Солнца в разные сезоны года не остается постоянным, а меняется в пределах 147,3–152,1 млн. км. Соответственно изменяется и приток солнечной радиации к Земле.

#### **2.4. Космическое гамма- и рентгеновское излучение и эволюция биосферы**

Под рентгеновским излучением обычно понимают электромагнитные волны в диапазоне энергии от 0,1 до 300 кэВ (от 100 до 0,1 Å). Этот диапазон подразделяется на три поддиапазона: 0,1 – 5 кэВ (мягкое рентгеновское излучение); 5 – 50 кэВ (классический рентгеновский диапазон); 50 – 300 кэВ (жесткое рентгеновское излучение).

Электромагнитное излучение в диапазоне энергий, больших 300 КэВ, называют гамма-излучением.

Такое разделение связано с разными механизмами генерации фотонов и различными методами регистрации излучений.

Рентгеновское излучение является ионизирующим. Оно воздействует на ткани живых организмов и может быть причиной лучевой болезни, лучевых ожогов и злокачественных опухолей. Считается, что лучевое поражение прямо пропорционально поглощенной дозе излучения. Рентгеновское излучение является мутагенным фактором.

Поскольку Земля защищена атмосферой от жестких электромагнитных излучений, эти излучения регистрируются аппаратурой, вынесенной космическими аппаратами за атмосферу: жесткое излучение полностью поглощается атмосферой на высотах до 20 км, а для наблюдений в «классическом» и в мягком диапазонах необходимо поднять аппаратуру на высоту более 200 км.

В связи с этим рентгеновское излучение Солнца обнаружили только в 1948 г. с помощью фотоэмульсии, установленной на ракете на высоте 200 км.

Механизмом рентгеновского излучения солнечной короны является тепловое тормозное излучение прозрачной плазмы, так же могут излучать и короны обычных звезд. Рентгеновский поток от звезд, даже самых близких, вряд ли может превышать  $10^{-3}$  фотона·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Обнаружить такое слабое излучение стало возможно только в 60-е годы 20 века. Планировалось зарегистрировать рентгеновское излучение, возникающее при бомбардировке Луны протонами солнечного ветра, поток которого мог достигать примерно 1 фотон/(см<sup>2</sup>·с) в диапазоне энергий 1–10 кэВ. Кроме того, поверхность Луны способна флуоресцировать под действием падающего на нее рентгеновского излучения Солнца

В 1962-м счетчики Гейгера, установленные на американской ракете *Aerobee-150*, запущенной на высоту 200 км, обнаружили в энергетиче-

ческом диапазоне от 1,6 до 6,2 КэВ не фоновое излучение, а локальный, неподвижный относительно звезд источник. Источник был назван SCO X-1 (трехбуквенное сокращенное название созвездия, X — от английского X-rays, и номер источника по порядку открытия). В 1963 году, во время полета ракеты, запущенной другой группой исследователей, существование источника в Скорпионе было еще раз подтверждено. Более того, был открыт еще один яркий источник. Он оказался в 8 раз слабее, находился в созвездии Тельца (лат. *Taurus*) и получил название Тау X-1. Координаты источника совпали с известным остатком вспышки сверхновой — Крабовидной туманностью.

В 1963 году, во время полета ракеты, запущенной другой группой исследователей, существование источника SCO X-1 в Скорпионе было еще раз подтверждено. Кроме того, был открыт еще один яркий источник. Он оказался в 8 раз слабее, находился в созвездии Тельца и получил название Тау X-1. Координаты источника совпали с известным остатком вспышки сверхновой — Крабовидной туманностью

В 60-е годы рентгеновские исследования проводились с помощью приборов, установленных на борту ракет и высотных аэростатов. Точность этих приборов была невысока, но тогда ученых интересовали не столько характеристики рентгеновских источников, сколько сам факт их существования и распределения по Галактике. Установка же более сложного оборудования было делом невыгодным, так как по окончании полета ракеты оно разрушалось вместе с ней. За 8 лет ракетных и аэростатных исследований на рентгеновскую карту неба было нанесено всего 40 источников. Ситуация резко изменилась с появлением спутников, способных активно работать длительное время, к тому же их положение контролировалось с достаточной степенью надежности, а значит, и направление на источник могло быть выдержано с большой точностью.

США запустили первый орбитальный телескоп Uhuru (известный также как SAS-1) в 1970 году. Находясь на орбите со средней высотой около 540 километров, аппарат наблюдал за космическим пространством в целом. Впервые у астрофизиков в руках оказалась подробная карта наблюдений космического пространства в рентгеновском диапазоне.

Вслед за SAS-1 последовали американские SAS-3 и HEAO 1, АНС (Нидерланды), UK-5 (Великобритания) и японская *Hakute*.

В 1975 году секретный американский спутник *Vela* и астрономический нидерландский спутник *ANS* зарегистрировали рентгеновские барстеры — вспышки жесткого излучения.

В 1978 году отправился на орбиту спутник-обсерватория *Einstein*. На его борту был установлен первый большой рентгеновский телескоп с зеркалами косоуго падения с диаметром входного отверстия 60 см.

В 80-е годы стартовали новые рентгеновские телескопы на японских спутниках *Tenma* и *Ginga*, советских — «Астроне», «Кванте» и «Гранате» и на европейском спутнике *EXOSAT*. В 90-е годы, когда к работе подключились совместная американско-европейская обсерватория *ROSAT* и японский спутник *ASCA*,

Первый советский аппарат для изучения космического рентгеновского излучения под названием «Астрон» был запущен в 1983 году. В настоящее

время половина всех космических обсерваторий работает, в том числе, и в рентгеновском диапазоне. Есть несколько специализированных аппаратов, например рентгеновская обсерватория *Chandra*, запущенная в 1999 году, и *Swift* (2004).

Интересные результаты были получены с борта орбитальной станции «Салют-4»; рентгеновские детекторы, способные исследовать излучение источников в большом энергетическом диапазоне, работали и на борту станции «Салют-7».

Сейчас в космосе летают спутники, чьи приборы охватывают практически весь диапазон электромагнитных волн — от радио (российский Спектр-Р), инфракрасного (*Spitzer*) и оптического (*Hubble*) излучения вплоть до жестких рентгеновских и гамма-лучей (*Fermi*, *INTEGRAL*).

### Распределение рентгеновских источников по небесной сфере

Самые детальные обзоры неба выполнены с помощью специализированных рентгеновских спутников *Uhuru* и *Einstein*. Четвертый каталог *Uhuru* включает 339 источников, распределение которых по небу в галактических координатах показано на рис. 2.17. Размер кружка на рисунке пропорционален интенсивности источника.

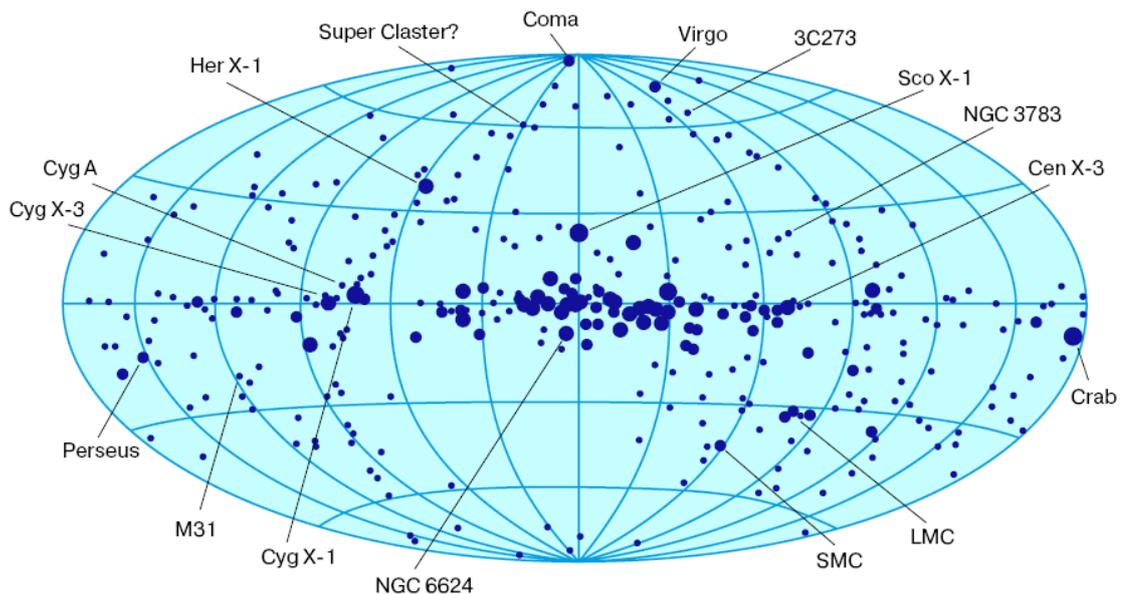


Рис. 2.17 Распределение рентгеновских источников на небесной сфере

Самые яркие источники концентрируются к галактическому экватору ( $\pm 20^\circ$  от экватора), а также к галактическому центру. Очевидно, большинство из них принадлежит нашей собственной Галактике. Если бы источники равной светимости распределялись в ее диске равномерно, то зависимость числа таких источников  $N$  от величины их потока  $F_x$  подчинялась бы закону  $N(F_x) \sim F_x^{-1}$ . Для однородного сферического распределения такая же зависимость имела бы вид  $N(F_x) \sim F_x^{-3/2}$ .

Сферическое гало слабых источников в основном состоит из объектов, расположенных вне нашей Галактики.

**Природа источников рентгеновского излучения** (*материал из Соросовской энциклопедии*)  
*Остатки сверхновых и нейтронные звезды в остатках сверхновых (радиопульсары)*

Более десятка галактических рентгеновских источников отождествлены с остатками сверхновых звезд. Остатки сверхновых в нашей Галактике имеют угловые размеры, превышающие несколько градусов. В большинстве случаев источником рентгеновского излучения является горячая плазма за фронтом ударной волны, которая служит границей раздела между межзвездной средой и расширяющейся газовой оболочкой, возникшей после вспышки сверхновой. Важным исключением является знаменитая Крабовидная туманность. Ее излучение (от радио- до рентгеновского диапазона) интерпретируется как синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле туманности. В центре этой туманности находится радиопульсар – нейтронная звезда, вращающаяся с периодом  $P=33$  мс. Это единственный радиопульсар, излучающий во всех диапазонах спектра, включая и гамма-излучение сверхвысокой энергии (до  $10^{16}$  эВ). Ускорение электронов в туманности до релятивистских энергий происходит именно за счет энергии вращения нейтронной звезды. В результате потери энергии на ускорение электронов нейтронная звезда замедляется и период ее вращения уменьшается. Для пульсара в Крабовидной туманности относительная скорость изменения периода (то есть величина, равная отношению скорости изменения периода к величине самого периода) составляет  $3 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ , соответственно обратная ей величина ( $\sim 1000$  лет) определяет возраст пульсара.

Основные этапы образования нейтронных звезд следующие. Звезды – это огромные раскаленные газовые шары. Мощное гравитационное поле звезды стремится сжать ее. Чтобы звезда находилась в равновесии, какая-то сила должна противодействовать гравитации. Эта сила – давление горячей плазмы и излучения, которые образуются при переносе через толщу звездного вещества энергии, возникающей в результате протекания в центре звезды термоядерных реакций. Однако ядерное горючее небезгранично. После того как звезда его израсходует, она уже не сможет противостоять силе тяготения и начнет сжиматься. Во что превратится при этом звезда, зависит от ее начальной массы. Если масса ядра звезды, претерпевшего химическую эволюцию, не превосходила  $1,2M_{\odot}$ , где  $M_{\odot}$  – масса Солнца, то звезда превратится в белый карлик – горячую звезду размером с нашу Землю. В этом случае сжатие останавливается давлением электронов, находящихся в особом квантовом состоянии. Если масса ядра звезды больше, но не превосходит трех солнечных, то сжатие будет продолжаться до тех пор, пока уже ядерные

силы не скомпенсируют силу тяготения. В таком состоянии звездное вещество уплотнено настолько, что все электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны. В результате возникает нейтронная звезда с радиусом всего около 10 км. Гравитационное сжатие звезды с массой более  $3M_{\odot}$  уже не может быть остановлено никакими силами, и звезда превращается в черную дыру – объект, на границе которого вторая космическая скорость равна скорости света. Черная дыра массой около  $1M_{\odot}$  имеет радиус примерно 3 км.

### *Рентгеновские тесные двойные системы*

В настоящее время значительное количество рентгеновских источников отождествлены с тесными двойными системами. Почти все они являются рентгеновскими пульсарами, то есть быстро вращающимися замагниченными нейтронными звездами, входящими в состав двойных систем. Значения периодов пульсаров лежат в интервале от 0,7 до 835 с.

Источником энергии рентгеновского пульсара является, однако, не энергия вращения нейтронной звезды, а гравитационная энергия газа, перетекающего на нейтронную звезду с поверхности оптического компонента двойной системы, и выделяющаяся при падении на ее поверхность. Этот процесс носит название аккреции вещества (рис. 2.18).

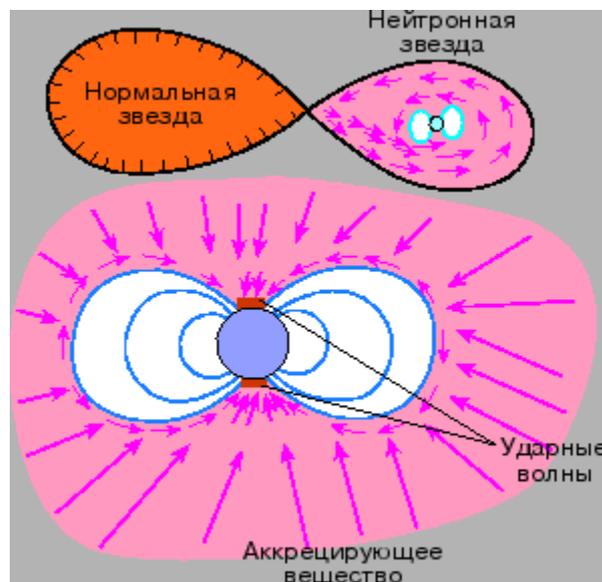


Рис. 2.18. Картина аккреции вещества нормальной звезды на поверхность нейтронной компоненты двойной системы

Для явления рентгеновского пульсара необходимо наличие на поверхности нейтронной звезды сильного магнитного поля с индукцией  $B \approx 10^{11} - 10^{13}$  Гс. Как только в процессе эволюции нормальной звезды в тесной двойной системе ее поверхность достигнет границ полости Ро-

ша, начинается сильное истечение газа. Ионизованный газ свободно падает на замагниченную нейтронную звезду вплоть до поверхности, называемой альвеновской, радиус которой  $r_A$  определяется из условия равенства магнитного и газового давлений:

$$B^2(r_A)/8\pi = 0,5\rho V^2(r_A), \quad (2.16)$$

где  $B(r_A)$  – индукция магнитного поля звезды,  $\rho$  и  $V(r_A)$  – соответственно плотность и скорость потока аккрецируемой плазмы на альвеновской поверхности. На расстоянии  $r_A$  от нейтронной звезды магнитное поле останавливает поток плазмы и направляет его вдоль магнитных силовых линий на магнитные полюсы звезды. Таким образом, альвеновский радиус  $r_A$  определяет границу магнитосферы нейтронной звезды. Его величина составляет примерно 100 радиусов нейтронной звезды, то есть около 1000 км.

Само явление рентгеновского пульсара имеет место только при очевидном условии, что оси магнитного поля звезды и ее собственного вращения не совпадают друг с другом.

### *Транзиентные рентгеновские источники или рентгеновские новые*

Транзиентная или рентгеновская новая – это рентгеновская звезда, которая внезапно вспыхивает в каком-либо участке неба, где она раньше не наблюдалась. Возрастание интенсивности излучения такой звезды происходит за время около недели, затем ее блеск постепенно, примерно за несколько месяцев падает до уровня фона. Кривая блеска рентгеновского транзиентного источника удивительно напоминает кривую оптического блеска новой. Поэтому такие объекты имеют второе название – рентгеновские новые. Блеск новой звезды в момент максимума вспышки может значительно превышать яркость самых мощных постоянных рентгеновских источников.

Рентгеновские новые – это также двойные системы, в которых нейтронная звезда движется по сильно вытянутой орбите (то есть по орбите с большим эксцентриситетом). Пока она находится далеко от своего оптического компонента, скорость истечения вещества из нормальной звезды невелика и соответственно мал поток возникающего в результате аккреции рентгеновского излучения. Как только нейтронная звезда подходит близко к нормальной компоненте (в периастре), из-за возрастания гравитационного воздействия нейтронной звезды на оптический компонент мощность истечения резко увеличивается, растет темп аккреции и наблюдается всплеск рентгеновского потока. В области периастра расстояние между звездами настолько мало, что значительная

доля рентгеновского потока может перехватываться оптической звездой. Это перехваченное рентгеновское излучение обеспечивает дополнительный прогрев атмосферы нормальной звезды, в результате чего ее блеск может возрасти во много раз.

### *Вспыхивающие рентгеновские источники – барстеры*

Барстер (англ. *burst* – вспышка) характеризуется внезапным возрастанием рентгеновской интенсивности за время порядка нескольких секунд или даже меньше. Затем в течение нескольких десятков секунд происходит понижение рентгеновской интенсивности источника.

Светимость барстера в максимуме потока сравнима со светимостью самых ярких рентгеновских источников в нашей Галактике. Типичное значение интегрального потока во вспышках  $10^{-8}$ - $10^{-7}$  эрг/(см<sup>2</sup>·с), что для расстояния в 10 килопарсек дает значение светимости  $L_x \approx 10^{37}$ - $10^{38}$  эрг/с. Подобных вспышек у одного источника может быть несколько, временной промежуток между вспышками составляет несколько часов, а иногда и дней. Их называют вспышками 1-го типа. На сегодня известно примерно 30 таких медленных барстеров. Медленные барстеры лежат близко к галактическому экватору и концентрируются к галактическому центру, входя в группу рентгеновских источников галактического балджа (балдж – скопление звезд, группирующееся вокруг галактического центра). Группа насчитывает примерно 70 источников, из которых детально исследованы только несколько объектов. Рентгеновские источники балджа существенно отличаются от рассмотренных выше рентгеновских двойных систем, в которых оптический компонент, как правило, имеет большую массу, а рентгеновское излучение пульсирует (из-за вращения нейтронной звезды) и характеризуется довольно жестким спектром. Кроме того, для них характерны довольно глубокие рентгеновские затмения, обусловленные двойственностью этих источников. Рентгеновские источники балджа, как правило, имеют более мягкие спектры, а пульсирующая компонента рентгеновского излучения отсутствует. В течение длительного времени у этих источников не обнаруживались рентгеновские затмения. И лишь у источника 4U 1915-05 были найдены слабые рентгеновские затмения с периодом  $P=2985$  с. По видимому, источники галактического балджа также являются рентгеновскими двойными, но с маломассивными оптическими компонентами.

Среди 30 известных барстеров выделены источники, для которых характерны вспышки 2-го типа. Это более короткие вспышки продолжительностью около 1 секунды и с временным интервалом между вспышками в несколько минут. Кроме того, в отличие от вспышек 1-го типа, они не показывают спектральной переменности. Наиболее ярким

представителем объектов со вспышками 2-го типа является объект, называемый «быстрый» барстер (MXB 1730-335), открытый в 1976 году с борта специализированного спутника SAS 3. Совсем недавно от этого объекта были зарегистрированы вспышки и 1-го типа.

Барстеры, как правило, имеют мягкий рентгеновский спектр ( $kT \sim 3-10$  кэВ), у них отсутствуют периодические пульсации излучения. Эти источники с большой вероятностью являются нейтронными звездами, а не белыми карликами или черными дырами. Основным аргументом состоит в том, что спектры вспышек с хорошей степенью точности описываются распределением Планка. Семь барстеров входят в состав шаровых скоплений, для других барстеров получены разумные оценки расстояний до них, так что оказывается возможным определить радиус излучающей области. Его значение оказалось около 7 км, что близко к величине радиуса нейтронной звезды.

Наличие мягкого рентгеновского спектра и отсутствие периодических пульсаций могут быть связаны с тем, что у нейтронных звезд в таких системах магнитное поле сравнительно слабое:  $B \sim 10^8-10^9 \ll 10^{12}$  Гс.

Вспышки барстеров происходят, как правило, на фоне слабо модулированного потока излучения. Соотношение проинтегрированных за 1 час вспышечного и постоянного потоков составляет 8 %. Это очень близко к отношению ядерной энергии связи (8 МэВ) и гравитационной энергии протона, выделяемой при аккреции ( $\sim 130$  МэВ). Поэтому полагают, что вспышки 1-го типа происходят в результате ядерного горения в оболочке нейтронной звезды вещества, накопленного в результате аккреции. Термоядерная вспышка накопленного вещества может реально объяснить наблюдаемые свойства барстеров. Наиболее подходящий материал для вспышки – гелий, однако и горение водорода играет немаловажную роль.

Что касается всплесков 2-го типа, то они, скорее всего, связаны с неустойчивостью аккреционного потока на нейтронную звезду с сильным магнитным полем.

Вырожденные карлики – источники рентгеновского излучения

Вырожденные карлики в тесных двойных системах образуют широкий класс звезд, известных как взрывные или катаклизмические переменные. Они подразделяются на четыре группы: новые, повторные новые, карликовые новые и новоподобные. Эти группы отличаются друг от друга по масштабам энерговыделения, амплитуде и частоте вспышек. От многих взрывных переменных зарегистрировано рентгеновское излучение, которое возникает в результате аккреции на белый карлик вещества, перетекающего с нормального компонента двойной системы.

В последнее время среди взрывных переменных особый интерес вызывает недавно обнаруженный класс звезд типа AM >Геркулеса (иначе – поляры). Они выделяются среди других катаклизмических переменных высокой степенью поляризации оптического излучения, достигающей нескольких десятков процентов. Спектрам этих звезд присущи сильные эмиссионные линии, вид которых изменяется с фазой орбитального периода. От полярных зарегистрированы потоки пульсирующего рентгеновского и даже мягкого гамма-излучения. Как поляризация, так и возникновение жесткого излучения обусловлено главным образом очень сильным магнитным полем белых карликов, входящих в такие двойные системы (по разным оценкам напряженность поля составляет  $10^7$ - $10^8$  Э), однако детальные объяснения пока отсутствуют.

Таким образом, сильные магнитные поля компактных звезд практически во всех случаях приводят к необычным наблюдательным проявлениям. Компактные звезды оказались своеобразной физической лабораторией, в которой в соответствии или вопреки построенным физическим теориям разыгрываются процессы, принципиально невозможные в земных условиях. Открытие таких магнитных полей вызвало новый подъем деятельности физиков в области исследования физических процессов, протекающих в сильных магнитных полях.

### *Черные дыры в двойных системах*

Выдающимся достижением рентгеновской астрономии явилось открытие черных дыр в двойных системах (точнее, следует говорить о кандидатах в черные дыры).

Характер аккреции плазмы с поверхности оптического компонента на черную дыру отличается от случая нейтронной звезды, так как у черной дыры не может быть ни сильного магнитного поля, ни твердой поверхности. Поэтому рентгеновское излучение аккрецирующей черной дыры никогда не будет пульсировать. Однако решающим аргументом, конечно, является определение массы компактного объекта, например, по кривой лучевых скоростей оптического компонента.

До самого последнего времени наиболее надежным кандидатом в черные дыры считался объект Лебедь X-1 (Cyg X-1). Это мощный источник рентгеновского излучения с довольно жестким спектром. Его излучение представляет собой нерегулярную последовательность во времени импульсов различной мощности и длительности (вплоть до миллисекунд). В оптическом диапазоне объект отождествлен с голубым сверхгигантом – звездой HD 226868. Ее спектральные линии смещаются относительно своих средних положений вследствие эффекта Доплера с орбитальным периодом  $P=5,6$  суток. По кривой лучевых скоро-

стей можно установить нижнюю границу массы невидимого объекта:  $M_x \geq 10M_{\odot}$ . Это и есть главный наблюдательный аргумент в пользу существования черной дыры в этой двойной системе.

В последнее время найдены и другие кандидаты в черные дыры: это рентгеновский источник в Большом Магеллановом Облаке (LMC X-3) и рентгеновская новая V404 Лебеда (V404 Cyg). Вычисленные массы компактных звезд – источников рентгеновского излучения оказались выше значения  $3M_{\odot}$ , которое принято считать предельным значением для массы нейтронной звезды. Поэтому они с большой степенью достоверности являются черными дырами.

### *Внегалактические источники рентгеновского излучения*

Источниками рентгеновского излучения являются также галактики: нормальные, радиогалактики, квазары и сейфертовские галактики. Современная рентгеновская астрономия достигла такого высокого уровня углового разрешения, который позволяет выделять отдельные (дискретные) источники внутри ближайших к нам галактик.

Наблюдения, полученные с борта специализированной космической обсерватории «Эйнштейн», показали, что рентгеновское излучение нормальных галактик представляет собой в основном совокупность дискретных источников, подобных тем, что наблюдаются в нашей Галактике. Так, рентгеновское излучение одного из ближайших к нам соседей – галактики M 31 является суммарным излучением примерно 80 дискретных источников со средней светимостью  $L_x \sim 10^{37}$  эрг/с.

Что касается мощных радиогалактик, таких, как, например, M 87, то в них источниками излучения являются довольно протяженные области, примерно совпадающие по размерам с областями радиоизлучения. Кроме того, есть данные, свидетельствующие о корреляции рентгеновского и радиопотоков. Поэтому считается, что рентгеновское излучение радиогалактик образуется в результате обратного комптоновского рассеяния (называемого «обратный комптон-эффект») радиофотонов на тех же самых релятивистских электронах, которые обеспечивают наблюдаемые радиопотоки в результате синхротронного излучения.

Самым интересным событием явилось открытие мощного рентгеновского излучения квазаров и ядер активных галактик. Каталог космической обсерватории «Эйнштейн» насчитывает более 3000 дискретных рентгеновских источников. Предполагают, что это квазары, но оптически они пока не отождествлены. Рентгеновские светимости квазаров и ядер сейфертовских галактик в энергетическом интервале 0,5-4,5 кэВ лежат в пределах  $10^{43}$ - $10^{47}$  эрг/с. Переменность потоков в рентгеновском диапазоне, свойственная этим объектам, оказалась более быстрой

(~10000 секунд у сейфертовских галактик, и даже ~100 секунд у квазаров), чем переменность их оптического излучения (~30 суток). Такая быстрая переменность позволяет оценить характерные размеры области излучения как  $R_x \sim 10^{13} - 10^{14}$  см. Исключительная компактность галактических ядер, а также их высокая энергетика в рентгеновском диапазоне, которая может быть объяснена только механизмом аккреции межгалактического газа и вещества звезд на сверхмассивный объект, позволяют предполагать, что галактические ядра являются сверхмассивными черными дырами.

Выдающимся достижением рентгеновской астрономии стало открытие протяженных источников рентгеновского излучения в скоплениях галактик. Самые мощные из них – скопления в созвездиях Волосы Вероники, Персей и Дева. Характерные размеры протяженных источников составляют 0,1-1 Мпк, а их светимость лежит в пределах  $10^{43} - 10^{45}$  эрг/с. Детальное исследование их спектров показало, что источником излучения является горячий межгалактический газ с температурой  $10^7 - 10^8$  К, захваченный гравитационным полем скопления. Центральной здесь является проблема происхождения этого газа – является ли он реликтовым (то есть остался ли он еще от эпохи первичного нуклеосинтеза – эпохи рождения современного нам вещества) или он имеет галактическое происхождение, то есть выброшен из галактик путем того или иного механизма (например, с помощью «галактического ветра»). Критическим тестом для решения этой проблемы является определение отношения Fe/H, свойственного данному скоплению. Количество железа можно определить по интенсивности высокоионизованных линий железа Fe XXV и Fe XXVI. Оказалось, что величина этого отношения близка к значению, характерному для нормальных галактик. Это свидетельствует о том, что горячий газ внутри скоплений, несомненно, имеет галактическое происхождение.

**Гамма-всплеск** — масштабный космический выброс энергии взрывного характера, наблюдаемый в отдалённых галактиках в самой жёсткой части электромагнитного спектра. Гамма-всплески — наиболее яркие электромагнитные события, происходящие во Вселенной. Продолжительность типичного гамма-всплеска составляет несколько секунд, тем не менее он может длиться от миллисекунд до часа. За первоначальным всплеском обычно следует долгоживущее «послесвечение», излучаемое на более длинных волнах.

Гамма-кванты легко разрушают молекулы, в том числе биологические, но, к счастью, не проходят через атмосферу. Регистрировать их можно только из космоса.

Это самый широкий диапазон электромагнитного спектра (табл. 2.7), поскольку он не ограничен со стороны высоких энергий. Мягкое гамма-излучение образуется при энергетических переходах внутри атомных ядер, более жесткое — при ядерных реакциях.

Таблица 2.7

Виды гамма-излучения			
мягкое	жесткое	сверхвысоких энергий	ультравысоких энергий
$E$ — от 100 кэВ	$E$ — от 10 МэВ = $10^7$ эВ	$E$ — от 100 ГэВ = $10^{11}$ эВ	$E$ — от 100 ТэВ = $10^{14}$ эВ
$T$ — от $20 \cdot 10^6$ К	$T$ — от $2 \cdot 10^{10}$ К	$T$ — от $2 \cdot 10^{14}$ К	$T$ — от $2 \cdot 10^{17}$ К
$\nu$ — от $2 \cdot 10^{19}$ Гц	$\nu$ — от $2 \cdot 10^{21}$ Гц	$\nu$ — от $2 \cdot 10^{25}$ Гц	$\nu$ — от $2 \cdot 10^{28}$ Гц
$\lambda$ — до $10^{-11}$ м	$\lambda$ — до $10^{-13}$ м	$\lambda$ — до $10^{-17}$ м	$\lambda$ — до $10^{-20}$ м

Гамма-кванты сверхвысоких энергий рождаются при столкновении заряженных частиц, разогнанных мощными электромагнитными полями космических объектов или земных ускорителей элементарных частиц. В атмосфере они разрушают ядра атомов, порождая каскады частиц, летящих с околосветовой скоростью. При торможении эти частицы испускают свет, который наблюдают специальными телескопами на Земле.

При энергии свыше  $10^{14}$  эВ лавины частиц прорываются до поверхности Земли. Их регистрируют сцинтилляционными датчиками. Где и как образуются гамма-лучи ультравысоких энергий, пока не вполне ясно. Земным технологиям такие энергии недоступны. Самые энергичные кванты —  $10^{20}$ – $10^{21}$  эВ, приходят из космоса крайне редко — примерно один квант в 100 лет на квадратный километр.

Впервые гамма-всплеск был случайно зарегистрирован в 1967 г. американскими военными спутниками «Vela».

Большинство наблюдаемых гамма-всплесков предположительно представляет собой сравнительно узкий луч мощного излучения, испускаемого во время вспышки сверхновой, когда быстро вращающаяся массивная звезда коллапсирует, превращаясь либо в нейтронную звезду, либо в кварковую звезду, либо в чёрную дыру. Подкласс гамма-всплесков — «короткие» всплески — по-видимому, происходят от другого процесса, возможно, при слиянии двойных нейтронных звёзд.

Источники гамма-всплесков находятся на расстояниях в миллиарды световых лет от Земли, что означает их чрезвычайную мощность и редкость. За несколько секунд вспышки высвобождается столько энергии, сколько Солнцем выделяется за 10 миллиардов лет. За миллион лет в одной галактике обнаруживаются лишь несколько подобных объек-

тов. Все наблюдаемые гамма-всплески происходят за пределами Млечного пути, кроме явления родственного класса, мягких повторяющихся гамма-всплесков, которые ассоциируются с магнетарами Млечного пути. Имеется предположение, что гамма-всплеск, произошедший в нашей Галактике, мог бы привести к массовому вымиранию всего живого на Земле.

Гамма-всплески регистрируются приблизительно раз в день или порядка одного всплеска на галактику раз в  $10^5$  лет.

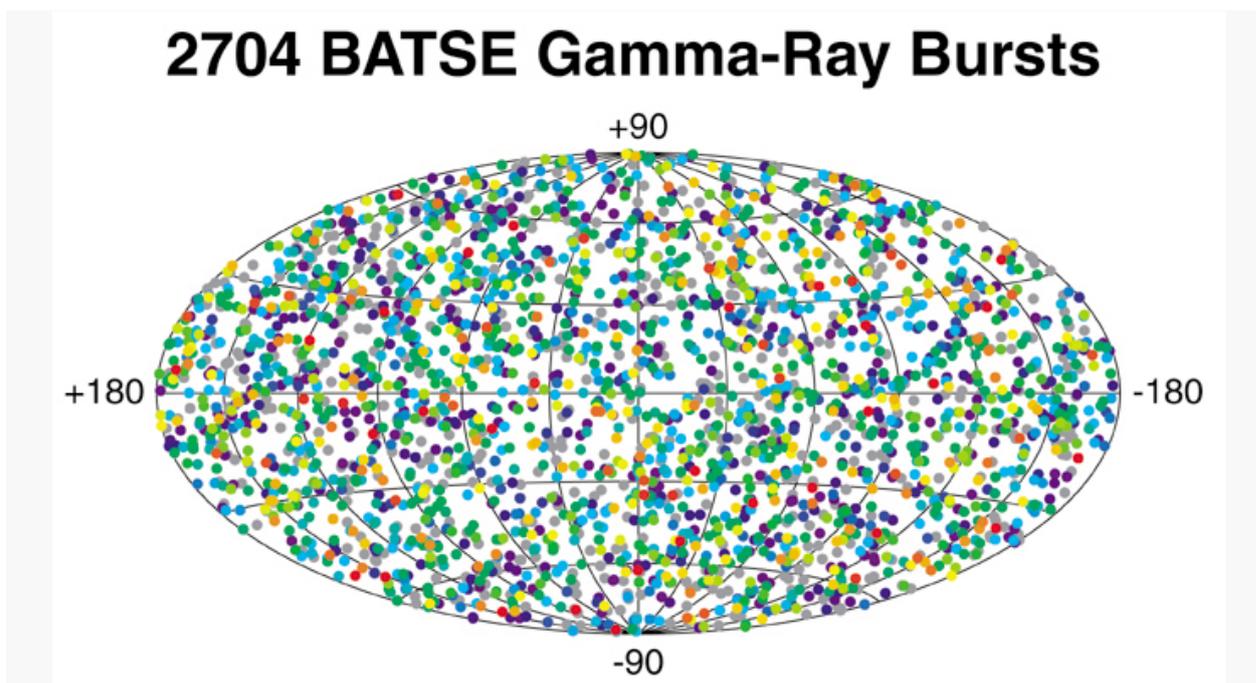


Рис. 2.19. Распределение по небесной сфере всех гамма-всплесков, обнаруженных в ходе миссии BATSE (G. Fishman et al., BATSE, CGRO, NASA)

В 1991-2000 гг. на орбите функционировала Комптоновская гамма-обсерватория, (Compton Gamma Ray Observatory - CGRO). На её борту был установлен детектор Burst and Transient Source Explorer (BATSE), предназначенный для регистрации гамма-всплесков. За время его работы было обнаружено 2704 события (то есть примерно по одному всплеску в сутки).

С помощью BATSE были подтверждены результаты ученых физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о том, что гамма-всплески распределены по небесной сфере изотропно, а не группируются в какой-либо области пространства, например, в центре галактики или вдоль плоскости галактического экватора. Из-за плоской формы Млечного пути, источники принадлежащие нашей Галактике, концентрируются у галактической плоскости. Отсутствие такого свойства у гамма-всплесков

является сильным доказательством их происхождения не в Млечном пути (рис. 2.19).

С запуском спутника Swift (2004) появилась возможность быстрого отождествления оптического и рентгеновского послесвечения гамма-всплесков.

Энергия гамма-всплесков составляет очень большую величину  $10^{51}$ - $10^{52}$  эрг, что на порядок больше энергии типичной сверхновой. Для некоторых гамма-всплесков оценка доходит до  $10^{54}$  эрг, то есть сравнима с энергией покоя Солнца. Причём эта энергия выделяется за очень короткое время.

То есть события, порождающие гамма-всплески, настолько мощные, что иногда их можно наблюдать невооружённым глазом, хотя они происходят на расстоянии в миллиарды световых лет от Земли.

В настоящее время различают два основных вида гамма-всплесков: длинные и короткие, имеющие существенные различия в спектрах и наблюдательных проявлениях. Так, длинные гамма-всплески иногда сопровождаются взрывом сверхновой звезды, а короткие — никогда. Механизм, в результате которого за столь короткое время в малом объёме выделяется столько энергии, до сих пор не вполне ясен. Наиболее вероятно, что он различен в случае коротких и длинных гамма-всплесков.

Длинные гамма-всплески, вероятно, связаны со сверхновыми Ib/c типа. В нескольких случаях оптически отождествлённый источник через некоторое время после всплеска показывал характерные для сверхновых спектры и кривые блеска. Кроме того, в большинстве случаев отождествления с галактиками они имели признаки активного звездообразования.

Далеко не все сверхновые типа Ib/c могут стать причиной гамма-всплеска. Это события, связанные с коллапсом в чёрную дыру ядра массивной ( $>25$  масс Солнца) звезды, лишённой водородной оболочки, имеющей большой момент вращения — так называемая модель коллапсара (*Woosley 1993*). По расчётам, часть ядра превращается в чёрную дыру, окружённую мощным аккреционным диском, который в течение нескольких секунд проваливается в дыру. Одновременно вдоль оси диска запускаются релятивистские джеты, пробивающие оболочку звезды и становящиеся причиной всплеска. Эта модель в принципе может описывать длинные (но не слишком длинные) гамма-всплески. Некоторое развитие этой модели было сделано польским учёным Б. Пачиньским, который использовал термин «взрыв гиперновой» (англ. *hypernova explosion*; *Paczynski, 1998*).

Таких случаев должно быть около 1 % от общего числа сверхновых.

Механизм коротких гамма-всплесков, возможно, связан со слиянием нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры. Из-за большого момента импульса такая система не может сразу целиком превратиться в чёрную дыру: образуется начальная чёрная дыра и аккреционный диск вокруг неё. По расчётам, характерное время таких событий должно составлять как раз доли секунд. К тому же отождествлённые короткие гамма-всплески лежат на систематически меньших расстояниях, чем длинные, и имеют меньшее энерговыделение.

Модель, подходящая для описания коротких гамма-всплесков, предложена советскими астрофизиками С.И. Блинниковым и др. — слияние двойных нейтронных звёзд.

**Околоземная сверхновая** — вспышка сверхновой звезды, которая происходит на сравнительно небольшом расстоянии от Земли (по различным оценкам, менее 100 световых лет), оказывая заметное воздействие на её биосферу.

Статистика сверхновых в других галактиках показывают, что вспышка сверхновой происходит в радиусе 10 парсек от Земли каждые 240 миллионов лет. Основным фактором воздействия сверхновой на биосферу планеты земного типа являются гамма-лучи. В случае с Землёй, гамма-лучи могут стать катализатором химической реакции в верхних слоях атмосферы земли, в результате которой молекулярный азот окислится, что приведёт к уменьшению озонового слоя. В свою очередь, это сделает биосферу Земли уязвимой для ультрафиолетового излучения и космических лучей. Особенно сильно пострадают фитопланктон и биоценозы коралловых рифов, что значительно обеднит морские пищевые цепочки.

Рассуждения о воздействии близкой сверхновой на Землю часто рассматривают в первую очередь массивные звёзды как возможные кандидаты для вспышек сверхновых II типа. Некоторые известные звёзды на расстоянии нескольких сотен световых лет от Солнца могут стать сверхновыми в течение ближайшего тысячелетия. Одной из таких звёзд является Бетельгейзе, красный сверхгигант, находящийся на расстоянии 640 световых лет от Земли. Однако, вряд ли она будет способна оказать заметное влияние на происходящие на Земле процессы.

Для того, чтобы толщина озонового слоя уменьшилась наполовину сверхновая II типа должна вспыхнуть ближе 8 парсек (26 световых лет) от Земли. Подобные оценки основываются на моделировании атмосферы и единственном измеренном потоке излучения от SN 1987A, сверхновой II типа, вспыхнувшей в 1987 году в Большом Магеллановом Облаке.

Согласно одним оценкам, сверхновые II типа вспыхивают на расстоянии менее 10 парсек от Земли раз в 2-20 миллиардов лет, по другим — до 1 раза в 100 миллионов лет. Свидетельствами относительно близких вспышек сверхновых являются остаток сверхновой в Парусах (примерно 800 световых лет, 12000 лет назад) и Геминга (примерно 550 световых лет, 300000 лет назад).

Потенциально наиболее опасными считаются близкие сверхновые типа Ia. Сверхновая типа Ia, способная оказать воздействие на Землю, может появиться внезапно и в малоизученной звёздной системе на расстоянии менее 10 парсек (33 световых года), чтобы оказать воздействие на Землю. Ближайшей известной системой, в которой может произойти подобная вспышка, является ИК Пегаса. В настоящее время считается, что к моменту, когда возникнет непосредственная угроза вспышки, данная система удалится от Солнца на безопасное расстояние.

Изучение продуктов распада короткоживущих радиоактивных изотопов показывает, что близкая сверхновая существенно повлияла на элементный состав Солнечной системы 4,5 миллиарда лет назад, и, возможно, даже вызвала формирование нашей планетной системы. Синтез тяжёлых элементов в сверхновых в ходе эволюции Вселенной сделал возможным существование на Земле жизни.

В 1996 году астрономы Иллинойского университета предложили теорию, согласно которой остатки прошлых сверхновых могут быть обнаружены на Земле в форме следов изотопов металлов в каменных пластах коры Земли. Впоследствии исследователями из Мюнхенского технического университета были обнаружены избыточные количества железа-60 в камнях, поднятых из глубин Тихого океана. В верхних 2 сантиметрах осадков камня, формировавшихся в течение 13 миллионов лет, были найдены 23 атома этого изотопа железа. По оценкам, вспышка сверхновой должна была произойти в последние 5 миллионов лет, иначе для объяснения такого количества атомов она должна была быть настолько близкой, что вызвала бы массовое вымирание, которого в этот период времени не происходило. В то же время, расстояние до сверхновой не должно было превышать 30 парсек.

*Adrian L. Melott* и др. (2004) предположили, что гамма-всплески от «опасно близких» вспышек сверхновых происходят 2 и более раз за миллиард лет и сочли их причиной Ордовикско-силурийского вымирания, в ходе которого погибло более 60 % морских беспозвоночных.

В 1998 году был открыт наложившийся на остаток сверхновой в Парусе ещё один остаток сверхновой, получивший обозначение RX J0852.0-4622. Независимо от этого были обнаружены исходящие из этого участка неба гамма-лучи, являющиеся продуктом распада титана-44

(период полураспада примерно 60 лет), указывающие, что вспышка должна была состояться относительно недавно (около 1200 года нашей эры), однако исторические свидетельства отсутствуют. Интенсивность потока гамма- и рентгеновских лучей указывают на то, что сверхновая вспыхнула относительно недалеко от Земли (200 парсек или 660 световых лет).

В 2009 году в ледяном покрове Антарктиды на глубинах, соответствующих взрывам сверхновых 1006 и 1054 года, а также примерно 1060 года, были обнаружены нитраты, которые, по-видимому, сформировались из окислов азота, образование которых было спровоцировано гамма-излучением сверхновых.

В последние годы астрофизиками активно изучаются транзистентные источники гамма-излучения объектов, природа которых окончательно не установлена. По одной из моделей - это сильно замагниченные нейтронные звезды - магнитары. Перестройка их магнитного поля и приводит к вспышкам. Согласно другим представлениям – это могут явления в объектах внегалактического происхождения или вспышки гиперновых.

27 декабря 2004 года в Солнечную систему пришло гамма-излучение от объекта, находящегося в центральной области Галактики. В периоды активности данных объектов от них регистрируется в год несколько вспышек со светимостью  $\sim 10^{33}$ - $10^{34}$  Вт в мягком гамма-диапазоне. Вспышка от источника SGR 1806-20 была гораздо мощнее, порядка 1 эрг/см<sup>2</sup>с (возможно в несколько раз больше, т.к. все наблюдавшие за данным событием приборы зашкалило). Вспышка была настолько сильной, что наблюдалось ее отражение от Луны. Это неожиданно много для данного класса объектов и слишком много для высокочувствительных орбитальных обсерваторий, но для Земли 1 эрг на квадратный сантиметр – очень маленькая энергия, которая не могла серьезно повлиять на какие-либо протекающие на нашей планете процессы (хотя изменение ионизации верхних слоев атмосферы было отмечено) и, тем более, угрожать жизни на планете ([www.astronet.ru](http://www.astronet.ru) - 23.02.2005).

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

Ряд авторов считает, что причиной массового вымирания, произошедшего примерно 450-443 млн. лет назад - во время великого ордовикского вымирания (*GOBE - Great Ordovician Biodiversification Event*) - был мощный гамма-всплеск, вызванной взрывом сверхновой в относительной близости от Солнечной системы. Тогда по данным палеобиологии исчезли приблизительно 60% видов морских беспозвоночных (рис. 2.20).

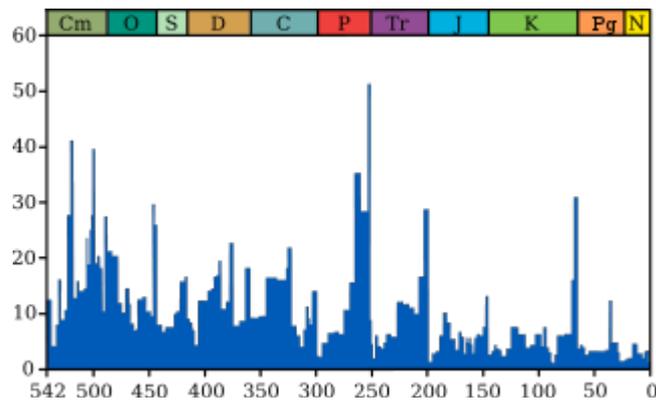


Рис. 2.20. Вымирание морской фауны в течение фанерозоя. Для каждого интервала времени показано, какой процент существовавших тогда родов не дождался следующего интервала. Показаны вымирания не всех родов, а лишь сохранившихся в окаменелостях.

Во время ордовикского вымирания наблюдается несколько значительных изменений соотношения изотопов углерода и кислорода в биологических образцах. Это может указывать на несколько различных близко расположенных событий или отдельных фаз в рамках одного события.

В это время большинство сложных многоклеточных организмов обитало в море. Вымирает около 100 морских семейств, что составляет до 49% от всех родов животного мира (более надежная оценка по сравнению с количеством видов). Многие группы брахиоподы мшанок были уничтожены, наряду со многими из трилобитов, семействами конодонтовых и граптолитов.

Статистические анализы потерь морских организмов для этого времени показывают, что уменьшения разнообразия в основном обусловлено резким скачком вымирания, а не уменьшением видообразования.

Выделяют пять великих массовых исчезновений. Около 443 млн лет назад завершилось великое ордовикское вымирание. За 3,3–1,9 млн лет исчезло 57% родов, 86% видов организмов. Великое девонское вымирание (359 млн лет назад) длилось не более 2 млн лет, вымерло 35% родов и 75% видов. Во время великого пермского вымирания (258,3 млн лет назад), которое продолжалось не более нескольких десятков тысяч лет, погибло 56% родов и 96% видов. Великое триасовое вымирание проходило в несколько этапов, длилось около 16 млн лет и завершилось около 200 млн лет назад исчезновением 47% родов и 80% видов. Великое меловое вымирание произошло около 65 млн лет назад. В этот период погибло 40% родов и 76% видов. Учёные по-разному оценивают его продолжительность – от года до 2,5 млн лет.

Гипотезы вспышки гамма-излучения придерживается в настоящий момент небольшое количество учёных. Предполагается, что причиной начала вымирания является вспышка гамма-излучения от сверхновой, находящейся в шести тысячах световых лет от Земли в ближнем по от-

ношению к Земле рукаве Млечного пути (*Melott, et al, 2004*). Десятисекундная вспышка уменьшила озоновый слой атмосферы Земли примерно наполовину, подвергнув живущие на поверхности организмы, включая отвечающие за планетарный фотосинтез, сильному ультрафиолетовому облучению. Однако пока не найдено однозначных доказательств того, что рядом происходили подобные гамма-вспышки

Современные модели гамма-всплесков утверждают (*Thomas, et al., 2004*), что за последний миллиард лет Земля могла быть облучена гамма-всплеском, произошедшим в нашей Галактике, с расстояния не более 2 кпк. Эффект подобного облучения был исследован в двумерной модели атмосферы. При всплеске с экспозицией  $100 \text{ кДж/м}^2$  длительностью 10 секунд содержание озона в среднем уменьшалось на 35% (в некоторых областях на 55%). Начальный уровень озона восстановился примерно через 5 лет.

В 2012 г. исследователи обнаружили доказательства того, что наша планета в Средние века подверглась воздействию сильной радиации, однако научное сообщество до сих пор не сошло во мнении о космических источниках этого явления. (*Hambaryan, Neuhauser, 2012*)

Оказалось, что древние японские кедровые деревья содержат необычно высокий уровень радиоактивного изотопа углерода-14. Параллельно с этим во льдах Антарктиды был выявлен высокий уровень бериллия-10.

Исследуя годовые кольца кедров и пробы полярных льдов, ученые определили, что выброс энергии мог достичь Земли в 774 или 775 году н.э. Сначала исследователи сделали предположение, что его источником могла стать сверхновая звезда, однако затем эта гипотеза была признана несостоятельной, поскольку излучение от такого взрыва должно было бы фиксироваться телескопами до сих пор.

Другая группа опубликовала свое исследование о том, что выброс энергии могла вызвать необычайно мощная вспышка (супервспышка) на Солнце. Однако ряд других исследователей с этими выводами не согласен, полагая, что выделившаяся в ходе «супервспышки» энергия не может объяснить высокий уровень углерода-14 и бериллия-10 в кедровых деревьях и льдах.

Согласно расчетам, источник гамма-излучения находился в пределах от 3 до 12 тысяч световых лет от Земли, то есть в нашей Галактике.

Если гамма-всплеск действительно произошел на таком расстоянии, то наша атмосфера поглотила дошедшую до нее радиационную волну, оставив след из изотопов, который в итоге сохранился в кедровых деревьях и во льдах. По мнению ученых, в структуре вспышки не было видимой части спектра. Хотя излучение было мощным, люди в Средние века могли практически не заметить его.

Если гамма-всплеск произойдет на таком же расстоянии от Земли, что и в Средние века, множество спутников выйдет из строя. А если он случится на еще более близком расстоянии — в нескольких сотнях световых лет от Земли, — то выброс энергии такой силы разрушит озоновый слой, неся угрозу жизни на нашей планете.

Профессор Нойхойзер считает маловероятным, чтобы в ближайшее время Землю затронула еще одна подобная вспышка, но, если она все же произойдет, ее воздействие на деятельность человека окажется более ощутимым. Однако, по мнению Нойхойзера, вероятность такого развития событий чрезвычайно мала.

С другой стороны, профессор Адриан Мелотт считает, что, несмотря на существование гипотезы короткого гамма-всплеска, результаты научных исследований его команды свидетельствуют о том, что «супервспышка» на Солнце была в те времена гораздо более вероятной. Свои выводы он строит на наблюдениях за звездами, подобными Солнцу, в нашей Галактике.

**Гиперновая** — взрыв сверхмассивной звезды после коллапса её ядра. С начала 1990-х годов были замечены столь мощные взрывы звёзд, что сила взрыва превышала мощность взрыва обычной сверхновой примерно в 10 раз, а энергия взрыва превышала  $10^{45}$  Дж. Многие из этих взрывов сопровождались длинными гамма-всплесками. Сегодня термин «гиперновая» используется также для описания взрывов звёзд с массой от 100 до 150 и более масс Солнца.

Астрономы называют гиперновыми взрывы массивных звезд, которые происходят после гравитационного коллапса их ядер. Считается, что это редкое явление происходит раз в 100 тыс. или миллион лет. На данный момент известно о восьми произошедших в прошлом взрывах гиперновых, однако все они были зафиксированы за пределами Млечного пути. Специалисты Японского аэрокосмического агентства в 2013 г. обнаружили следы взрыва гиперновой звезды, который произошел около 3 млн лет назад в пределах нашей Галактики.

Излучение остатков гиперновой удалось зафиксировать в рентгеновском диапазоне с помощью прибора, установленного на японском модуле «Кибо» Международной космической станции. По данным астрономов, взорвавшаяся звезда находилась в созвездии Лебедя на расстоянии 5,5 тыс световых лет от нашей планеты. Ее масса превышала солнечную в несколько десятков раз, а мощность взрыва превзошла показатель обычной сверхновой по меньшей мере в 100 раз. Космическая катастрофа оставила после себя облако газа диаметром почти 1 тыс световых лет. При наблюдении с Земли эта гиперновая сияла на ночном небе в 40 раз ярче, чем Луна.

Недавно была высказана идея (*Smith et al., 2003*) о том, что заметная доля энергии жесткого излучения, поглощаемого в основном атмосферой, может быть переизлучена вторичными электронами в результа-

те процессов комптоновского рассеяния и рентгеновского фотопоглощения в биологически и химически активное ультрафиолетовое излучение (рис. 2.21). Доля переизлученной энергии может достигать 1% даже с учетом воздействия озонового слоя, т.е. солнечные вспышки оказывали на первичные земные организмы гораздо более сильное мутационное воздействие, чем считалось ранее

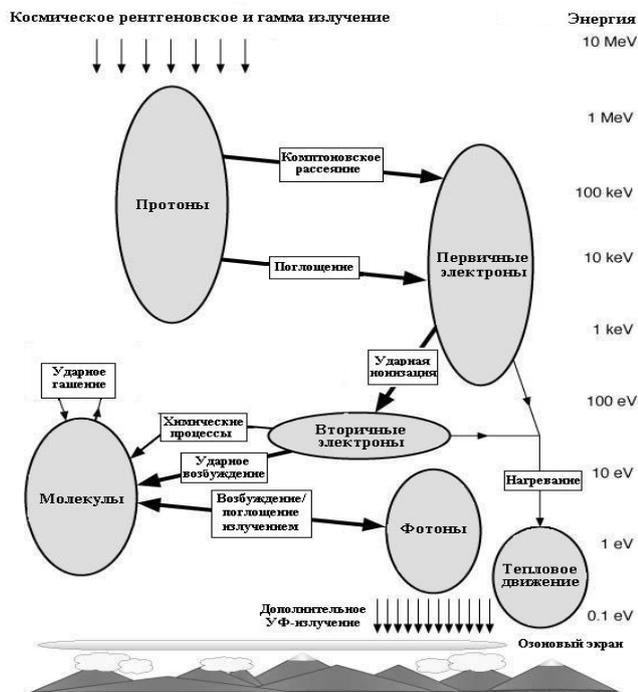


Рис. 2.21. Образование УФ-радиации под действием жестких космических излучений

В подтверждение этому в последнее время были получены данные, что при достижении рентгеновских вспышек Солнца марсианских окрестностей, они заставляют ионосферу планеты вырабатывать дополнительные ионы и электроны ([www.spcasnews.ru](http://www.spcasnews.ru). – 23.02.2006).

Это еще раз подтверждает предположение, что потоки ионизирующих излучений, включающих космические лучи и электромагнитные излучения могли играть важную роль в становлении климата Земли и образовании и эволюции на ней биологической жизни.

## 2.5. Космические излучения и радиационная проблема для человека

Проблема радиационной безопасности связана, в основном, с техногенной деятельностью человечества. Однако космические воздействия в виде ионизирующих корпускулярных и электромагнитных излу-

чений в некоторых случаях могут оказаться определяющими в данной проблеме.

**Фон радиоактивный** - естественный радиационный фон, ионизирующие излучения, источниками которых являются космические лучи и естественно распределённые в природе радионуклиды. Космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из мирового пространства.

Естественные радионуклиды принадлежат к сильно рассеянным элементам и повсеместно присутствуют в окружающей среде, а также в животных и растительных организмах. Фоновому облучению подвергаются все живые организмы Земли. В зависимости от высоты над уровнем моря и содержания радионуклидов в окружающей среде радиоактивный фон колеблется в значительных пределах. В отдельных районах с высоким содержанием природных радионуклидов он может достигать 1000 *мрад/год* и больше.

Жизнь на Земле возникла и развивалась в условиях воздействия ионизирующих излучений. Биологическое значение радиоактивного фона, однако, окончательно ещё не выяснено. Считают, что часть наследственных изменений – *мутаций* у животных и растений связана с радиоактивным фоном.

За счёт космического излучения большинство населения получает дозу 35 мбэр в год. Такую же дозу (35 мбэр/год) человек получает от внешних земных источников естественного происхождения. Доза внутреннего облучения от естественных источников составляет в среднем 135 мбэр/год (3/4 этой дозы даёт радон и продукты его распада).

Таким образом, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения человека от естественных источников радиации в среднем равна около 200 мбэр/год.

Области вблизи экватора, находящиеся на уровне моря, получают наименьшую дозу космического излучения, примерно равную 0,35 мЗв/год. На широте 50° доза космического излучения составляет 0,5 мЗв/год.

С ростом высоты над уровнем моря мощность эквивалентной дозы космического излучения увеличивается. На высоте 4500 м доза облучения из космоса составляет 3 мЗв/год, а на вершине пика Эвереста (8848 м над уровнем моря), соответствующий показатель равен 8 мЗв/год.

Основной вклад в общий радиационный фон у орбиты Земли вносят солнечные КЛ.

Увеличение потока космических лучей приводит к нарушению радиосвязи на коротких волнах, сбоям в работе электроники, а крупные вспышки на Солнце сопровождаются потоками радиации, опасными для здоровья космонавтов. Солнечные вспышки представляют большую радиационную опасность во время космических полетов. Космические лучи, идущие от Солнца, в основном состоят из протонов широкого энергетического спектра (энергия протонов до 100 МэВ), Заряженные частицы от Солнца способны достигать Земли через 15-20 мин после того, как вспышка на его поверхности становится видимой. Длительность вспышки может достигать нескольких часов.

### **Радиация. Основные понятия. Дозы.**

Поглощенная доза. 1 Грей (Гр)=100 рад=1 Дж/кг.

Эквивалентная доза. 1 Зиверт (Зв)=100 бэр=1 Дж/кг.

- космическое излучение в общем составляет 410 мкЗв/год, гамма-излучение,  $^{40}\text{K}$  – 150 мкЗв/год;

- радионуклиды ториевого и уранового рядов 160 и 100 мкЗв/год;

- космогенные нуклиды  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$  – 15 мкЗв/год.

#### **Последствия при однократном облучении:**

- менее 50 бэр – отсутствие клинических симптомов;

- 50÷100 бэр – незначительное недомогание;

- 100÷200 бэр – легкая степень лучевой болезни;

- 200÷400 бэр – тяжелая степень лучевой болезни;

- 600 бэр и более – крайне тяжелая степень (летальный исход).

Предельно допустимая доза для жителей России составляет 5 мЗв/год.

Летальная доза (50%-поражение), приводящая к гибели половины пораженного взрослого населения в течение 60 дней – 4 Зв.

Доза риска – 60 мЗв.

Для рыб и птиц  $\text{ЛД}_{50}=2000$  бэр, для растений  $\text{ЛД}_{50}=10^3-10^5$  бэр, для насекомых – порядка  $10^5$  бэр.

С высотой, в пределах колебаний рельефа Земли на каждые сто метров над уровнем моря, годовая эффективная доза увеличивается на 10 мкЗв за счет уменьшения слоя атмосферы. Начиная с высоты 1,5-2,0 км этот прирост увеличивается

Поглощенная мощность дозы космического излучения в воздухе на уровне моря равна 32 нГр/час и формируется в основном мюонами. Для нейтронов на уровне моря мощность поглощенной дозы составляет 0,8 нГр/час и мощность эквивалентной дозы составляет 2,4 нЗв/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около 0,35 мЗв в год.

Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Однако облучение это неравномерно. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого - магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения. Наибольший эффект действия космического внешнего облучения связан с зависимостью космического излучения от высоты (рис. 2.22).

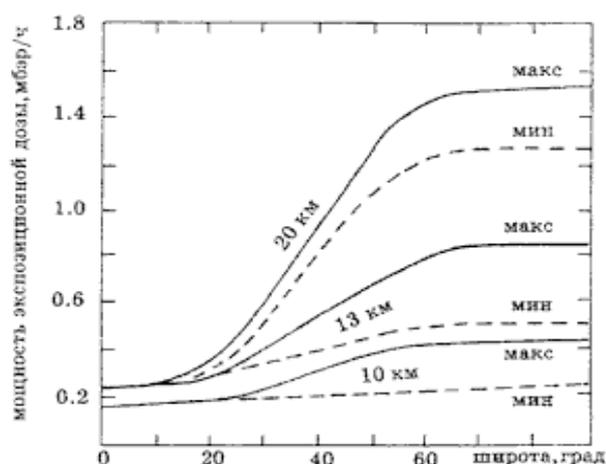


Рис. 2.22. Величина солнечного излучения во время максимальной и минимальной активности солнечного цикла в зависимости от высоты местности над уровнем моря и географической широты

Здесь дозы возрастают примерно вдвое каждые 2,2 км. Вначале, до высот в 20-30 км, это в основном связано с частицами ШАЛ, и даже до больших высот, если нет высыпаний релятивистских электронов из радиационных поясов и СКЛ от солнечных вспышек. На высотах орбитальных станций (~400 км) дозы радиации превышают величины, наблюдающиеся на поверхности Земли, в ~200 раз в основном за счёт частиц радиационных поясов.

Величина дозы радиоактивного облучения, получаемая человеком, зависит от географического местоположения, образа жизни и характера труда. Например, на высоте 8 км мощность эффективной дозы составляет 2 мкЗв/час, что приводит к дополнительному облучению при авиаперевозках.

При трансконтинентальном перелете на обычном турбовинтовом самолете, летящем со скоростью ниже скорости звука ( $T_{\text{полета}} \approx 7,5$  часа), индивидуальная доза, получаемая пассажиром (50 мкЗв), на 20 % больше, чем доза (40 мкЗв), получаемая пассажиром сверхзвукового самолета в то время, когда летали Конкорды, ( $T_{\text{полета}} \approx 2,5$  часа), хотя последний подвергается более интенсивному облучению из-за большей высоты полета. Коллективная эффективная доза от глобальных авиаперевозок достигает  $10^4$  чел-Зв, что составляет на душу населения в мире в среднем около 1 мкЗв за год, а в Северной Америке около 10 мкЗв.

Весьма большую опасность представляет излучение радиационных поясов для космонавтов. Пилотируемые полеты осуществляют на высотах до 500 км, чтобы избежать пребывания космических кораблей в радиационные пояса. Однако, вследствие существования Южно-

Атлантической аномалии геомагнитного поля (ЮАА) радиационные пояса в этом районе «провисают» над Землей (рис. 2.23), создавая потоки радиации в районе низких орбит космических аппаратов, например, Международной космической станции (штриховая линия). Потоки радиации в районе ЮАА испытывают солнечно-циклические вариации (правая часть рисунка). В годы минимума солнечной активности потоки радиации в этой области более мощные, чем в максимуме (Панасюк, 2006), то есть основным фактором их формирования являются ГКЛ.

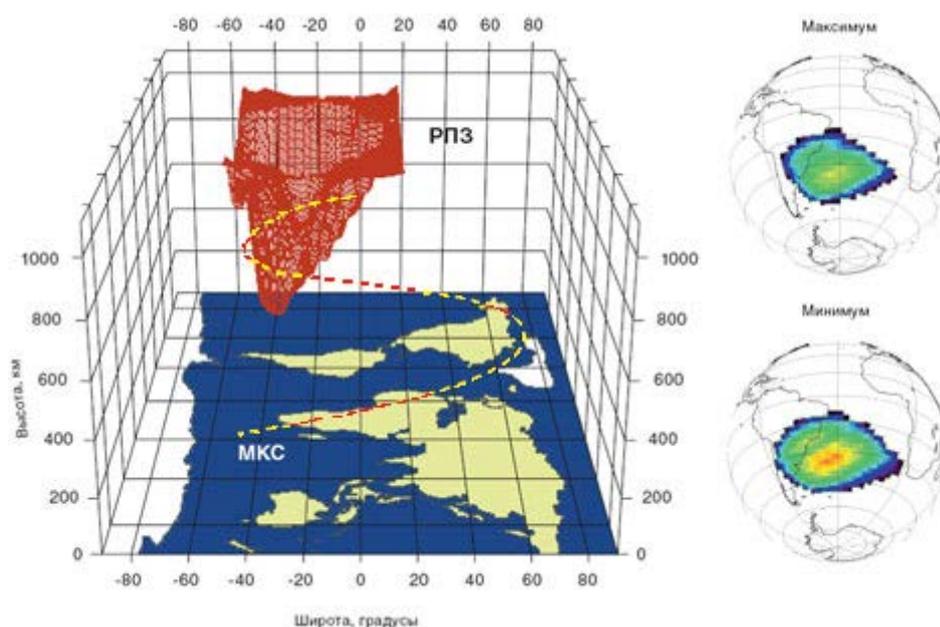


Рис. 2.23. Южно-Атлантическая магнитная аномалия

Но, в общем, на околоземной орбите доза радиации определяется преобладающим воздействием радиационных поясов Земли, влияние же космических лучей составляет лишь  $\sim 20\%$ .

В случае длительных космических полетов радиационный риск — немаловажный фактор безопасности. Космонавт при полете на Марс даже при наличии защиты в течение года может получить дозу облучения в несколько рад. Для сравнения люди, проживающие вблизи атомных электростанций или в местах газоаэрозольных выбросов, получают около  $10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$  рад/год.

За весь период полета даже при защите  $\sim 10$  г/см<sup>2</sup> ( $\sim 3,7$  см алюминия) доза поглощенной радиации от СКЛ составит величину 10-70 рад.

Энергия ГКЛ на много порядков превышает энергию СКЛ. Разработать конструкцию радиационной защиты космического аппарата от ГКЛ при разумных толщинах стенок, определяющих его вес, в настоящее время технически не представляется возможным (Новиков, 2006).

Отдельным вопросом стоит вопрос об изучении механизмов воздействия космических лучей на биологические организмы методами радиационной биологии.

Вода, основное вещество биологических тканей, под действием радиации ионизируется, образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключён и сценарий прямого повреждения молекулы ДНК при торможении тяжёлой заряженной частицы.

Ниже рассмотрим механизмы воздействия ионизирующих излучений на органические вещества.

#### ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МАКРОМОЛЕКУЛЫ (химическая стадия)

##### **Действие ионизирующих излучений на белки.**

До 20% поглощённой энергии будет локализоваться в белках.

Под действием **ионизирующих излучений** из молекулы белка выбивается электрон. Образуется дефектный участок, лишённый электрона – дырка. Дырка мигрирует по полипептидной цепи за счёт переброски соседних электронов до тех пор, пока не достигнет участка с повышенными электрондонорными свойствами. В этом месте возникают свободные радикалы у пептидных группировок. Такие события происходят в результате прямого действия ионизирующего излучения.

При косвенном действии ионизирующего излучения образование свободных радикалов происходит при взаимодействии с продуктами радиолиза воды. Образование свободных радикалов влечёт за собой изменения структуры белка:

- разрыв водородных, пептидных, дисульфидных связей;
- разрушение аминокислот в цепи;
- образование сшивок и агрегатов;
- нарушение вторичной и третичной структуры белка.

Такие нарушения в структуре белка приводят к нарушению всех его функций (ферментативной, гормональной, сократительной и др.). На-

рушение ферментативной функции – образование «бешеных ферментов».

##### **Действие ИИ ионизирующего излучения на нуклеиновые кислоты.**

Около 7% поглощённой дозы приходится на ядерную ДНК.

Механизм повреждения сходен с повреждением белка: выбивание электрона и образование «дырки», миграция её по полинуклеотидной цепи (при этом пробегается несколько сотен азотистых оснований ) до участка с повышенными электрондонорными свойствами. Таким местом будет место локализации азотистого основания, чаще тимина или

цитозина. Возникают свободные радикалы этих оснований. Это прямое действие. При косвенном действии к образованию свободных радикалов приводит взаимодействие с продуктами радиолиза воды.

Образование свободных радикалов приводит к нарушению структуры ДНК:

- однонитевые и двунитевые разрывы;
- модификация азотистых оснований;
- образование сшивок – тиминовых димеров;
- нарушение ДНК-мембранного комплекса;
- сшивки ДНК – ДНК;
- сшивки ДНК с белком нуклеопротеидного комплекса.

При дозе 1 Гр в каждой клетке человека повреждается 5000 азотистых оснований, возникает 1000 одиночных и 10-100 двойных разрывов.

Определённое число одиночных разрывов образуется даже при малых дозах излучения, но они не приводят к поломкам молекулы ДНК, т.к. куски повреждённой молекулы прочно удерживаются на месте водородными связями с противоположной нитью ДНК.

Репарация одиночных разрывов идёт быстро и эффективно – эксцизионная репарация:

- фермент эндонуклеаза узнаёт повреждённый участок и производит «разрез»;
- фермент экзонуклеаза вырезает повреждённый участок (иногда и прилегающие);
- ДНК-полимераза застраивает дефект новыми нуклеотидами с использованием неповреждённой нити в качестве матрицы;
- лигазы соединяют новый сегмент с интактными участками.

Большинство одиночных разрывов репарируются даже в летально облучённых клетках. Поэтому одиночные разрывы не являются причиной, определяющей гибель клетки. Однако нерепарированные одиночные разрывы могут в последующем привести к образованию двойных разрывов.

Двойные разрывы могут возникнуть в результате единичного акта ионизации либо при совпадении одиночных разрывов на комплементарных нитях. Двойные разрывы опасны для клетки, т.к. они практически не репарируются и служат непосредственной причиной возникновения хромосомных aberrаций.

Основными видами хромосомных aberrаций являются:

- фрагментация хромосом;
- образование хромосомных мостов, дицентриков, кольцевых хромосом;
- появление внутри- и межхромосомных обменов.

Часть aberrаций (например, мосты) механически препятствуют делению клетки. Появление обменов, ацентрических фрагментов приводит к неравномерному разделению хромосом и утрате генетического материала, а это вызывает гибель клеток из-за недостатка метаболитов, синтез которых кодировался утраченной частью ДНК.

#### **Действие ионизирующего излучения на липиды.**

Под влиянием облучения происходит образование свободных радикалов ненасыщенных жирных кислот, которые при взаимодействии с кислородом образуют перекисные радикалы, а они, в свою очередь, реагируют с нативными жирными кислотами. Это процесс перекисного окисления липидов.

Т.к. липиды – основа биомембран, то это повлечёт за собой изменение их свойств. А поскольку клетка представляет собой систему взаимосвязанных мембран и многие процессы клеточного метаболизма проходят именно на мембранах, то в клетке нарушаются биохимические процессы. Выражено нарушение энергетического обмена, что связано с повреждением митохондрий.

Нарушение целостности наружной мембраны клетки приводит к сдвигу ионного баланса клетки из-за выравнивания концентраций натрия и калия.

#### **Действие на углеводы.**

Под действием ионизирующего излучения происходит отрыв атома водорода от кольца, образуются свободные радикалы, а затем перекиси.

Из продукта распада углеводов – глицеринового альдегида – синтезируется метилглиоксаль – вещество, ингибирующее синтез ДНК, белка, подавляющее деление клеток.

Чувствительна к облучению гиалуроновая кислота, являющаяся составным элементом соединительной ткани.

### **РЕАКЦИЯ КЛЕТОК НА ОБЛУЧЕНИЕ (биологическая стадия)**

Возможны три типа реакций:

- 1) радиационный блок митозов;
- 2) митотическая (репродуктивная) гибель клетки;
- 3) интерфазная гибель клетки.

Наиболее универсальной реакцией клетки на воздействие ионизирующего излучения является временная задержка деления или *радиационный блок митозов*. Длительность его зависит от дозы: на 1 Гр дозы задержка на 1 час. Проявляется этот эффект независимо от того, выживет ли клетка в дальнейшем. Причём с увеличением дозы облучения

увеличивается не число реагирующих клеток, а время задержки деления каждой облучённой клетки. Эта реакция имеет огромное приспособительное значение: длительность интерфазы, оттягивается вступление клетки в митоз, создаются благоприятные условия для нормальной работы системы репарации ДНК.

При больших дозах, чем необходимо только для радиационного блока митозов, развивается митотическая гибель клетки. Это полная потеря клеткой способности к размножению. Это не относится к клеткам, не делящимся или делящимся редко. В клетке не выражены дегенеративные процессы.

Варианты митотической гибели:

- 1) клетка гибнет в процессе одного из первых четырёх пострадиационных митозов (показателем выживаемости клетки является её способность проходить 5 и более делений);
- 2) облучённые клетки после первого пострадиационного митоза формируют так называемые «гигантские» клетки (чаще в результате слияния «дочерних» клеток), такие клетки способны делиться не более 2-3 раз, после чего погибают.

Основная причина митотической гибели клетки – повреждение хромосомного аппарата клетки, приводящее к дефициту синтеза ДНК.

Инфазная гибель клетки.

Наступает до вступления клетки в митоз. Для большинства соматических клеток человека она регистрируется после облучения в дозах в десятки и сотни Гр. Лимфоциты (радиочувствительные клетки) гибнут по этому механизму даже при небольших дозах.

В клетке наблюдаются различные дегенеративные процессы вплоть до её лизиса.

Механизм интерфазной гибели.

За счёт разрывов в молекуле ДНК нарушается структура хроматина. Изменения ДНК-мембранного комплекса вызывают остановку синтеза ДНК. Повреждение мембраны лизосом приводит к выходу из них ферментов – протеаз и ДНК-аз. Эти ферменты разрушают ДНК, что ведёт к пикнозу ядра. Повреждение мембран митохондрий ведёт к выходу из них кальция, который активирует протеазы. В итоге клетка лизируется.

На рис. 2.24 демонстрируется эффект воздействия тяжёлых частиц на биологическую ткань: число повреждённых клеток в случае воздействия частиц, более тяжёлых, чем протоны, резко возрастает (Панасюк, 2005).

Взаимодействие тяжёлых частиц ГКЛ с молекулой ДНК в пределах её линейных размеров ~ 20 ангстрем может приводить к нарушению

ям в её структуре двумя путями: либо через образование свободных радикалов, либо напрямую – путём повреждения самой молекулы.

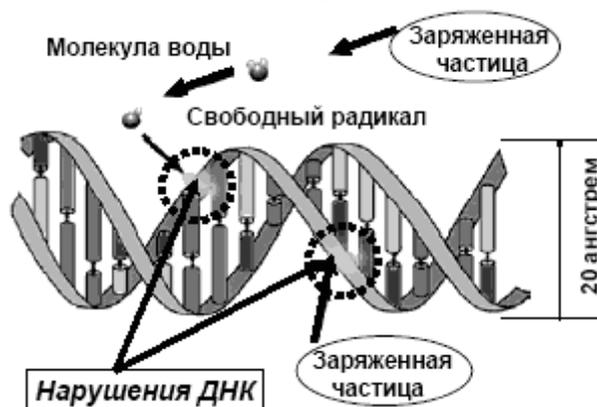


Рис. 2.24. Взаимодействие тяжелых частиц ГКЛ с ДНК

Альфа-частицы (ядра гелия) и другие тяжёлые частицы космических лучей воздействуют на клетки более эффективно, чем электроны – лёгкие частицы. Тяжёлые частицы теряют в веществе гораздо больше энергии на единицу пути, нежели более лёгкие (рис. 2.25): при одной и той же дозах радиации от электронов и тяжёлых частиц, число повреждённых клеток в последнем случае больше.

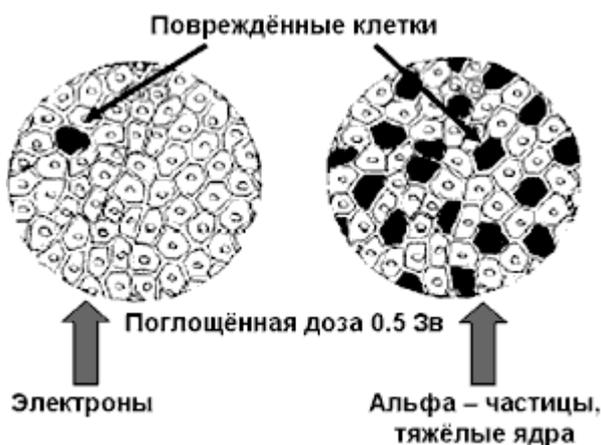


Рис. 2.25. Взаимодействие КЛ с клетками

Здесь надо отметить, что на сегодняшний день специалисты по космической медицине и биологии не способны дать исчерпывающий ответ. Есть проблемы, которые надо решать в будущих исследованиях. Например, само по себе нарушение ДНК необязательно должно привести к раку. Более того, молекулы ДНК, получив сигнал опасности о нарушении своей структуры, стараются включить «программу ремонта» самостоятельно. И это происходит, порой, небезуспешно. Любая физическая травма, тот же удар молотком по телу, вызывает гораздо больше

нарушений на молекулярном уровне, чем радиация. Но клетки восстанавливают ДНК, и организм «забывает» об этом событии.

Стабильность ДНК чрезвычайно велика: вероятность мутации не превышает 1 на 10 миллионов вне зависимости от локальных условий. Это – фантастическая надёжность биологической структуры, ответственной за воспроизводство жизни. Даже сверхсильные радиационные поля не могут её нарушить. Есть ряд бактерий, которые не мутируют в огромных по мощности радиационных полях, достигающих многих тысяч Гр. Такую дозовую нагрузку не выдерживает даже кристаллический кремний и многие конструкционные материалы.

Проблема здесь, как это представляется биологам, состоит в том, что может быть сбой в программе ремонта: например, хромосома в результате может оказаться в совсем ненужном месте в структуре ДНК. Вот эта ситуация становится уже опасной. Однако и здесь возможна многовариантность последовательности событий.

Во-первых, надо учесть, что процесс мутации – размножении «неправильных клеток» занимает большой промежуток времени. Биологи полагают, что могут пройти десятилетия между первичным неблагоприятным воздействием и негативной реализацией этого эффекта. Это время необходимо, чтобы сформировать новообразование клеток, подвергнутых мутациям, состоящее из многих миллиардов.

Поэтому прогноз долговременного развития неблагоприятных последствий радиационных воздействий на большие промежутки времени имеет очень малую устойчивость.

Другая сторона проблемы воздействия радиации на биологические структуры, состоит в том, что недостаточно изучен процесс воздействия малых доз. Не существует прямой связи между величиной дозы – количеством радиации – и радиационными повреждениями. Как полагают биологи, разные типы хромосом, различным образом реагируют на радиацию. Одним из них для проявления эффекта требуются значительные дозы радиации, а другим достаточно и сверхмалых.

Кроме того, не вполне ясны последствия воздействия на биологические структуры одновременно двух или нескольких видов радиации: скажем, ГКЛ и СКЛ, или ГКЛ, СКЛ и радиационных поясов. Состав этих видов космического излучения разный, и каждый из них может приводить к своим последствиям. Но не ясен эффект их совместного воздействия.

Таким образом, основной причиной гибели клеток, а также отдаленных последствий лучевого воздействия является поражение ДНК. Уже при дозе облучения 1 Гр в каждой клетке человеческого организма повреждаются 5000 оснований молекул ДНК, возникают 1000 одиноч-

ных и 10-100 двойных разрывов, каждый из которых может стать причиной аберрации.

Число одиночных разрывов линейно зависит от дозы облучения в очень широком диапазоне: от 0,2 Гр до 60000 Гр. То есть, даже при очень малой дозе облучения должно возникать некоторое число одиночных разрывов. Эффективность их образования зависит от многих биохимических факторов. Однако, средняя энергия на разрыв составляет около  $3 \cdot 10^{-18}$  Дж.

Цезий-137 имеет пик гамма-излучения около  $1,06 \cdot 10^{-13}$  Дж. Средняя энергия бета-частиц, испускаемых стронцием-89 -  $10^{-13}$  Дж, стронцием-90 -  $3 \cdot 10^{-14}$  Дж.

Поэтому особенно опасно внутреннее облучение, когда происходит полное поглощение излучения: при попадании в организм стронция-90 может возникнуть до 60000 одиночных разрывов ДНК, и их дальнейшая судьба будет зависеть от состояния клетки и ее способности к самовосстановлению.

## Вопросы к главе 2

1. Какая энергия прошла через околоземное пространство во время мощной гамма-вспышки в 2005 г. Сравните ее с общей энергией земной атмосферы.
2. Что притягивает Луну сильнее — Земля или Солнце?
3. Оцените, какое влияние оказывает Луна на траекторию движения Земли вокруг Солнца.
4. Где приливы выше: в атмосфере или в океане?
5. За счет чего наблюдается большая высота приливов (притяжение Луны изменяет уровень моря всего на 0,5 м)?
6. Почему период приливов составляет не 12 часов, а 12 часов 25 мин.?
7. Как изменится период приливов, если Луна будет находиться вдвое дальше современного расстояния?
8. Вывести III закон Кеплера, используя закон всемирного тяготения.
9. Какие виды ионизирующих излучений проходят через атмосферу с наименьшим поглощением?
10. В чем смысл разделения дозы радиации на поглощенную, эквивалентную и эффективную эквивалентную?
11. Сравнить дозы излучения, которые получают космонавты за время полета к Марсу и за такое же время на борту МКС.
12. Каков механизм воздействия космических гамма-вспышек на атмосферу Земли?

## Глава 3

### Космическая погода и ее роль в оценках воздействия космоса на геоэкосистемы

#### 3.1. Воздействие солнечной активности на геосферы и здоровье человека

Все основные исследования природы процессов, возникающих в биосфере в результате космических воздействий тем или иным образом связаны с воздействиями Солнца. Подробно процессы, происходящие в ОКП, описаны в целом ряде работ (*Модель космоса, 2007; Муртазов, 2004, 2008; Плазменная гелиогеофизика, 2008 и др.*).

Трудность анализа последствий нестационарной солнечной активности состоит в том, что при крупных гелиофизических возмущениях почти все геофизические поля среды обитания изменяются почти одновременно. Ведь магнитная буря – это не только скачок магнитного поля и характерная форма возмущения, но и:

- усиление или ослабление геомагнитных пульсаций в широком диапазоне частот;
- изменение атмосферного электрического поля;
- нарушение установившегося режима циркуляции нижней атмосферы на средних широтах;
- усиление акустических шумов инфразвукового диапазона;
- изменение уровня напряженности электромагнитного фона в диапазоне низких и сверхнизких частот;
- возрастание радиоактивности атмосферы.

Из вышесказанного следует, что реакция современных биосистем (как единственно доступных нам объектов для изучения динамических процессов адаптации к нестационарным солнечным процессам), выработана в процессе длительной эволюции при существенно отличающихся условиях исторической динамики Солнца и обусловлена целой совокупностью внешних факторов (*Обридко и др., 2013*).

Начиная с работ А.Л. Чижевского стало понятно, что 11-летний цикл активности Солнца (или 22-летний цикл его магнитной активности) определяет периодичность многих процессов в биосфере.

Здесь мы отметим связь между параметрами, характеризующими состояние ОКП, и солнечной активностью. Эта связь проявляется намного заметней и ярче подобных связей с биосферой (рис. 3.1. – *Мартынов, 1971*).

Достаточно сказать, что в течение 11-летнего цикла солнечной активности на Солнце происходит около 37000 вспышек (по данным за 22

цикл солнечной активности – 1986-1996 гг.) и порядка 500 магнитных бурь (Ораевский, Кузнецов, 2002).

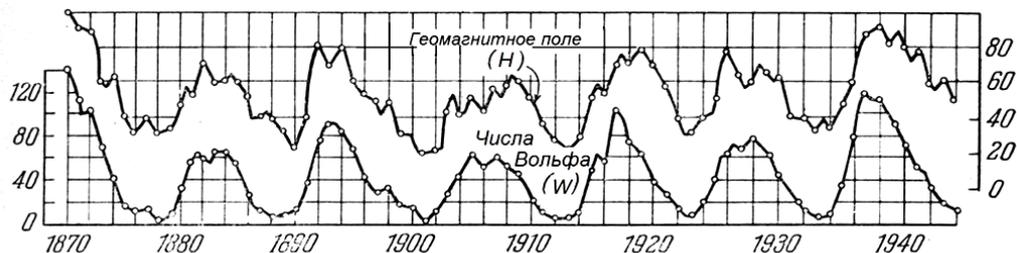


Рис. 3.1. Корреляция между напряженностью геомагнитного поля ( $H$ ) и числами Вольфа ( $W$ )

С другой стороны, основным компонентом околоземного пространства, формирующим магнитосферу, отвечающим за строение радиационных поясов, ионосферы, за ход процессов в ближнем космосе и их воздействие на геосистемы и человека является геомагнитное поле.

Геомагнитное поле можно представить складывающимся из главного магнитного поля Земли и компонентов, образованных внешними влияниями (Акасофу, Чепмен, 1975; Трухин и др., 2005). Поле внешних источников

$$H_v = S + L + D + \delta H, \quad (3.1)$$

где  $S$  – периодическое поле, обусловленное влиянием Солнца,  $L$  – периодическое поле, связанное с влиянием Луны,  $D$  – часть поля возмущений, связанная с внешними источниками,  $\delta H$  – нециклическая вариация в спокойные периоды от внешних источников.

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

Состояние геомагнитного поля во многом определяет состояние магнитосферы, а также ее защитные для биосферы функции.

В первом приближении магнитосфера недоступна для внешней плазмы солнечного ветра, который может лишь изменить форму магнитопаузы в соответствии с условием баланса давлений на ней. В действительности, когда межпланетное магнитное поле (ММП) обладает компонентой, параллельной земному магнитному диполю (южная компонента ММП), в области соприкосновения противоположно направленных ММП и земного поля происходят нарушение условия идеальной проводимости плазмы и эрозия магнитного поля. В магнитосферу попадают плазма солнечного ветра и переносимая им энергия. Этот процесс

называется *пороговым (триггерным) механизмом*. В зависимости от темпа поступления энергии возможны три сценария реакции магнитосферы (Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., 2009).

1. Когда скорость поступления энергии меньше или равна скорости стационарной диссипации энергии внутри магнитосферы, она не изменяет своей формы – в магнитосфере не наблюдается каких-либо существенных изменений, т.е. она остается невозмущенной.

2. В случае, когда скорость поступления энергии превышает скорость стационарной диссипации, часть энергии уходит из магнитосферы по «квазистационарному каналу», что приводит к восстановлению ее состояния. Роль такого канала играют *магнитные суббури* – процессы высвобождения магнитной энергии, накопленной в магнитосфере, путем замыкания хвостового тока (рис. 7) вдоль магнитных линий через ионосферу в области ночной части полярного овала. Вновь образуемый ток называется «электро-джет» (рис. 8). Наиболее впечатляющее проявление суббурь – *полярное сияние*, возникающее в результате бомбардировки нейтральных атомов атмосферы потоками плазмы хвоста магнитосферы, ускоренной вдоль магнитных силовых линий. Магнитосфера может долгое время сбрасывать излишки энергии в полярные области обоих полушарий Земли в виде суббурь с периодичностью около 3 ч.

3. Когда скорость поступления энергии существенно превышает скорость стационарной и квазистационарной диссипации, происходит глобальная перестройка токовой системы магнитосферы и ионосферы, сопровождаемая сильными возмущениями магнитного поля на Земле, что по существу и называется магнитной бурей. Поэтому в отличие от магнитных суббурь, при которых возмущения магнитного поля наблюдаются в полярных областях, во время магнитных бурь поле изменяется и на низких широтах вблизи экватора. При сильных бурях полярные сияния могут опускаться на 20–30° к экватору от полярных областей и наблюдаться на низких широтах, как это происходило, например, 30 октября 2003 г.

Изменения геомагнитного поля, связанные с воздействием на него различных внешних факторов, во многом (а часто и в основном) определяют ход процессов в ОКП и биосфере.

В табл. 3. 1 (Владимирский, Кисловский, 1982) перечислены показатели внешней среды, изменяющиеся при вариациях солнечной активности (без учета влияния последней на погоду и тропосферную циркуляцию).

Таблица 3.1.

## Физические факторы, зависящие от солнечной активности

Процесс	Максимальное изменение в цикле солнечной активности	Продолжительность (в скобках – частота следования)
Излучение Солнца в оптическом диапазоне	Практически не изменяется	
Излучение Солнца в радиоволновом диапазоне	До $10^{-17}$ Вт*м <sup>2</sup> для мощной вспышки	Часы или сутки для меньшей интенсивности (раз в 1 месяц)
Солнечные космические лучи	До сотен процентов (при мощной вспышке)	Около 1 часа (раз в 2-5 лет)
Геомагнитная активность	До $10^{-3}$ Гс (главная фаза большой бури)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Электромагнитное поле низкие частоты сверхнизкие частоты	До сотен микровольт на метр До десятков вольт на метр	Десятки часов (постоянно) Часы (постоянно)
Изменения электро-статического поля Земли	10-30%	11-летний цикл?
Вариации галактических космических лучей - при Форбуш эффекте - за 11-летний цикл	5% До 20%	Сутки (раз в 1 месяц) - - - - -
Колебания концентрации радона в приземной атмосфере	В 5 раз (при больших бурях)	Сутки (раз в 1 месяц)
Инфразвуковые колебания (около 0.03 Гц)	До $10$ дн*см <sup>-2</sup> (при больших бурях на средних широтах)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Вариации УФ-излучения вблизи 290 нм	До 10%	11-летний цикл

Авторы отмечают, что ряд показателей здесь могут не являться экологически значимыми. Это: а) вариации интенсивности солнечного излучения в радиочастотном «окне прозрачности» (всплески радиоизлучения от больших вспышек, шумовые бури) ввиду того, что уровень фона искусственного происхождения в этом диапазоне примерно на три порядка выше факторов естественного происхождения; б) медленные изменения напряженности магнитного поля Земли; в) вариации космических лучей ввиду их редкости и малости по сравнению с радиоактивностью земной природы.

Излучение в рентгеновском и УФ - диапазонах определяет состояние нижнего слоя околоземного пространства (частично мезосферы на высотах более 65 км и термосферы высоты 90-400 км). В оптическом и, частично, инфракрасном диапазонах сосредоточена основная часть (до 95%) спектральной плотности излучения. Эта часть солнечной радиации трансформируется при энергообмене в средней и нижней атмосфере. Энергообмен является важнейшим фактором для общего течения

процессов в этих областях, а значит и причиной множества частных гидрометеорологических явлений. Известная связь гидрометеорологического режима с общей циркуляцией атмосферы и связь общей циркуляции атмосферы с солнечной деятельностью приводят к широкому распространению физико-географических проявлений солнечной активности. Имеют место систематические экзогенные явления. Появляющиеся здесь многочисленные задачи и проблемы решаются в рамках метеорологии, климатологии, гидрологии и физической географии (Кокоуров, 2003).

В процессе исследований был выявлен целый спектр частот солнечных процессов, коррелирующих с частотами процессов в биосфере (Владимирский и др., 2004; Голицын, 2012 – табл. 3.2).

Таблица 3.2

Основные периоды (годы) ритмов параметров околоземной среды

Геомагнитные индексы	Солнечная активность	Процессы в природе
1,47	1,5	
2,15	2,1	Сидерический период Марса, вариации солнечного диаметра, солнечный ветер
2,8	3	
3,7	4	Солнечный ветер
4,3		
5,2	5,5	
7,1	7,2	
10,5	11	Есть еще 9,6 года
12,5		Сидерический период Юпитера 11,9 г.
16,1		
22,0	22,0	Период смены полярности магнитного поля Солнца
35	35	Цикл Брикнера в климате
60,0	55	
80	80	Сидерический период Урана 84,01 г.
	130	
	178	Сидерический период Нептуна 164,8 г.
	200±15	
	263	Сидерический период Плутона 250,6 г.
	320±20	
	500	
	1800-1900	

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

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

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

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

Основным агентом-переносчиком перепадов космической погоды в биосферу, который сейчас не вызывает сомнений, являются электромагнитные поля низких и крайне низких частот. Особенно важны здесь квазипериодические вариации параметров этих полей с периодами, близкими к периодам важнейших биологических ритмов (*Владимирский, 2004*).

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

Спектр частот геомагнитных пульсаций заключен в пределах от нескольких миллигерц до одного килогерца, амплитуда - максимум несколько гамм. Некоторые типы пульсаций отмечаются одновременно на всем земном шаре. Иногда пульсации имеют региональный характер (Ларин, 2001).

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

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

На рис. 3.2. представлена общая схема передачи эффектов солнечной активности в биосферу (Владимирский, 2009).

Здесь обращает на себя внимание тот факт, что воздействие солнечной активности на организмы в среде обитания передается по двум каналам - через вариации коротковолнового излучения и через изменения в солнечном ветре.

Эти каналы существенно различаются: в первом случае сигнал от *всего диска* Солнца приходит к Земле через 8 минут и воздействует на уже упомянутую ионосферу; во втором случае запаздывание «явления на Солнце – эффект на Земле» составляет в среднем 4,5 минуты, и информация, приходившая от Солнца, относится к его узкой зональной полосе, откуда в данный момент истекает солнечная плазма (ветер), *не ко всему диску!* Воздействие имеет место на магнитосферу и отражается индексами магнитной активности (их сильное возрастание соответствует магнитной буре). Далее эти первичные вариации «перерабатываются» во вторичные вариации различных экологических переменных.

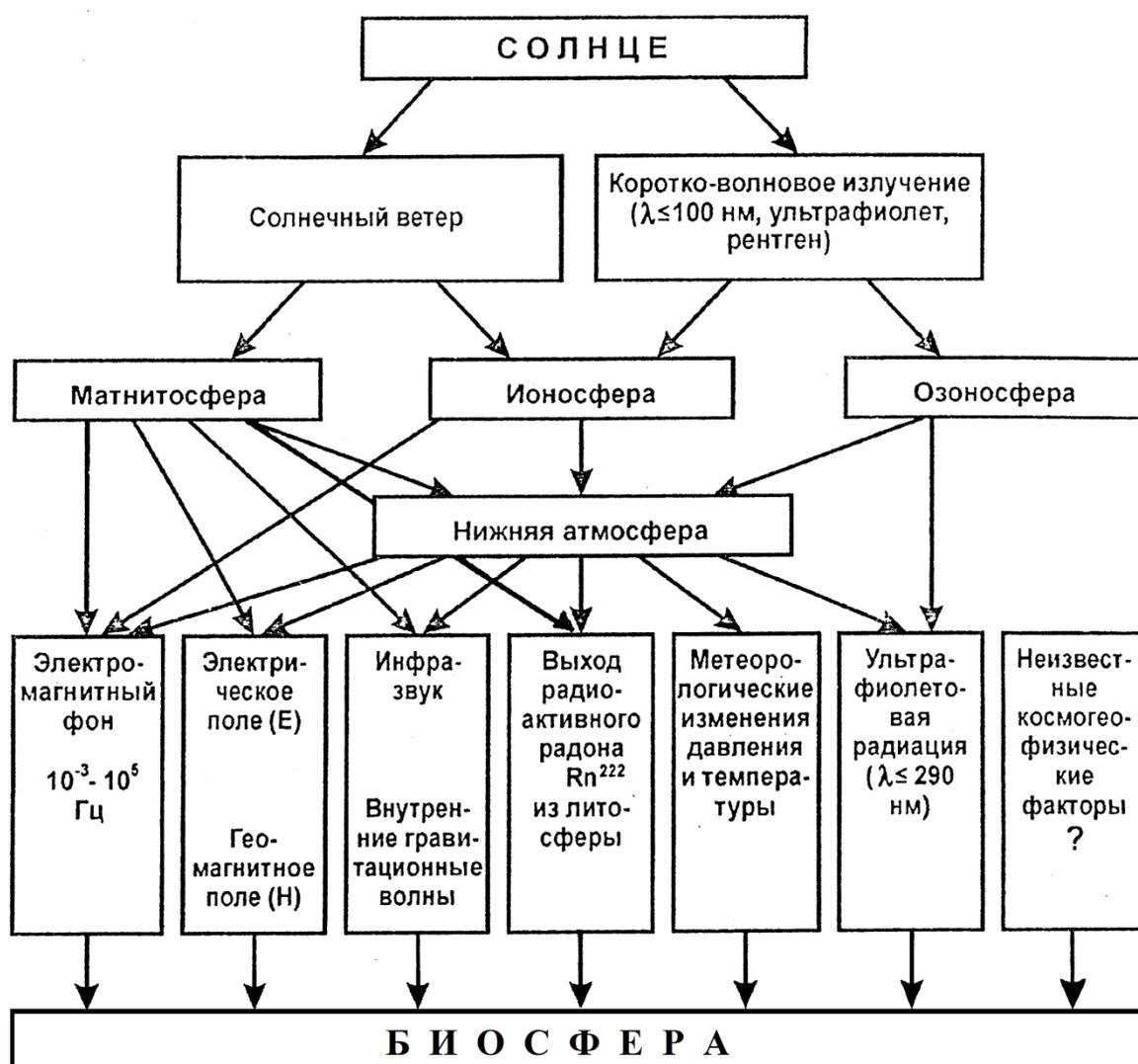


Рис. 3.2. Схема воздействия солнечной активности на биосферу

Сейчас большинство исследователей полагает, что самым важным физическим агентом, переносящим «капризы» космической погоды к поверхности Земли, являются электромагнитные поля (радиоволны) очень низких частот.

Есть основания считать, что высокочастотная область биоэффективных частот (~ГГц) обусловлена преимущественно вынужденным резонансом микромасштабных структур организма (ионы, аминокислоты, мембраны и т.п.), а низкочастотная (ОНЧ-УНЧ диапазон) – параметрическим резонансом крупномасштабных систем (сердце, мозг, кровеносная система и т.п.). Биоэффективные частоты определяются собственными частотами соответствующих систем организма и могут быть вычислены при знании масштабных факторов и характерных скоростей в рассматриваемой системе. Сравнение вычисленных биоэффективных частот с экспериментально выявленными показывают их хорошее соответствие друг другу (Хабарова, 2004).

Частоты биоритмов человеческого организма лежат, главным образом, в инфразвуковой и суперинфразвуковой области (Мазур, Иванов, 2004). Ритмы головного мозга:  $\alpha$ -ритм имеет период  $\sim 0,07$  с,  $\beta$  - 0,03 с,  $\Delta$  - 0,3 с. Период глотательных движений составляет  $\sim 4$  с, цикл сердечной деятельности – 0,8 с, период вдоха-выдоха – около 6 с, период, соответствующий частоте распространения нервных импульсов – около 0,02 с, средний период изменения биотоков в мышцах – 0,03 с.

Магнитогидродинамические (МГД) волны, пронизывающие все околоземное космическое пространство, доносят до земной поверхности информацию о свойствах окружающей Землю плазмы. Эти волны регистрируются спутниковыми и наземными магнитометрами в виде сверхнизкочастотных (СНЧ, или *ultra-low-frequency*, по западной терминологии) пульсаций геомагнитного поля диапазона 1млГц–1 Гц.

Пульсации геомагнитного поля были, по существу, первыми электромагнитными волнами, зарегистрированными при помощи примитивного магнитометра человечеством.

Энергетически СНЧ волны являются самым мощным волновым электромагнитным процессом в околоземном пространстве.

Действительно, сопоставление спектральной мощности излучений, регистрируемых в околоземном пространстве (рис. 3.3) показывает, что СНЧ волны с частотой менее 1 Гц по плотности потока на несколько порядков превосходят другие типы природных излучений (Пилипенко, 2002).

В целом магнитосфера подобна гигантскому мазеру для МГД волн, в который накачиваются шумы солнечного ветра, которые затем фильтруются в резонаторе, и высвечиваются через полупрозрачные зеркала (слои ионосферы). Неравновесные распределения энергичных частиц в магнитосфере, подобно инверсной заселенности, могут усиливать колебания в магнитосферном мазере.

Магнитогидродинамические (МГД) волны - волны, характерные для хорошо проводящей среды, находящейся в магнитном поле. Альвеновские волны - поперечные магнитогидродинамические волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Названы в честь шведского астрофизика Х. Альвена, предсказавшего в 1942 г. их существование. В этих волнах в колебаниях участвует не только электромагнитное поле, но и частицы проводящей среды, т. е. Альвеновские волны возможны лишь при наличии магнитного поля и проводящей среды, ведущей себя как единая жидкость или газ.

Кроме волн Альвена, возможны еще два типа волн, которые называют магнитозвуковыми. Их возникновение обусловлено, с одной стороны, натяжением и давлением силовых линий, с другой - давлением газа, как у звуковых волн. Волны эти не являются ни чисто продольными, ни чисто поперечными. В отличие от волн Альвена, где энергия распространяется вдоль силовых линий, в магнитозвуковых волнах энергия может распространяться практически в любом направлении по отношению к силовым линиям. Кроме упомянутых в плазме возможны еще некоторые типы волн, связанные главным образом с высокочастотными колебаниями.

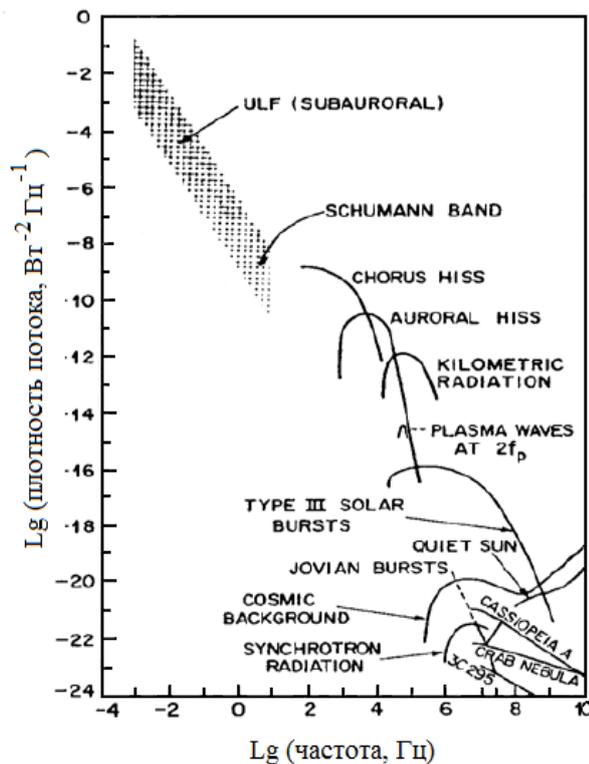


Рис. 3.3. Спектральная плотность различных излучений вблизи Земли

Электромагнитное излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах претерпевает значительные изменения при развитии активных процессов на Солнце. Потoki энергии в названных диапазонах крайне малы – даже когда во время сильнейших солнечных вспышек поток рентгеновского излучения возрастает на три порядка, суммарный поток энергии остается на шесть порядков меньше солнечной постоянной. При этом следует помнить, что названные излучения практически полностью поглощаются атмосферой Земли.

Как в геофизических, так и в биологических процессах периоды осцилляций менее суток, также как и колебательные процессы в других диапазонах спектра биологических ритмов, могут представлять собой синхронизованные с внешними факторами автоколебания. Основными здесь являются собственные колебания атмосферы-ионосферы (12 часов и гармоники), гравитационные собственные колебания Солнца (существование которых, по мнению некоторых специалистов, еще окончательно не доказано) – 180 мин, 160 мин и 120 мин, близкие к высоким гармоникам суток и собственным сейсмическим колебаниям Земли (60 мин, 44 мин и др.). В среде обитания эти колебания часто присутствуют в микровариациях атмосферного давления и низкочастотных электромагнитных полей. Согласно современным биофизическим представлениям, вариации этих экологических переменных воспринимаются организмами и могут сыграть роль «датчика времени» для некоторых биологических микроритмов. Эти соображения могут быть полезны при

интерпретации ряда биологических результатов. Возможно, внутрисуточные периодичности риска заболеваемости соответствуют одному из подобных геофизических ритмов. Период 120 мин найден в активности мелких грызунов, наблюдаемых на обширных территориях. Некоторые биологические микроритмы, вероятно, представляют собой свободные автоколебания, никак не связанные с временной структурой среды обитания. Не исключено, однако, что близость  $\alpha$ -ритма мозга человека к фундаментальной частоте ионосферного волновода (8 Гц) не является случайной (Владимирский, Конрадов, 2004).

К примеру, в нижней части области  $E$  на высотах 85-95 км в период действия активных метеорных потоков на ночной стороне Земли появляется спорадический слой  $E_s$ , образованный ионами металлов  $Mg^+$ ,  $Fe^+$ ,  $Ca^+$ , с примесью  $Si^+$ ,  $Na^+$ ,  $Al^+$ ,  $Ni^+$  (Иванов-Холодный, 1990; Трухин, 2005), благодаря которому становится возможной сверхдальняя метеорная радиосвязь в коротковолновом диапазоне.

Плотность потока энергии колеблется в нем в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup>. Период пульсаций 0,02-1 Гц (Муртазов, 2004).

Можно отметить в связи с этим, что проблема воздействия на биологические организмы инфразвуковых излучений сверхмалой мощности приобретает в последнее время некоторую актуальность (Владимирский, 2004).

Более энергетически заметным является процесс генерации инфразвуковых колебаний в атмосфере как следствие взаимодействия солнечного ветра с плазмой ОПК и атмосферой (Негода, Сорока, 2001; Сорока и др., 2004). Анализ спектров инфразвука показывает наличие частот с периодами характерными для солнечной активности 27 суток, 24 часа, 12 часов. Энергия инфразвука возрастает при падении солнечной активности.

Сценарий связи солнечной активности с инфразвуком в атмосфере сводится к схеме рис.3.8. Изменения солнечной радиации приводят к модуляции галактических космических лучей. Этот модулированный поток при взаимодействии с нижней атмосферой изменяет ее прозрачность путем образования аэрозолей и вариаций малых составляющих атмосферы ( $NO_x$ ,  $H_2O$ ,  $O_3$  и др.). Изменения оптической прозрачности приводят к пространственным вариациям поглощения солнечной энергии в атмосфере. Вследствие этого в различных зонах атмосферы образуются температурные градиенты и тепловые неустойчивости, порождающие инфразвуковые колебания. Образовавшийся инфразвук может влиять на флуктуации интенсивности взаимодействия космических лучей с атмосферными аэрозолями. На рис. 3.4 это отображено введением обратной связи. Инфразвуковые колебания могут усилить модуляцию

прозрачности и эффект оптико-акустического преобразования в атмосфере.

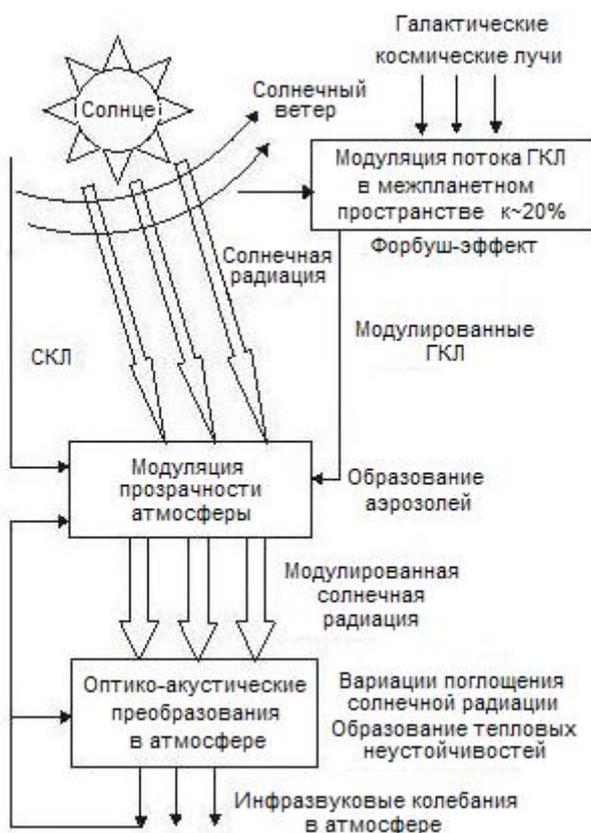


Рис. 3.4. Модель образования инфразвуковых акустических колебаний в атмосфере

Можно представить несколько схем воздействия солнечной активности на биосферу через компоненты околоземного пространства, как иллюстрацию действия и других источников (рис. 3.5-3.8 - Владимирский, Кисловский, 1982).

Здесь видно, что солнечная активность может оказывать влияние на биосферу не только через возмущения природного геомагнитного поля, но и посредством других физических агентов. Несомненно, определенное значение имеют вариации приземного ультрафиолетового излучения около 290 нм, происходящие вследствие динамических изменений в озоновом слое. Имеются основания предполагать, что солнечная активность оказывает достаточно сильное влияние на биологические организмы и через воздействие на изменения фона инфразвуковых акустических шумов, а также низкочастотных колебаний электрического поля Земли.

Вместе с тем, взаимодействие околоземной среды с солнечным излучением различных видов, другими факторами естественного происхождения происходит в течение всей эволюции Земли. Геофизика не

имеет данных о том, что когда-либо ОКП под действием естественных причин полностью изменяло свои свойства и переходило в состояние с совершенно новыми параметрами, резко изменяя свое воздействие на биосферу (Муртазов, 2004).

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



Рис. 3.5. Воздействие солнечной активности на биосферу через сверхвысокочастотные колебания электромагнитного поля



Рис. 3.6. *Воздействие солнечной активности на биосферу при деградации озонового слоя и увеличении интенсивности ультрафиолетовой радиации*



Рис. 3.7. *Воздействие солнечной активности на биосферу при генерации инфразвуков в полярных сияниях*



Рис. 3.8. *Воздействие солнечной активности на растительные организмы при проникновении к поверхности электрического поля*

Наиболее ярко многочисленные эффекты воздействия космической среды на биосферу проявляются во время магнитных бурь.

То, что магнитные бури оказывают ощутимое влияние не только на работу техники, например, приводят к нарушениям радиосвязи, могут заблокировать радары, являются причиной сбоев в радионавигационных системах, но и опасны для живых организмов, в том числе и людей, уже давно не вызывает сомнений.

Все эффекты воздействия магнитных бурь условно можно разделить на несколько классов (рис. 3.9 - *Зайцев, 2005*):

1) спутниковые аномалии: при взаимодействии спутников с космической средой на элементах спутников возникают поверхностные заряды и токи, идет деградация солнечных батарей, из-за ионизации высокоэнергичными частицами проходят сбои в электронных схемах и т.п.;

2) радиационное воздействие: на космонавтов внутри и вне кораблей, на пассажиров самолетов при их полетах у границ верхней атмосферы (10-15 км), на высотные аэростаты (20-40 км);

3) воздействие на ионосферу: прекращение КВ-радиосвязи, сбои в радиосистемах, ошибки в системах навигации GPS и ГЛОНАСС т.п.;

4) индукционные эффекты на уровне Земли: экстратоки в линиях электропередач, наведенные токи в трубопроводах, наводки в трансокеанских кабелях, наводки в сигнальных сетях железных дорог и т.д.;

5) воздействие на биосферу, в том числе и на человека на уровне Земли. Хотя такое воздействие и не является катастрофой для большинства людей, но те, кто находятся в экстремальных ситуациях, кто стра-

дает сердечной недостаточностью, психическими расстройствами могут проявить вполне заметную реакцию на магнитные бури, которая иногда становится фатальной.

Из этих общеизвестных фактов следует, что и на сегодняшнем этапе развития современного информационного общества изучение характера вариаций магнитного поля остается актуальной задачей: ведь именно сведения о вариациях магнитного поля Земли служат основой оценки параметров электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве.

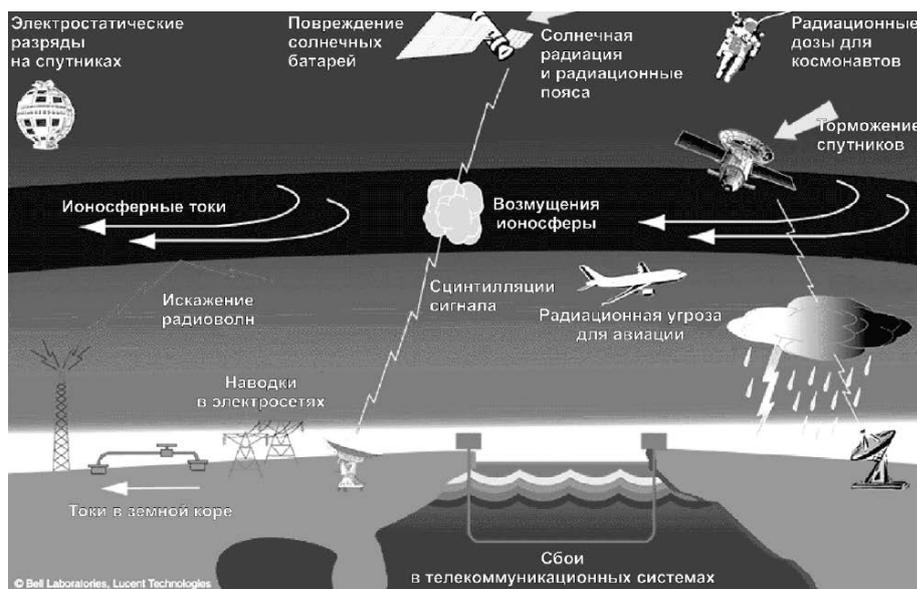


Рис. 3.9. Схема воздействия солнечной активности

В настоящее время имеются убедительные доказательства солнечного воздействия на земной климат, как в доиндустриальную, так и в постиндустриальную эпоху.

В последние годы также широко обсуждается влияние изменений потока КЛ, восстанавливаемого по результатам изучения космогенных нуклидов в земных образцах, на изменения климата. Недавние исследования показывают, что на временных шкалах от десятилетий до столетий и больше прослеживается связь между изменениями параметров геомагнитного поля и климата. Прямые измерения солнечных характеристик и потоков КЛ не позволяют проследить долговременные тренды и их природу. В то же время установлено, что содержание космогенных нуклидов, таких, как  $^{10}\text{Be}$  и  $^{14}\text{C}$  в природных архивах, даёт долговременную запись интенсивности потока КЛ и их модуляцию солнечной активностью и геомагнитным дипольным полем.

В ряде природных архивах, наряду с космогенными нуклидами, содержится и климатическая информация в форме стабильных изотопов и различных химических субстанций (Дергачев и др., 2010).

В середине 90-х гг. прошлого века была выдвинута гипотеза, согласно которой:

- гелиогеомагнитные ритмы завели «биологические часы», так же как освещенность и температура сформировали циркадианный (суточный) эндогенный ритм;
- гелиогеомагнитные возмущения — «сбои» гелиогеомагнитных ритмов — должны вызывать *реакцию адаптивного стресса* у биологических объектов, в особенности, в состоянии их неустойчивости.

Далее было выявлено значительное сходство временной структуры биологических ритмов с ритмами геомагнитного поля на всех уровнях биологических систем — от клетки до популяции.

Как теперь известно, биологические ритмы имеют периоды, близкие к периоду собственного вращения Солнца и его гармоникам, ~ 28 дней, ~ 14 дней, ~ 7 дней и т. д.

В результате многолетних исследований выявлены характерные мишени геомагнитных и метеовоздействий:

- кровеносная система;
- сердечно-сосудистая система;
- вегетативная нервная система;
- легкие.

В «группы риска» входят:

I — *больные* с патологией сердечно-сосудистой системы, в особенности, перенесшие инфаркт миокарда;

II — *здоровые люди* с функциональным перенапряжением адаптационной системы (космонавты, летчики трансконтинентальных перелетов, операторы и диспетчеры энергетических станций, аэропортов и т. д.);

III — *дети в период бурного развития* с несформировавшейся адаптационной системой.

*Мониторирование детей раннего возраста* показало наличие в их спектрах всех «солнечных» периодов, причем суточный ритм (наиболее мощный в организме матери) новорожденные младенцы начинают проявлять на 5–10-м месяцах жизни, в то время как в первый месяц у них преобладает 7-дневный ритм. При мониторинговании младенца в течение 26 месяцев в спектрах его жизненно важных показателей очевидно присутствие всех периодов, характерных для периода собственного вращения Солнца, около 28 дней, и его гармоник. Видно, что период 1 сутки начинает проявляться только на 5-м месяце мониторингования.

*Реакция организма на геомагнитную активность*

Сбои ритмов внешнего синхронизатора — геомагнитные бури — приводят:

- к адаптационному стрессу типа реакции при сбоях фазы суточного ритма, возникающих при трансконтинентальных перелетах (наблюдаются — стабилизация сердечного ритма, повышение вязкости крови, падение сократительной силы сердца);
- к метеотропным реакциям — изменениям сосудистого тонуса.

Как показано на примере одного из полученных результатов, во время магнитной бури содержание стрессорных гормонов — свободного, связанного и суммарного норадреналина — в моче больных ИБС и ГБ изменяется. Если симпато-адреналовая система реагировала на геомагнитные возмущения изменениями, близкими к верхнему пределу нормы у здоровых людей, то выход гормона кортизола существенно возрастал во время бури как у здоровых, так и у больных людей.

Во время геомагнитной бури оказываются разрушенными структуры клетки (мембраны митохондрий — энергетических «станций» сердца, миофибрилл, появляются включения липосом во время бури (главная фаза), резко изменяется вязкость крови, происходит замедление капиллярного кровотока и образуются агрегаты эритроцитов

#### *Общие выводы об эффектах космической погоды (Бреус, 2010)*

К числу известных внешних синхронизаторов, сформировавших эндогенную временную структуру биологических организмов, включая человека, можно отнести ритмы природных электромагнитных полей, индуцированных воздействием Солнца и его активности на Землю и ее магнитосферу и ионосферу.

Показано, что сбои ритмов ЭМП вызывают *адаптационный стресс, типа реакции при сбоях фазы суточного ритма, возникающих при трансконтинентальных перелетах (стабилизация сердечного ритма, повышение вязкости крови, падение сократительной силы сердца), а также метеотропные реакции — изменение сосудистого тонуса.*

Однако космическая погода не одна является биотропным фактором, влияющим на самочувствие и здоровье людей. Обычно ее влияние происходит в совокупности с влиянием факторов земной погоды, причем, влияние скачков атмосферного давления  $\Delta P$ , температуры  $T$  и скачков геомагнитной активности ( $\Delta K$ -индекса) распределяется следующим образом (Ozheredov et al., 2008; Ожередов, Бреус, 2007):  $T:\Delta K:\Delta P = 5:4:7$ .

### 3.2. Основные параметры космической погоды

**Космическая погода** (англ. *Space weather*) — в широком употреблении термин появился в 90-х годах XX века, как охватывающий наиболее практически важные аспекты науки о солнечно-земных связях. Раздел научных знаний, называемый «Солнечно-земные связи», посвящен изучению совокупности всех возможных взаимодействий гелио- и геофизических явлений. Эта наука лежит на стыке физики Солнца, астрофизики солнечной системы и геофизики и занимается исследованием влияния солнечной активности через межпланетную среду на Землю, в частности на магнитосферу, ионосферу, атмосферу Земли. В строго научном смысле к космической погоде относится динамическая (с характерными временами — сутки и менее) часть солнечно-земных связей. В практическом смысле к тематике космической погоды относятся, например, вопросы прогноза солнечной и геомагнитной активности, исследования воздействия солнечных факторов на технические системы (радиопомехи, радиационная обстановка и пр.), воздействия на биологические системы и людей. Одним из первых употребил это словосочетание, А. Л. Чижевский в одной из своих публикаций начала XX века. Понятием «погода в космосе» пользовался радист первой полярной дрейфующей станции СП-1 (1937-1938 гг.) Е. К. Федоров.

Эффекты космической погоды (*Петрукович, 2008*).

К основным практически важным условиям окружающей среды, определяемым СЗС, относятся: космическая радиация (коротковолновое солнечное излучение, СКЛ, ГКЛ, магнитосферная радиация), степень ионизации и нагрева ионосферы и атмосферы, вариации геомагнитных и геоэлектрических полей. Несмотря на то, что их влияние невидимо человеческому глазу, ему подвержены многие современные технологические системы, и, через сложную систему взаимодействия, живые организмы. Выделяют следующие эффекты космической погоды:

- 1) воздействие космической радиации на аппаратуру космических аппаратов и самолетов, радиационная угроза для космонавтов и экипажей высотных самолетов;
- 2) изменения в условиях распространения радиоволн и помехи в системах связи и навигации, создаваемые ионосферой;
- 3) изменение орбит спутников из-за нагрева верхней атмосферы;
- 4) геоиндуцированные (паразитные) токи в протяженных проводящих объектах и системах: трубопроводах, кабелях, линиях электропередач и связи, железных дорогах в приполярных широтах;
- 5) модификация химического состава и свойств атмосферы Земли;
- 6) воздействие на биологические объекты и человека.

## Предсказание эффектов космической погоды.

В настоящее время точные математические модели, описывающие процессы солнечно-земной физики, отсутствуют. Поэтому в основу прогнозов положены феноменологические, вероятностные модели, то есть модели, описывающие последовательность физических явлений, каждый шаг которой может выполняться с некоторой вероятностью менее 100% и вероятность реализации полной цепочки может быть ниже порога, когда ее можно учитывать на практике. Используют 27-45 -суточный, 7-суточный, 2-суточный и 1-часовой прогноз. Каждый из этих типов прогнозов использует разность в скорости электромагнитного сигнала и скорости распространения возмущения и опирается на дистанционное наблюдение явления на Солнце или локальное измерение вблизи Земли.

27-45 -суточный прогноз опирается на текущие наблюдения Солнца и предсказывает возмущения на Солнце в период, когда через оборот Солнца (оборот Солнца составляет 27 суток) в сторону Земли будет обращена та же сторона Солнца.

7-суточный прогноз опирается на текущие наблюдения Солнца вблизи восточного лимба и предсказывает возмущения Солнца, когда область вблизи лимба переместится к линии Солнце-Земля (к центральному меридиану).

2-суточный прогноз опирается на текущие наблюдения Солнца, когда вблизи центрального меридиана произошли явления, которые могут повлечь за собой возмущения в околоземном пространстве (возмущения плазмы от Солнца к Земле распространяются в среднем от 1,5 до 5 суток, солнечные космические лучи — несколько часов).

1-часовой прогноз опирается на прямые измерения параметров плазмы и магнитного поля на космических аппаратах, расположенных, как правило, в передней либрационной точке  $L_1$  на расстоянии 1,5 млн. км от Земли вблизи линии Солнце Земля.

Надежность 2-суточного и 1-часового прогноза составляют, соответственно, около 30-50% и 95%. Остальные прогнозы носят лишь общий информационный характер и имеют ограниченное практическое применение.

### *Количество солнечных пятен*

**Солнечные пятна** — тёмные области на Солнце, температура которых понижена примерно на 1500К по сравнению с окружающими участками фотосферы. Наблюдаются на диске Солнца (с помощью оптических приборов, а в случае крупных пятен — и невооружённым глазом) в виде тёмных пятен. Солнечные пятна являются областями выхода в фотосферу сильных (до нескольких тысяч гаусс) магнитных полей. Потемнение фотосферы в пятнах обусловлено подавлением магнитным полем конвективных движений вещества и, как следствие, снижением потока переноса тепловой энергии в этих областях.



Рис. 3.10. *Общий вид Солнца и солнечных пятен, как одиночных, так и объединенных в группы*

Пятна классифицируют в зависимости от срока жизни, размера, расположения.

Локальное усиление магнитного поля тормозит движение плазмы в конвекционных ячейках, тем самым замедляя вынос тепла на поверхность Солнца. Охлаждение затронутых этим процессом гранул (примерно на 1000 С) приводит к их потемнению и формированию единичного пятна. Некоторые из них исчезают через несколько дней. Другие развиваются в биполярные группы из двух пятен, магнитные линии в которых имеют противоположную полярность. Из них могут сформироваться группы из множества пятен, которые иногда объединяют до сотни пятен, достигая размеров в сотни тысяч километров. После этого происходит медленное (в течение нескольких недель или месяцев) снижение активности пятен и уменьшение их размеров до маленьких двойных или одинарных точек.

Самые крупные группы пятен всегда имеют связанную группу в другом полушарии (северном или южном). Магнитные линии в таких случаях выходят из пятен в одном полушарии и входят в пятна в другом.

Размеры группы пятен принято характеризовать её геометрической протяжённостью, а также количеством входящих в неё пятен и их полной площадью.

В группе может насчитываться от одного до полутора сотен и более пятен. Площади групп, которые удобно измерять в миллионных долях площади солнечной полусферы (м.с.п.), варьируются от нескольких м.с.п. до нескольких тысяч м.с.п.

Максимальную площадь за весь период непрерывных наблюдений групп пятен (с 1874 по 2012 годы) имела группа № 1488603 (по Гринвичскому каталогу), появившаяся на диске Солнца 30 марта 1947 года, в максимуме 18-го 11-летнего цикла солнечной активности. К 8 апреля её полная площадь достигла  $1,87 \cdot 10^{10}$  км<sup>2</sup>, что более чем в 36 раз превышает площадь земного шара). На фазе своего максимального развития эта группа состояла из более, чем 170 отдельных солнечных пятен.

Солнечный цикл связан с частотой появления пятен, их активностью и сроком жизни. Один цикл охватывает примерно 11 лет. В периоды минимума активности пятен на Солнце очень мало или нет вообще, в то время как в период максимума их может наблюдаться несколько сотен. В конце каждого цикла полярность солнечного магнитного поля меняется на противоположную, поэтому правильнее говорить о 22-летнем солнечном цикле.

Хотя в среднем цикл солнечной активности длится около 11 лет, бывают циклы длиной от 9 до 14 лет. Средние значения также меняются на протяжении столетий. Так, в XX веке средняя длина цикла составила 10,2 года.

Солнечная активность (СА) — это процесс циклических изменений глобального магнитного поля Солнца на различных временных масштабах. Говоря «глобальное магнитное поле», мы в данном случае фиксируем факт того, что кроме цикла пятен на Солнце наблюдаются и цикл крупномасштабного (фоновое) поля, образованного открытыми магнитными конфигурациями — корональными дырами, и цикл полярного поля, образованного как полярными корональными дырами, так и полярными факелами. Говоря же о различных временных масштабах изменений глобального магнитного поля Солнца и его компонентов, следует учитывать, что кроме хорошо известного уже более полутора веков 11-летнего цикла (цикла Швабе-Вольфа) существуют и долгопериодические циклы СА: ~ 80–90 лет (цикл Гляйсберга), ~200 лет (цикл Зюсса), ~ 900 лет и больше. Эти длительные циклы связаны с амплитудной модуляцией 11-летних циклов и приводят к картине СА, согласно которой на интервалах длительностью несколько столетий развиваются грандиозные экстремумы СА типа маундеровского минимума или максимума середины XX века (*Наговицын, 2008*).

В прошлом началом цикла считался момент, когда солнечная активность пребывала в точке своего минимума. Благодаря современным методам измерений стало возможно определять изменение полярности солнечного магнитного поля, поэтому сейчас за начало цикла принимают момент изменения полярности пятен.

Нумерация циклов была предложена Р. Вольфом. Первый цикл, согласно этой нумерации, начался в 1749 году. В 2008 году начался 24-й солнечный цикл.

На практике применяются две официальные системы расчета индекса солнечной активности.

Боулдерское число солнечных пятен рассчитывается в *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, США, используя формулу, предложенную Рудольфом Вольфом в 1848 г.

$$W=k(10g+f), \quad (3.1)$$

где:  $W$  – число Вольфа;  $g$  – количество групп пятен;  $f$  – количество одиночных пятен;  $k$  – коэффициент масштаба. Коэффициент  $k$ , обычно меньший 1, определяется условиями наблюдений и типом инструмента (бинокль, телескоп, орбитальный телескоп и т.д.).

Всемирное число солнечных пятен (*The International Sunspot Number*) публикуется ежедневно Центром измерения показателя солнечных пятен в Бельгии (*Solar Influences Data Analysis Center*).

Боулдерское число обычно примерно на 25% выше значений Всемирного числа солнечных пятен.

Оба показателя рассчитываются по формуле Вольфа, но используют данные разных обсерваторий.

Кроме того, ранее часто использовалась Гринвичская программа по подсчету площадей и координат солнечных пятен (*The Greenwich Sunspot Data*) по фотографиям. В 1976 г. она была закрыта. XVI Генеральная Ассамблея МАС в Гренобле поручила продолжить Гринвичский каталог Дебреценской гелиофизической обсерватории (Венгрия) и Кисловодской горной станции Пулковской обсерватории.

Установлено, что в течение последних пяти 11-летних циклов количество пятен на Солнце должно было быть максимальным за последние 1150 лет (*Usoskin, 2004, 2007*).

Числа Вольфа за последние 11400 лет определяются путем использования дендрохронологического датирования концентраций радиоуглерода. Согласно этим исследованиям, уровень солнечной активности в течение последних 80 лет является исключительным — последний период со схожим уровнем имел место 8000 лет назад. Солнце имело схожий уровень активности магнитного поля всего ~10% времени из последних 11400 лет, причем практически все предыдущие периоды были более короткими по сравнению с современным.

Исторический список «Больших Минимумов» солнечной активности (*Usoskin, 2007*): 690 AD, 360 BC, 770 BC, 1390 BC, 2860 BC, 3340 BC, 3500 BC, 3630 BC, 3940 BC, 4230 BC, 4330 BC, 5260 BC, 5460 BC, 5620 BC, 5710 BC, 5990 BC, 6220 BC, 6400 BC, 7040 BC, 7310 BC, 7520 BC, 8220 BC, 9170 BC.

Экстремальные периоды солнечной активности, рассчитанные по косвенным данным во 2-м тысячелетии н.э. приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

## Экстремальные периоды солнечной активности

Название периода	Начало, гг.	Завершение, гг.
Минимум Оорта (средневековый теплый период)	1040	1080
Средневековый максимум (средневековый тёплый период)	1100	1250
Минимум Вольфа	1280	1350
Минимум Шпёрера	1450	1550
Минимум Маундера	1645	1715
Минимум Дальтона	1790	1820
Современный Максимум	1950	2004
Современный Минимум	2004	(в наст. время)

*Классификация солнечных вспышек*

Солнечная вспышка – взрыв на Солнце, который происходит когда энергия, содержащаяся в скрученных магнитных полях (обычно вокруг пятен) высвобождается наружу. Вспышки порождают поток радиации во всех диапазонах электромагнитного спектра, от радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей.

Ученые делят солнечные вспышки по их яркости в рентгеновских лучах в диапазоне длин волн от 1 до 8 Å на три основные группы:

- вспышки X-класса: большие, могут вызвать радиопомехи на всей планете, а также долгие магнитные бури.
- вспышки M-класса: средние по размеру, вызывают короткие перебои в связи в полярных регионах. Иногда образуются небольшие магнитные бури.
- вспышки C-класса: небольшие, с незначительными последствиями для нашей планеты.

Кроме них в прогнозе дается группа B-класса, имеющая минимальный уровень (табл. 3.4).

Таблица 3.4

## Классификация рентгеновских солнечных вспышек

Группа	Максимум (Вт/м <sup>2</sup> ) в интервале 1..8 Å
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

Вспышка класса M1 в 10 раз мощнее C1, а X1 в 10 раз мощнее M1 и в 100 раз мощнее C1. А индекс указывает, во сколько раз сильнее вспышка, чем нулевой уровень, т.е. это множитель.

Каждая группа делится на 9 подгрупп, от 1 до 9, от C1 до C9, M1-M9 и X1-X9.

На рис. 3.11 изображена серия рентгеновских вспышек, обнаруженных спутниками НОАА в июле 2000 г.

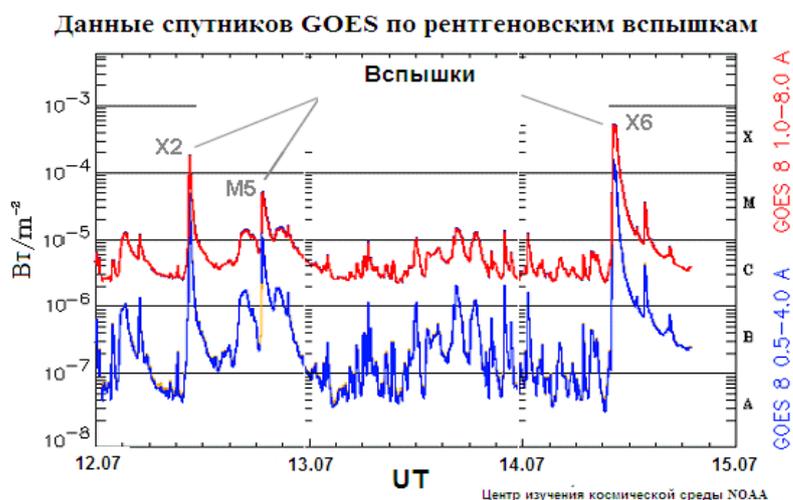


Рис. 3.11. Серия вспышек, обнаруженных спутниками НОАА в июле 2000 г.

Здесь зарегистрированы три вспышки (слева направо): X2, M5, X6. X6 породила магнитную бурю, названную «День взятия Бастилии».

Самая мощная солнечная вспышка за всю историю наблюдений Солнца произошла в 1859 году. В истории астрономии она фигурирует как событие Каррингтона, или Каррингтоновский шторм («Carrington event») — в честь британского астронома-любителя Ричарда Каррингтона (Richard Carrington, 1826–1875), наблюдавшего в ночь с 31 августа на 1 сентября гигантский факел на поверхности Солнца. 1–2 сентября были зафиксированы самые масштабные за все время наблюдений возмущения геомагнитного поля. Наблюдались масштабные сбои телеграфной связи в Европе и в Северной Америке, а в магнитных обсерваториях стрелки магнитометров упирались в край шкалы. На всей поверхности земного шара наблюдалось полярное сияние, наиболее заметным оно было на территории Карибских островов. В районе Скалистых гор сияние было таким ярким, что шахтеры-золотодобытчики начали готовить завтрак, будучи уверенными в наступлении утра.

Исходя из всей этой информации в совокупности, Каррингтон предположил существование весьма сильного влияния со стороны процессов, протекающих на Солнце, на то, что происходит на Земле. С тех пор неоднократно подтверждалось: геомагнитные бури — это реакция магнитного поля Земли на солнечный ветер.

Вспышка имела энергию в оптическом диапазоне  $\sim 10^{25}$  Дж. При этом, однако, она генерировала поток протонов с энергией  $\geq 30$  МэВ почти  $2,0 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup> — максимальное значение, полученное за всю историю изучения солнечных протонных событий. Это значит, что нельзя исключить события на 2–3 порядка более мощные, причем, для молодого Солнца частота таких событий могла быть больше.

Исследования взятых на различных глубинах проб льда показали, что геомагнитные бури такой интенсивности происходят в среднем каждые 500 лет.

На рис. 3.12 показано, как представлены данные о рентгеновских вспышках на сайтах космической погоды.



Рис. 3.12 Данные по рентгеновским солнечным вспышкам на некоторых сайтах

#### Поток радиоизлучения на волне 10,7 см

Спектральную интенсивность потока энергии  $\frac{d}{dv}(\frac{dP}{ds})$  радиоизлучения Солнца на частоте 2,8 ГГц (длина волны – 10,7 см) с 1947 г. регулярно измеряют и используют в качестве интегрального показателя активности Солнца.

С помощью радиотелескопов, регистрирующих интегральный поток радиоизлучения Солнца, ведутся патрульные наблюдения на ряде выбранных частот в диапазонах от метрового до сантиметрового. Станции расположены на разных долготах и распределены по всему земному шару. Радиотелескоп РТ-2 Уссурийской астрофизической обсерватории (УАФО) ведет наблюдения с 1990 г. на частоте 2,804 ГГц (10,7 см) в интервале 22:00–06:00 Всемирного времени.

Интегральный поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см,  $F_{10.7}$ , является одним из важнейших индексов, широко используемым для диагностики солнечной активности и в моделях состояния «космической погоды». Индекс  $F_{10.7}$  является наиболее точным среди других индексов и имеет прозрачный физический смысл, характеризуя состояние корональной плазмы. Записи индекса  $F_{10.7}$  образуют длинный ряд непрерывных наблюдений, охватывающий более чем 60-летний период времени. В задачи наблюдений на волне 10,7 см входят продолжение ряда  $F_{10.7}$ , характеризующего медленно меняющийся компонент солнечного радиоизлучения, т.е., общее состояние солнечной короны, и мониторинг вспышечных процессов. Данные наблюдений на патрульных ра-

диотелескопах могут использоваться и в исследованиях конкретных вспышечных событий.

Результаты измерений выражают в *solar flux units* – *sfu* – солнечных единицах потока – сеп (с.е.п.): 1 сеп =  $10^{-22}$  Вт·м<sup>-2</sup>·с (или Вт·м<sup>-2</sup>·Гц<sup>-1</sup>).

Можно отметить, что все перечисленные выше характеристики можно считать индексами солнечной активности и они связаны между собой (*Криволицкий, Реннев, 2009*).

Среднемесячная полная площадь всех солнечных пятен на видимом полушарии Солнца  $A$  в любой заданный момент времени коррелирует с числом солнечных пятен  $W$ :

$$A = 16,7W. \quad (3.2)$$

Плотность потока радиоизлучения на длине волны 10,7 см тесно связана ( $r = +0,98$ ) с числами Вольфа. Частота появления солнечных вспышек связана эмпирической зависимостью с числом солнечных пятен:

$$N_f = \alpha(\overline{W} - 10), \quad (3.3)$$

где  $N_f$  — число вспышек за один оборот Солнца (27 сут), — среднее число солнечных пятен,  $\alpha$  — константа (<1,5–2).

Примечательно, что 11-летний период не соответствует ни одному из естественных характерных времен: динамическому (5 мин — 1 час), тепловому (<10<sup>7</sup> лет), периоду обращения (<27 сут), конвекции (несколько минут — несколько недель), диффузии (10<sup>13</sup> лет) и др. Происхождение этого периода остается неизвестным. Что касается 27-дневных вариаций, то они явно связаны с вращением Солнца и повторным появлением на видимом диске достаточно долгоживущих активных областей. Амплитуда их растет с общим ростом активности в 11-летнем цикле. Однако в периоды, когда большое число активных областей равномерно распределено по солнечному диску, средняя УФ-радиация повышена, но 27-дневная вариация будет малой.

### *Данные по солнечному ветру*

Данные по солнечному ветру (скорость и плотность протонов) обновляются каждые 10 минут. Они являются результатом обработки поступающей в реальном времени со спутника *ACE* (*The Advanced Composition Explorer*) информации, публикуемой Центром изучения космической среды Национального управления США по делам океана и атмосферы (*NOAA*). *ACE* находится в точке Лагранжа Л1, между Землей и Солнцем, на расстоянии 1,5 млн. км от Земли, что позволяет спутнику делать предупреждения об увеличении геомагнитной активности за час до его обнаружения на Земле.

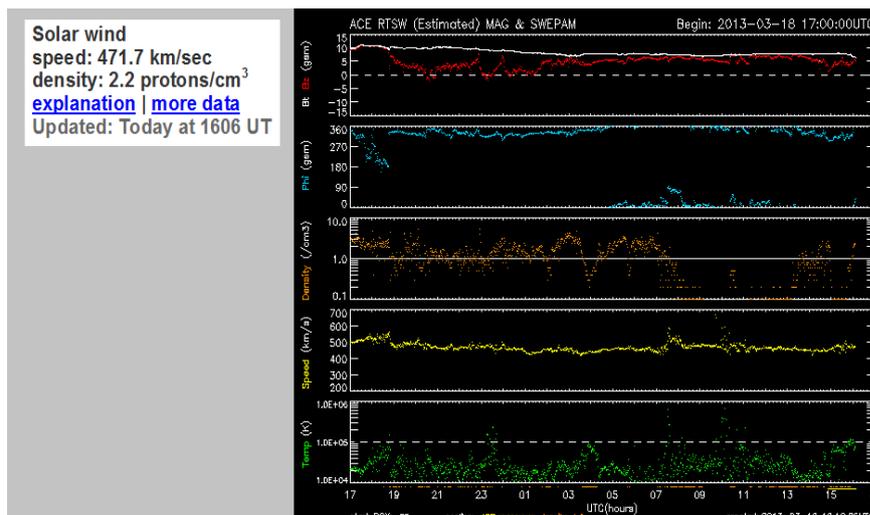


Рис. 3.13. Данные по солнечному ветру на *spaceweather.com*

### Межпланетное магнитное поле

Основным фактором, определяющим динамику магнитосферы, является величина  $z$ -компоненты ММП (далее обозначаемого как  $B_z$ ) в гео-солнечно-магнитосферной системе координат (<http://www.kosmofizika.ru/spravka/coordinates.htm>). Ось  $x$  этой системы направлена на Солнце, ось  $z$  — приблизительно перпендикулярна плоскости эклиптики и отклоняется от направления в зенит синхронно с направлением геомагнитного диполя (рис. 3.14). Компоненты ММП, лежащие в плоскости эклиптики, в значительной степени определяются крупномасштабной спиральной структурой ММП, а вертикальная компонента варьируется более свободно.

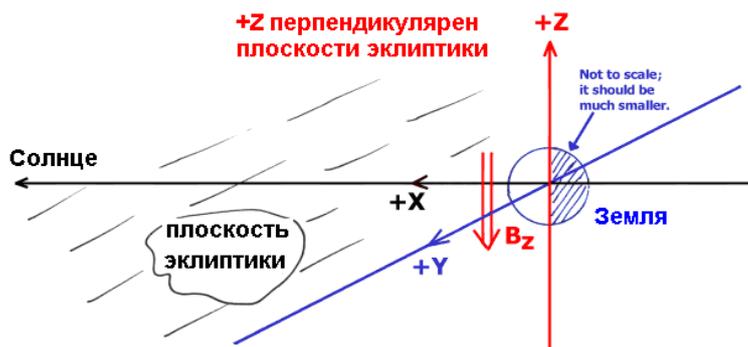


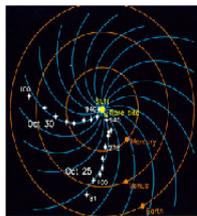
Рис. 3.14. Система координат, связанная с потоком солнечного ветра.

$X$  - линия от Земли к Солнцу (Earth-Sun Line);

$Z$  = - проекция оси геомагнитного диполя на плоскость  $YZ$   
в Geocentric Solar Magnetospheric System.

Поле солнечного ветра  $B_z$  отрицательно (направлено к югу)

Interplanetary Mag. Field  
 $B_{total}$ : 7.7 nT  
 $B_z$ : 3.2 nT north  
[explanation](#) | [more data](#)  
 Updated: Today at 1451 UT



The IMF is represented by the blue arcs in the picture above. This picture shows the spiral nature of the IMF. Click on image for full size NASA

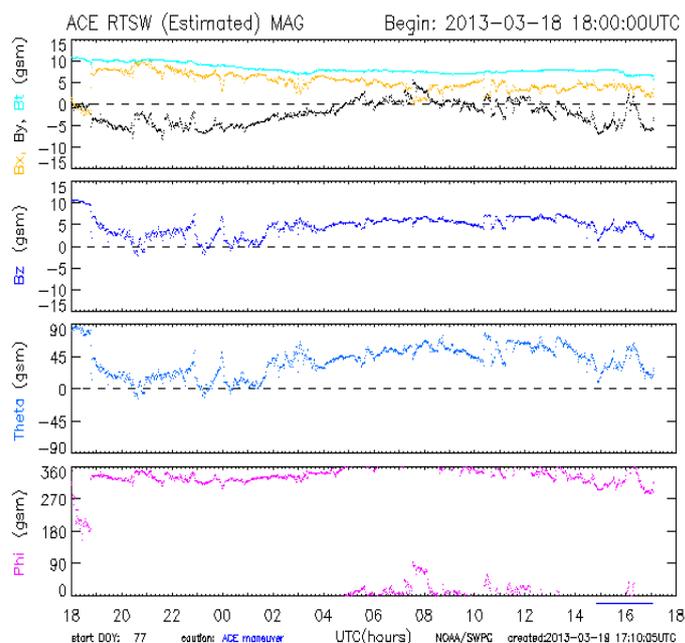


Рис. 3.15. Данные о межпланетном магнитном поле на *spaceweather.com*

### Магнитные бури

Изменения магнитного поля на Земле во время магнитных бурь носят глобальный характер (исключением являются небольшие области вблизи магнитных полюсов) и составляют в максимуме не более 500 нТ. Изменение же магнитного поля во время суббури носит локальный характер и может составлять  $1-3 \cdot 10^3$  нТ (надо помнить, что постоянное поле Земли составляет около  $30-50 \cdot 10^3$  нТ, т.е. в любом случае речь идет об изменениях, не превышающих несколько процентов, что значительно меньше полей техногенного происхождения).

Состояние магнитосферы описывается рядом различных индексов, рассчитываемых на основании наземных измерений магнитного поля. Так как для конструирования этих индексов используются показания различных сетей магнитных станций, то в них оказываются включенными отклики различных магнитосферно-ионосферных токовых систем. Положение двух систем наземных станций, данные которых используются для вычисления  $Dst$ - и  $Kp$ -индексов, наиболее часто применяющихся для описания магнитных бурь, показаны на рис. 3.16.

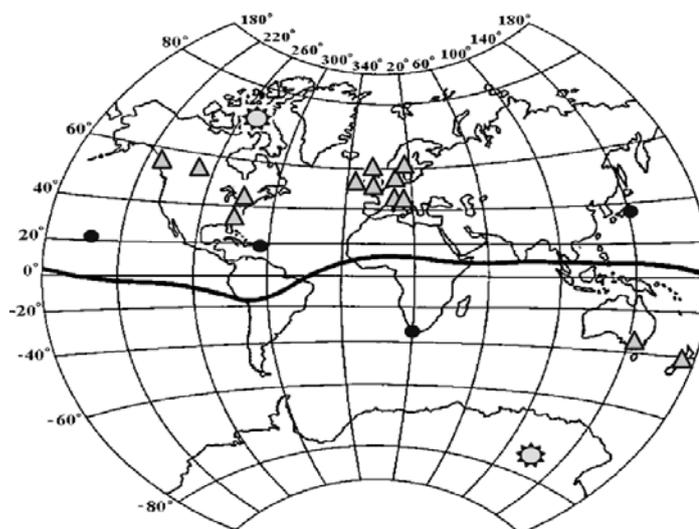


Рис. 3.16. Схема размещения двух систем наземных станций, данные которых используются для определения индексов  $Dst$  (кружки) и  $Kp$  (треугольники). Звездочками отмечено местоположение магнитных полюсов; утолщенная линия – геомагнитный экватор

Геомагнитные бури имеют несимметричный по времени характер развития: в среднем фаза нарастания возмущения (главная фаза бури) составляет около 7 часов, а фаза возвращения к исходному состоянию (фаза восстановления) - около 3 суток.

Интенсивность геомагнитной бури обычно описывается индексами  $Dst$  (англ. Disturbance Storm Time Index) и  $Kp$ . С ростом интенсивности бури индекс  $Dst$  уменьшается. Так, умеренные бури характеризуются  $Dst$  от  $-50$  до  $-100$  нТл, сильные — от  $-100$  до  $-200$  нТл и экстремальные — ниже  $-200$  нТл.

Во время магнитной бури возмущения магнитного поля на поверхности Земли имеют величину менее или порядка 1% от величины стационарного геомагнитного поля. Последнее варьируется от  $0,34$  Э у экватора до  $0,66$  Э у полюсов Земли, то есть приблизительно равно  $(30-70) \cdot 10^3$  нТл.

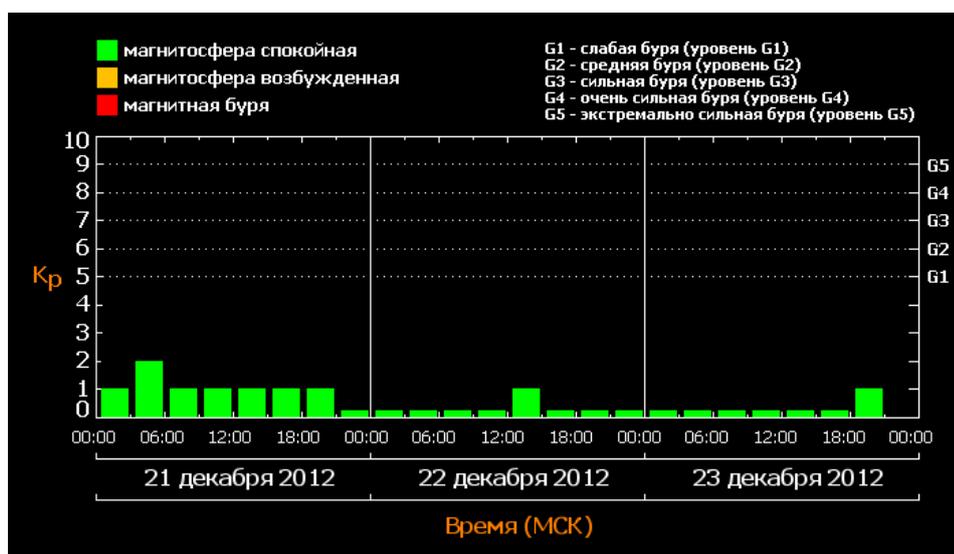


Рис. 3.17. Магнитные бури на сайте ТЕСИС

Частота появления умеренных и сильных бурь на Земле имеет чёткую корреляцию с 11-летним циклом солнечной активности: при средней частоте около 30 бурь в год их число может составлять 1-2 бури в год вблизи солнечного минимума и достигать 50 бурь в год вблизи солнечного максимума. Это означает, что в годы солнечного максимума человечество до 50 % времени года живёт в условиях умеренных и сильных бурь, а за свою 75-летнюю жизнь среднестатистический человек проживает в условиях умеренных и сильных бурь в общей сложности 2250 бурь или около 15 лет. Распределение геомагнитных бурь по их интенсивности имеет в области высоких интенсивностей быстро спадающий характер, и поэтому экстремально сильных магнитных бурь за историю их измерения было сравнительно мало.

Во время геомагнитной бури 1859 г. («событие Кэррингтона») Dst-индекс геомагнитной активности достигал  $-1760$  нТл.

Ледяные керны свидетельствуют, что события подобной интенсивности повторяются в среднем примерно раз в 500 лет. Самая сильная буря с начала космической эры (с 1957 г.) произошла 13 марта 1989 года, когда Dst-индекс геомагнитной активности достигал  $-640$  нТл. Также после 1859 года менее сильные бури происходили в 1921 и 1960 годах, когда отмечались массовые сбои радиосвязи.

В последнюю четверть XX столетия (1976—2000 гг.) было зарегистрировано 798 магнитных бурь с Dst ниже  $-50$  нТл, а в период с 1 января 1957 г. по 25 сентября 2011 г. наиболее сильными бурями с Dst ниже  $-400$  нТл были события 13 сентября 1957 года (Dst =  $-427$  нТл), 11 февраля 1958 (Dst =  $-426$  нТл), 15 июля 1959 ( $-429$  нТл), 13 марта 1989 г. ( $-589$  нТл) и 20 ноября 2003 г. ( $-472$  нТл).

**К**-индекс — это отклонение магнитного поля Земли от нормы в течение трёхчасового интервала. Индекс был введён Дж. Бартельсом в 1938 г. и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трёхчасового интервала (0-3, 3-6, 6-9 и т.д.) мирового времени.

**К<sub>p</sub>**-индекс — это планетарный индекс. **К<sub>p</sub>** вычисляется как среднее значение **К**-индексов, определённых на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44 и 60 градусами северной и южной геомагнитных широт. Его диапазон также от 0 до 9.

**G**-индекс - пятибалльная шкала силы магнитных бурь, которая была введена Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) в ноябре 1999 г. **G**-индекс характеризует интенсивность геомагнитного шторма по воздействию вариаций магнитного поля Земли на людей, животных, электротехнику, связь, навигацию и т.д. По этой шкале магнитные бури подразделяются на уровни от **G1** (слабые бури) до **G5** (экстремально сильные бури). **G**-индекс соответствует **К<sub>p</sub>** минус 4; то есть **G1** соответствует **К<sub>p</sub>**=5, **G2** - **К<sub>p</sub>**=6, **G5** - **К<sub>p</sub>**=9.

*Определение К-индекса как индикатора возмущенности магнитного поля Земли (Будько, Зайцев, 2005)*

Регулярные суточные вариации геомагнитного поля создаются, в основном, изменениями токов в ионосфере Земли из-за изменения освещенности ионосферы Солнцем в течение суток. Нерегулярные вариации магнитного поля возникают вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменений внутри магнитосферы и взаимодействия магнитосферы и ионосферы.

Индексы геомагнитной активности предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных этими нерегулярными причинами. В настоящее время наиболее распространенными являются локальные индексы **K** и **Q**, а также планетарные индексы, определяемые по сети магнитных обсерваторий, – **К<sub>p</sub>**, **Dst** и **AЕ**. Вариации магнитного поля, а также индексы **Q**, **К<sub>p</sub>**, **Dst**, и **AЕ** измеряются в нТл (гаммах). **К<sub>p</sub>**, **Dst**, и **AЕ** индексы характеризуют амплитуду вариаций за часовые или минутные интервалы, **Q**-индекс – за 15-минутный интервал.

**К**-индекс – это квазилогарифмический индекс (увеличивается на единицу при увеличении возмущенности приблизительно в два раза), вычисляемый по данным конкретной обсерватории за трехчасовой интервал времени. Индекс был введен Дж. Бартельсом в 1938 г. и представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0-3, 3-6, 6-9 и т.д.) мирового времени. Для вычисления индекса берется изменение магнитного поля по компонентам **H** и **D** за трехчасовой интервал, из него вычитается регулярная часть, определяемая по спокойным дням,

и полученная величина по специальной таблице переводится в К-индекс.

*Вычисление К-индекса для случая наблюдений в одной точке.*

Исходными данными являются магнитограммы. К-индекс – это ранжированная амплитуда вариаций магнитного поля по горизонтальным компонентам в отклонениях от уровня спокойного магнитного поля за трехчасовой интервал по мировому времени.

Возмущенность магнитного поля сильно меняется с широтой – ее максимум приходится на  $\approx 1079$  зону полярных сияний, поэтому шкала для определения К-индекса имеет разную амплитуду. Для Диксона значение амплитуды К-индекса «9» равно 1500 нТл, для Москвы – 550 нТл, для Сочи – 350 нТл. Таким образом, для каждой обсерватории существует своя таблица, построенная так, чтобы различные обсерватории за большой интервал времени давали в среднем одинаковые индексы.

Для обсерватории Москва эта таблица задается следующим образом:

Таблица 3.4

Вариация, нТл	<5	5-10	10-20	20-40	40-70	70-120	120-200	200-330	330-550	>550
К-индекс	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Так как большинство обсерваторий работают с цифровыми магнитометрами, обработка данных и вычисление К-индексов проводится на компьютерах почти в реальном времени. Есть нерешенные методологические вопросы определения К-индексов, особенно для нулевых значений. Уровень отсчета меняется день ото дня, и учесть эти изменения в компьютерном алгоритме весьма не простая задача.

#### **Использование К-индекса**

Определения К-индекса являются стандартной процедурой магнитных обсерваторий и широко распространены по сети обсерваторий, в том числе, имеющих выход в Интернет.

Локальные К-индексы по обсерватории Москва доступны в реальном времени на сервере ИЗМИРАН: <http://forecast.rssi.ru>.

Смысл оперативного определения К-индекса состоит в том, что большинство прогнозов базируется на его использовании, в том числе и прогнозы, распространяемые ИЗМИРАН и ИПГ. Качественно состояние магнитного поля в зависимости от К-индекса можно приблизительно охарактеризовать следующим образом:

К  $\leq$  2 – спокойное;

- К = 2, 3 – слабовозмущенное;
- К = 4 – возмущенное;
- К = 5, 6 – магнитная буря;
- К  $\geq$  7 – большая магнитная буря.

Понятно, что трехчасовой индекс характеризует состояние магнитного поля в достаточно общем виде. По мере роста знаний о влиянии магнитных бурь на окружающее пространство наметился переход на индексы, определяемые за более короткие интервалы времени, вплоть до 1 мин.

Планетарный индекс К<sub>p</sub> вычисляется как среднее значение К-индексов, определенных на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44° и 60° северной и южной геомагнитных широт. Его диапазон также от 0 до 9, но, в отличие от К-индекса, К<sub>p</sub>-индекс определяется с шагом 1/3, например: 4 – означает 3 и 2/3, 4o – 4 ровно, 4+ означает 4 и 1/3.

В последнее время вместо К<sub>p</sub>-индекса часто употребляется А<sub>p</sub>-индекс.

А<sub>p</sub>-индекс определяется в единицах магнитного поля (наноТеслах) и представляет среднее значение вариации магнитного поля, соответствующее данному К<sub>p</sub>:

Таблица 3.5

<b>К<sub>p</sub> =</b>	<b>0o</b>	<b>0+</b>	<b>1-</b>	<b>1o</b>	<b>1+</b>	<b>2-</b>	<b>2o</b>	<b>2+</b>	<b>3-</b>	<b>3o</b>	<b>3+</b>	<b>4-</b>	<b>4o</b>	<b>4+</b>
<b>А<sub>p</sub> =</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	<b>32</b>

<b>К<sub>p</sub> =</b>	<b>5-</b>	<b>5o</b>	<b>5+</b>	<b>6-</b>	<b>6o</b>	<b>6+</b>	<b>7-</b>	<b>7o</b>	<b>7+</b>	<b>8-</b>	<b>8o</b>	<b>8+</b>	<b>9-</b>	<b>9o</b>
<b>А<sub>p</sub> =</b>	<b>39</b>	<b>48</b>	<b>56</b>	<b>67</b>	<b>80</b>	<b>94</b>	<b>111</b>	<b>132</b>	<b>154</b>	<b>179</b>	<b>207</b>	<b>236</b>	<b>300</b>	<b>&gt;400</b>

А<sub>p</sub> является линейным индексом (увеличение возмущения в несколько раз дает такое же увеличение индекса) и во многих случаях использование А<sub>p</sub>-индекса имеет больше физического смысла.

Планетарные К<sub>p</sub> и А<sub>p</sub> индексы имеются с 1932 г. и доступны по сети Мировых центров данных, см. например <http://swdcwww.kugi.kyotou.ac.jp/index.html>.

На рис. 3.18 представлен прогноз геомагнитных бурь для трех уровней геомагнитной активности, входящий в общий парогноз космической погоды (сайт astro-alert).

## ○ Геомагнитные бури:

Возможность значительных возмущений магнитного поля Земли дана для трёх уровней активности: активно (EN), небольшая буря (EN), сильная буря (EN).

описание

Средние широты

	0-24 ч	24-48 ч
активно	05 %	10 %
небольшая буря	01 %	05 %
сильная буря	01 %	01 %

Высокие широты

	0-24 ч	24-48 ч
активно	15 %	15 %
небольшая буря	15 %	20 %
сильная буря	05 %	15 %

Обновлен: 8 января 2013 в 22:00 UTC  
© SpaceWeather.com

Рис. 3.18. Прогноз геомагнитных бурь на сайте *astro-alert*

### Прогноз геомагнитных штормов

На рис. 3.19 приведен пример ежедневного прогноза солнечной активности (поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см, F10.7) и геомагнитной активности (среднесуточный индекс геомагнитной активности Ap) на 55 суток на сайте ИЗМИРАН.

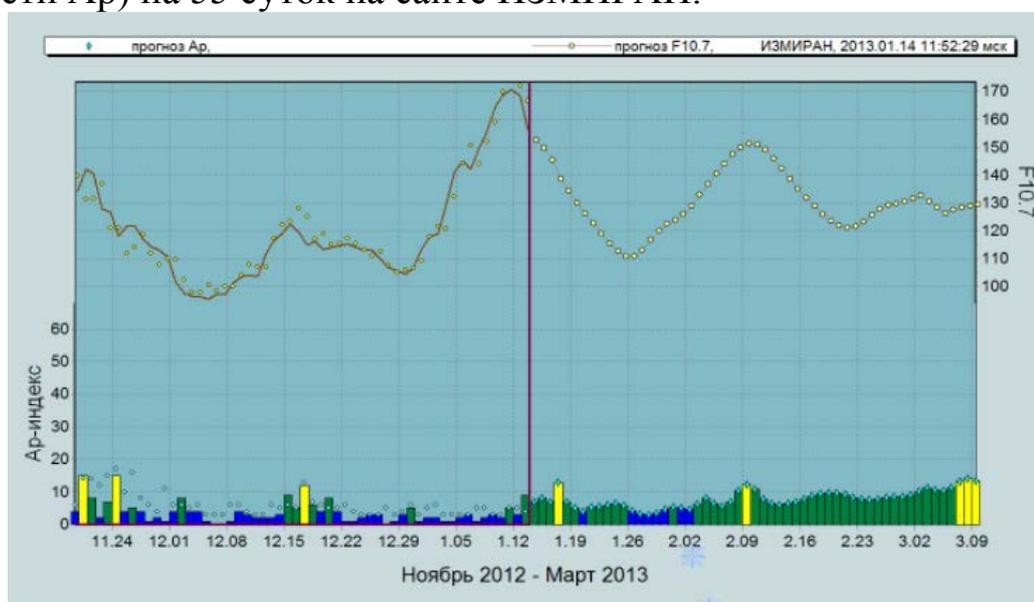


Рис. 3.19. Прогноз солнечной и геомагнитной активности на сайте *ИЗМИРАН*

Правая часть графика отображает прогноз (математическое ожидание) соответствующего прогнозируемого параметра на 55 суток (два оборота Солнца вокруг своей оси), левая – измеренные значения за предыдущие 55 суток (сплошная линия и столбики). Дополнительно точками показаны данные прогнозов, выданных за предыдущие сутки для ви-

зуальной оценки точности. Ар-индексы измеряются в нТл (от 0 до 250), F10.7 – в единицах потока ( $1 \cdot 10^{-22}$  Вт/м<sup>2</sup>/Гц) – от 55 до 250.

На рис. 3.20 представлен прогноз геомагнитной активности на 20 дней.

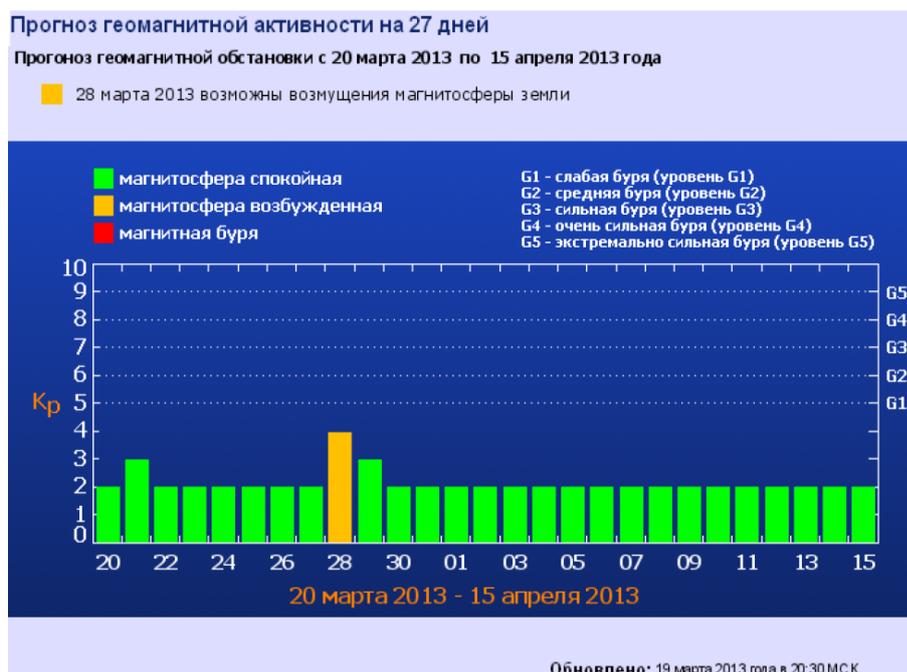


Рис. 3.20. Прогноз геомагнитной активности на сайте ТЕСИС

### 3.3. Космическая погода в Интернете

Интернет в настоящее время является практически основным инструментом, дающим возможность оперативно получать различные, в том числе астрономические и геофизические данные, и использовать их в различных расчетах, моделях, прогнозах и т.д.

Здесь мы приводим обзор основных организаций, занимающихся исследованиями в области солнечно-земной физики.

В настоящее время в on-line режиме доступны наблюдения достаточно большого числа наземных и космических проектов. Важным аспектом такого режима в солнечно-земных исследованиях является возможность распространять и получать данные в реальном времени практически сразу после их измерения, что позволяет всем желающим проводить, например, экспресс анализ всплесков солнечной активности и геомагнитных возмущений для оценки текущего состояния «космической погоды».

Помимо источников данных существует и большое количество вспомогательных ресурсов, предоставляющих доступ к различным продуктам анализа: начиная с вычислений геомагнитных координат и каталогов различных геофизических событий (например, солнечных вспы-

шек) до возможности обращения к численным моделям, при использовании которых требуется применение суперкомпьютеров. Важным подспорьем исследователям и преподавателям в области физики солнечно-земных связей являются электронные архивы различных журналов и конференций, описания проектов, материалы научно-популярного и учебного характера.

Необходимо отметить, что по правилам финансирующих организаций США и Европы, любой проект по космическим исследованиям в обязательном порядке должен содержать образовательную и научно-популярную части (*public outreach and education*), на создание которых должна быть потрачена определенная часть бюджета. Это привело к наличию большого количества англоязычной информации по солнечно-земной тематике в Интернете (Будько, Зайцев, 2005; Петрукович, 2009).

**Центр прогнозов Института прикладной геофизики Гидрометеослужбы РФ** — официальный источник прогнозов в России ([www.geospace.ru](http://www.geospace.ru)).

#### **Пример страницы ИПГ**

ОБЗОР КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ С 11 ПО 13 ЯНВАРЯ 2013 ГОДА.

Интегральная солнечная активность - умеренная.

На диске Солнца наблюдалось от шести до девяти групп пятен.

Самыми активными были группа 1654 (N08E04) и 1652 (N19W28).

Площадь группы 1654 уменьшилась от 1100 до 950 МДП, магнитная конфигурация остается сложной - BG. 11 января в ней зарегистрировано две вспышки класса M: M1.2 в 13.11 МСК продолжительностью 34 минуты и M1.0/SF в 19.07 МСК продолжительностью 33 минуты. Площадь группы 1652 (N19W14) - 210 МДП, магнитная конфигурация - BG. В ней 13 января зарегистрированы две короткие вспышки класса M: M1.0 в 04.50 МСК (7 минут) и M1.7 в 12.38 МСК (5 минут). Остальные группы - спокойные и устойчивые, простой магнитной конфигурации.

Вспышечная активность 11 и 13 января - умеренная, 12 января - низкая.

Геомагнитное поле по данным среднеширотных станций 11 и 12 очень спокойное, 13 - спокойное. Состояние геомагнитного поля в высоких широтах

11 и 12 января оценивалось от очень спокойного до спокойного, 13 января от слабо возмущенного по данным станций Мурманск, Амдерма, Валькаркай до

умеренно возмущенного по данным станций Диксон, Кренкель, о. Известий.

Источник возмущения геомагнитного поля - ускоренный поток солнечного ветра от корональной дыры.

Радиационная обстановка на трассах полета КА - невозмущенная.

По данным УГМС Мурманска срывы КВ-радиосвязи были зарегистрированы на трассах: Кольского полуострова в 00-04, 19-23 МСК; северного и восточного направлений в 00-07, 22-23 МСК; южного направления в 06-09, 21-23 МСК.

ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА 14-15 ЯНВАРЯ 2013 г.

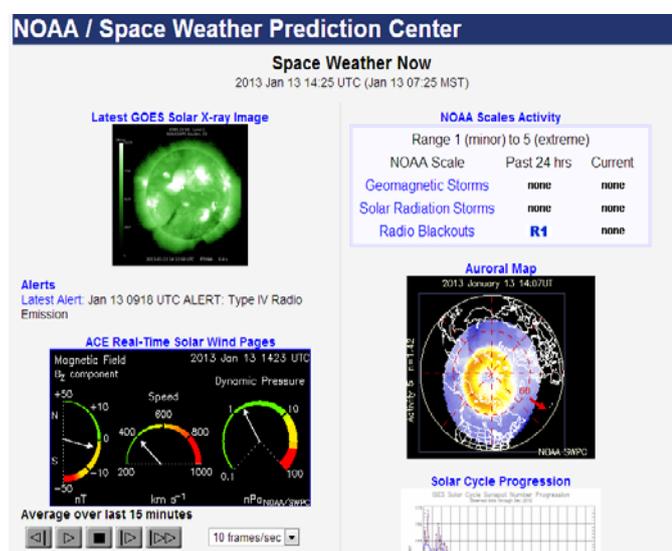
Вспышечная активность ожидается умеренная, возможны вспышки до класса X, в том числе возможны протонные; геомагнитное поле 14 января -

спокойное, с отдельными периодами неустойчивости в связи с приходом ускоренного потока солнечного ветра от корональной дыры; 15 января - спокойное.

В радиационной обстановке возмущения маловероятны.  
Ожидаются срывы КВ-радиосвязи в отдельные часы суток.

ВЫПОЛНЕНО 14.01.2013 11.40 МСК ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА  
ФГБУ "ИПГ"

**Space Environment Center, SEC** (<http://www.sec.noaa.gov/>) – самый известный центр космической погоды, Боулдер, США, имеющий поддержку от ВВС США, и ведущий самый широкий международный обмен данными по космической погоде. Центр ведет оперативную работу, исследования и архив данных. При нем имеется МЦД по СЗФ, и ряд других структур для представительства США в международных организациях.



**SpaceWeather.com** - коммерческая компания, компактно и достаточно полнопредставляющая данные по космической погоде. Также даны ссылки на все ведущие зарубежные источники данных.

spaceweather.com

Subscribe to SpaceWeatherNow

News and information about the Sun, Earth, and Universe

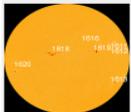
[AURORA ALERTS](#)
[SUBMIT YOUR PHOTOS](#)
[3D SUN](#)
[CONTACT US](#)
[SUBSCRIBE](#)
[FILES](#)
[SCIENCE@NASA](#)

### Current Conditions

**Solar wind**  
 speed: 418.7 km/sec  
 density: 1.6 protons/cm<sup>3</sup>  
[update](#) | [more data](#)  
 Updated: Today at 08:00 UT

**X-ray Solar Flares**  
 6-Hr max: M1.066 UT Nov21  
 24-Hr M1.066 UT Nov21  
[update](#) | [more data](#)  
 Updated: Today at 08:00 UT

**Daily Sun: 21 Nov 12**



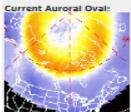
Sunspot AR1115 has a beta-gamma magnetic field that harbors energy for [large solar flares](#). Credit: SOHO/MDI

**Sunspot number: 119**  
 What is the sunspot number?  
 Updated: 21 Nov 2012

**Spoiless Days**  
 Current Streak: 0 days  
 2012 total: 0 days (0%)  
 2011 total: 2 days (-1%)  
 2010 total: 51 days (14%)  
 2009 total: 280 days (71%)  
 Since 2004: 521 days  
 Typical Solar Min: 496 days  
 Update: 21 Nov 2012

**The Radio Sun**  
 10.7 cm flux: 141 sfu  
[update](#) | [more data](#)  
 Updated: 21 Nov 2012

**Current Auroral Oval:**



Station by [SOHO](#), [JCSA](#), [New Zealand](#), [Azerbaijan](#). Credit: NOAA/POES

**Planetary K-index**  
 Now: Kp=2 quiet  
 24-Hr max: Kp=4 unsettled  
[update](#) | [more data](#)  
 Interplanetary Mag. Field  
 B<sub>z</sub>: 4.1 nT  
 B<sub>y</sub>: 2.7 nT south  
[update](#) | [more data](#)  
 Updated: Today at 08:00 UT

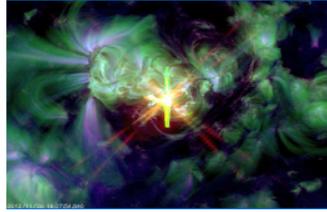
### What's up in space

Wednesday, Nov. 21, 2012

Metallic photos of the sun by renowned photographer Greg Pappe bring together the best of art and science. Buy one or a whole set. They make a stellar gift.

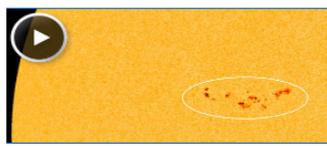
**SOLAR WIND:** A medium-speed (~425 km/s) stream of solar wind is buffeting Earth's magnetic field. The solar wind is not blowing hard enough to ignite a full-fledged geomagnetic storm, but it is stirring up some beautiful auroras around the Arctic Circle. Check the [satellite aurora gallery](#) for latest images.

**M-CLASS SOLAR FLARES:** The magnetic canopy of big sunspot AR1115 is crackling with **M-class** solar flares. This image taken by NASA's Solar Dynamics Observatory shows the extreme ultraviolet flash from one of them, an M1.5-class flare on Nov. 20th at 19:25 UT.



This eruption, and another one like it about 7 hours earlier, might have propelled fast coronal mass ejections (CMEs) toward Earth. If so, the impacts would likely commence on Nov. 23rd, with a chance of high-latitude geomagnetic storms following their arrival. Stay tuned for updates. [Aurora alerts](#): [text](#), [voice](#)

**FAST-GROWING SUN SPOT (Updated Nov. 21):** Only a few days ago, sunspot AR1115 was almost invisible. Now it is a blemish more than 10 times wider than Earth. A movie from NASA's Solar Dynamics Observatory shows the sunspot's development on Nov. 20-21.



As the sunspot evolves, so does its intense magnetic field—and this means strong flares are in the offing. Fast-changing magnetic fields on the sun have a tendency to **reconnect and erupt**. NOAA forecasters estimate a 70% chance of **M-class** flares and a 15% chance of **X-class** during the next 24 hours. Because of the sunspot's nearly central location on the solar disk, any eruptions will likely be Earth-directed. [Solar flare alerts](#): [text](#), [voice](#)

**Realtime Space Weather Photo Gallery**

**INSIDE THE SHADOW OF THE MOON:** On Nov. 13/14, the Moon passed directly in front of the sun. This arrangement, which produced a **total eclipse**, cast the shadow of the Moon directly down on northeast Australia. Using a wide-field camera, eclipse-chaser Alan Dyer photographed the shadow as it raced across the sky over Lakesland Downs, Queensland. Scan the images, then read Dyer's

archives  
 November  
 21  
 2012  
[View](#)

**Solar Telescope**  
 Recommended by the *Flow Awards*

**APOLLO 17 FOR**  
 Where your mission is

averted imagination

**FINE METEORITE RINGS**

**AURORA PHOTO TOURS**  
 EXPLORE THE AURORA

**SOLAR CATAclysm**  
 LAUNCHING IN 2013  
 ORDER AT APOLLO 17 FOR \$25

[START READING](#)

**LaplacianMedia**

[Click here >>>](#)

**Satellite Toys**  
 For iPhone & Android

**put your ad here**  
[CLICK HERE FOR DETAILS](#)

**SunGazer.net**

**solar astronomy.org**  
 outreach, imaging & research

## SOHO SpaceWeather

Сайт орбитальной солнечной обсерватории SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), выведенной в лагранжеву точку  $L_1$  системы Земля-Солнце. Основной задачей аппарата является сбор информации о состоянии солнечной атмосферы, глубинных слоях Солнца, солнечном ветре, активности солнечной короны. Кроме того, аппаратом SOHO открыто более 2000 околосолнечных комет.

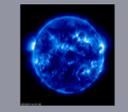
**PICK OF THE WEEK**  
**EIGHT DAYS A WEEK (JANUARY 11, 2013)**  
 The Sun celebrated the new year by ejecting at least six 'eruptive prominences' over 8 days... [more >](#)

**HOT SHOTS FROM SOHO**  
**COMPOSITE ECLIPSE**  
 Total solar eclipses offer unique opportunities to study the solar corona, the Sun's outermost atmosphere, in detail from the ground. This composite of the latest eclipse... [read the story >](#)

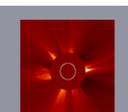
**SPOTLIGHT**  
**JHELIOVIEWER: A NEW WAY OF LOOKING AT THE SUN**  
 Jhelioviewer is new visualization software that enables everyone, anywhere to explore the Sun... [read the story >](#)

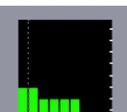
**ALSO DON'T MISS - SOHO RSS Feed**

- Outreach Spotlight
- Science@ESA Vodcasts
- Sentinels Of The Heliosphere (QT, MPEG)
- What's New and Free Stuff
- SunWorks Exhibit
- Sun-Earth Day Webcasts

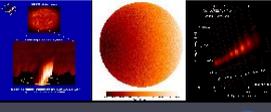
**THE SUN NOW**  


**SUNSPOTS**  


**SPACEWEATHER**  


**ESTIMATED KP**  


**SOLAR WIND**  
 At 10:47 UT  
 Speed: 500 km/s  
 Density: 2.91 p/cm<sup>3</sup>

**BEST OF SOHO**  


European Site • US Site  
 Feedback & Comments: SOHO Webmaster

SOHO is a project of international cooperation between  and 

**NASA. Marshall Space Center 9** (<http://www.spaceweather.com/>) – публичный сайт поддерживаемый космическим центром Маршалла (США). Компактно и достаточно полно представлены данные по космической погоде почти в реальном времени. Также даны ссылки на все ведущие зарубежные источники по космической погоде.

**Solar Physics**  
Marshall Space Flight Center

**The Solar Wind**

The solar wind streams off of the Sun in all directions at speeds of about 400 km/s (about 1 million miles per hour). The source of the solar wind is the Sun's hot **corona**. The temperature of the corona is so high that the Sun's gravity cannot hold on to it. Although we understand why this happens we do not understand the details about how and where the coronal gases are accelerated to these high velocities. This question is related to the question of **coronal heating**.

**Solar Wind Variations**

The solar wind is not uniform. Although it is always directed away from the Sun, it changes speed and carries with it **magnetic clouds, interacting regions** where high speed wind catches up with slow speed wind, and **composition variations**. The solar wind speed is high (800 km/s) over **coronal holes** and low (300 km/s) over **streamers**. These high and low speed streams interact with each other and alternately pass by the Earth as the Sun

**ВМФ США** (<http://ppdweb.nrl.navy.mil/whatsnew/prediction/>) – центр прогнозов космической погоды ВМФ США. Основная задача – прогноз больших магнитных бурь. Проект реализован совместно лабораторией космической плазмы ВМФ и лабораторией спутника WIND из НАСА, руководитель доктор Р.Леппинг (Dr. Ronald P. Lepping), (<http://lep.mfi.gsfc.nasa.gov/mfi/windmfi.html>).

**Геофизический институт на Аляске** (<http://gse.gi.alaska.edu/recent/>) – прогнозы выдаются в форме параметров солнечного ветра, рассчитанные по модели Хакамада-Акасофу-Фрай. По договоренности с SEC в Боулдере, центр на Аляске выдает прогноз космической погоды после прихода явной ударной волны.

**Канада, мониторинг космической погоды.** Все организации Канады, ведущие работы по космической погоде объединены в программе CGSM – Canadian GeoSpace Monitoring (<http://cgsm.ca/cgsm.htm>). Сеть обсерваторий включает 16 пунктов, чьи данные по сети Интернет собираются для обработки на специальном портале, (<http://kate.nic.ualberta.ca:8000/portal/wwwssdp/>).

**Канада, сеть магнитных обсерваторий.** В рамках Геологической службы Канады имеется сеть обсерваторий ([http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/index\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/index_e.php)). По данным этой сети налажена служба оповещений о событиях космической погоды, ([http://www.spaceweather.gc.ca/myservlet/geomag/forecast/main\\_e.jsp](http://www.spaceweather.gc.ca/myservlet/geomag/forecast/main_e.jsp)).

**ESA** (<http://www.estec.esa.int/wmwww/wma/spweather/>) – сайт Европейского космического агентства по космической погоде, ESA Space Weather Web Server, на котором представлены все программы ЕКА имеющие отношения к космической погоде. Разработку сайта поддерживают все ведущие космические фирмы Европы и фактически этот сайт в ближайшее время должен превратиться в общеевропейский портал по космической погоде. Имеется доступ к базам данных космических экспериментов, выполненных под эгидой ЕКА. Здесь же размещен ежемесячный бюллетень Space Weather Euro News (SWEN).

**ОМА** (<http://sidc.oma.be/index.php3>) – основной европейский прогнозный центр в Бельгии. SIDC-Solar Influences Data analysis Center выставляет оперативный ежесуточный прогноз, дает ссылки на другие центры, в основном оперирует с солнечными данными, солнечными пятнами и другими космическими данными. В центре работает группа молодых специалистов, которая ведет разработку компьютерных инструментов для работы с экспериментальными данными, в первую очередь по СОНО. Инструменты доступны в сети Интернет.

**Англия, служба геомагнитной активности и космической погоды.** В рамках Британской геологической службы находится отдел геомагнетизма, включающий первый сервер системы Интермагнет. Одно из подразделений выдает состояние и прогнозы космической погоды для всех организаций в Англии и ЕКА (<http://www.geomag.bgs.ac.uk/spweather.html>).

**Служба космической среды, Япония** (<http://hirweb.nict.go.jp/index.htm>). Прогноз КП в Японии производит Национальный институт информации и коммуникационных технологий (НИКТ). Как правило, данные приводятся в обработке по оригинальным японским алгоритмам на основе национальных и зарубежных данных, доступных по сети Интернет. Например, секторная структура межпланетного магнитного поля (СС ММП) в солнечном ветре по данным спутника ACE представлена круговой диаграммой, длительностью 27 дней (<http://www2.nict.go.jp/dk/c231/ace/27day/>).

**STELAB.** Лаборатория солнечно-земных связей Университета Нагойя (<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/index.html>) ведет исследования

и выдает оперативную оценку космической погоды методом AMIE, а также ведет систему GEDAS, Geospace Environment Data Analysis System, представляющую собой набор блоков для представления космических данных (<http://gedas22.stelab.nagoya-u.ac.jp/index.html>).

**Международная служба космической среды** International Space Environment Service ISES (<http://www.ises-spaceweather.org/>). До 1996 года

эта была служба IUWDS (International URSIgram and World Days Service). В настоящее время во всем мире имеется 11 центров, в Москве такой центр в ИПГ Гидромесслужбы (П.Свидский), чья зона ответственности - все страны СНГ. ISES поддержана всеми научными международными организациями как Federations of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services (FAGS), International Union of Radio Science (URSI), International Astronomical Union (IAU) and the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Действующий директор ISES – Д.Ботелер, Канада.

**Австралия.** Традиционно в Австралии имеется центр прогнозов по солнечно-земной физике, в том числе космической погоды ([http://www.ips.oz.au/Space\\_Weather](http://www.ips.oz.au/Space_Weather)).

### **Мировые центры данных по солнечно-земной физике**

**Мировой центр данных по СЗФ, Москва** (<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>). В центре имеются данные по всем разделам солнечно-земной физики: Солнечная активность и межпланетная среда, Космические лучи, Ионосферные явления, Геомагнитные вариации и многое другое. Здесь же имеется вход в интерактивную систему данных SPIDR – <http://clust1.wdcb.ru/spidr/>.

**Мировой центр данных в Японии** (<http://swdcd.db.kugi.kyotou.ac.jp/>). Оперативно представлены все индексы магнитного поля Земли: AE-индекс с 1957 года, Dst-индекс с 1957 года, ASY/SYM индекс с 1981 года, Kp-индекс с 1932 года, список наиболее спокойных и возмущенных дней ежемесячно с 1932 года. Имеет ссылки со всеми ведущими центрами геофизических данных.

**Национальный центр геофизических данных, США: раздел солнечно-земная физика** (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>). Модифицированный мировой центр данных в рамках большой сети центров данных в США, имеет ссылки на все центры США.

**Мировой центр данных, Копенгаген, Дания** (<http://web.dmi.dk/projects/wdcc1/>). Классический центр данных, имеет большой архив данных по Гренландии, является подразделением Датского метеорологического института.

**Центр геомагнитных прогнозов и информации, Эдинбург, Англия** ([http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/on\\_line\\_gifs.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/on_line_gifs.html)). Ведущий европейский центр, имеет весь набор данных по СЗФ, а также является первым нодом системы Интермагнит.

## Геомагнитные индексы

**Международная служба Кр-индекса.** Традиционно эта служба находится в Германии, сейчас в Потсдаме ([http://www.gfzpotdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp\\_index/](http://www.gfzpotdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/)).

**Мировой центр данных Кр, Dst и AE** – Киото, Япония. Наиболее авторитетный центр сбора наземных геомагнитных данных и вычисления основных индексов Кр, Dst и AE. Сервис предоставляется в реальном времени (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>). Подобные центры имеются в Эдинбурге, Копенгагене, Бомбее, Москве, Оттаве, Боулдере.

**Индексы Кр на коммерческой основе** (<http://www.nwraaz.com/spawx/>) – сайт на котором собрана информация по индексам космической погоды, созданный частной консалтинговой компанией NorthWest Research Associates, Inc., (NWRA), в которой работает примерно 70 специалистов высокой квалификации. Услуги компания предоставляет по всем аспектам геофизики: океанография, механика морского льда, атмосфера и ионосфера, солнечная физика.

**Dst по спутнику ACE.** В Беркли в солнечной лаборатории налажено определение Dst индекса по прямым данным спутника ACE ([http://sprg.ssl.berkeley.edu/dst\\_index/](http://sprg.ssl.berkeley.edu/dst_index/)).

**СС ММП по спутнику ACE.** В Национальном институте информации и коммуникационных технологий (НИCT) налажено определение секторной структуры межпланетного магнитного поля (СС ММП) в солнечном ветре по данным спутника ACE. Данные наглядно представлены в виде круговой диаграммы длительностью 27 дней (<http://www2.nict.go.jp/dk/c231/ace/27day/>).

**PC-index** в полярной шапке. Индекс магнитной активности в околополюсной области, позволяет оценить влияние солнечного ветра на магнитосферу Земли ([http://www.aari.nw.ru/index\\_en.html](http://www.aari.nw.ru/index_en.html)).

## Солнечно-земная физика в России

**Москва, Институт космических исследований РАН.** Ведущий институт России в области космических исследований, в том числе по солнечно-земной физике (<http://www.iki.rssi.ru/>). Публикует сверхкраткосрочный прогноз геомагнитной активности по данным о параметрах солнечного ветра

**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН),** Троицк. Старейший институт России в области СЗФ (<http://www.izmiran.ru.>). Основан в 1940 г. Является частью системы Мировых Центров Данных по геофизике, Солнцу и окружающей среде. В период МГГ, 1957-1958 гг. ИЗМИРАН создал сеть комплексных магнитно-ионосферных обсерваторий как основу

службы космической погоды и новых региональных институтов по СЗФ. На сайте ИЗМИРАН имеется обширная информация по космическим экспериментам, последний из которых проект КОРОНАС. Кроме того, в ИЗМИРАН работает Центр прогнозов геофизической обстановки, (<http://forecast.izmiran.rssi.ru/>).

The screenshot shows the website of the Institute of Cosmic Research (IZMIRAN). At the top, there is a navigation bar with the IZMIRAN logo and the text 'Институт Космических Исследований Space Research Institute'. Below this is a large banner titled 'ДРУГИЕ МИРЫ' (Other Worlds) with a space-themed background. To the right of the banner is a calendar for April 2012, with dates 1 through 30. Below the calendar is a 'Новости' (News) section with several bullet points: '1 марта 2012 академику Соляеву Р.А. - 70 лет!', '1 декабря 2012 - первые результаты российского эксперимента DAN на борту марсохода MARS SCIENCE LABORATORY', and 'Открыто жесткое рентгеновское излучение титана-44 от остатка сверхновой 1987A'. There are also sections for 'Издательская деятельность' (Publishing activity) and 'Программы и направления' (Programs and directions).

The screenshot shows a forecast page from the IZMIRAN website. At the top, it says 'ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИЗМИРАН' and 'Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова (ИЗМИРАН)'. The main heading is 'Центр прогнозов космической погоды'. The page features several sections: 'Ежедневный прогноз геомагнитной активности на 11 часов 26 апреля 2012 г. (время московское)', 'Примеры других прогнозов' (Examples of other forecasts), 'Погода в г.Троицке Московской области (текущие сутки)', and 'Вариации магнитного поля (текущие сутки)'. There are also numerical indicators: 'Ar=56' and 'F=127.2'. The page includes a small graph showing geomagnetic activity and a table of data. At the bottom, there is contact information for the center's director, Gaidash Sergey Petrovich.

**Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Санкт-Петербург** (<http://www.gao.spb.ru>). Основанная в 1839 г. в качестве центрального астрономического учреждения России, координировала также первые отечественные исследования в области СЗФ. Выпускает электронный бюллетень «Солнечные данные» (<http://www.gao.spb.ru/russian.win/sd>).

Горная станция ГАО РАН, Кисловодск (<http://www.solarstation.ru>) Основана в 1948 г. Головное учреждение Службы Солнца СССР. Единственное учреждение России, продолжающее ежедневные комплексные наблюдения Солнца до настоящего времени.

**Москва, НИИЯФ МГУ.** Институт ядерных физики при МГУ успешно ведет космические эксперименты (<http://www.npi.msu.ru/sinp.php3>). Честь открытия радиационных поясов принадлежит академику Вернову и его коллегам. С тех пор это направление исследований остается одним из приоритетов НИИЯФ. В настоящее время здесь собраны уникальные данные, часть которых доступна по сети <http://www.magnetosphere.ru/dataintr.html>.

**Иркутск, ИСЗФ.** В Сибири и на Дальнем Востоке имеется целая сеть институтов и обсерваторий, ведущих исследования в области СЗФ. Основные информационные ресурсы находятся на сайте Института солнечно-земной физики в Иркутске ([www.iszf.irk.ru](http://www.iszf.irk.ru)).

**Камчатка, ИКИР.** Самый дальний научный институт по СЗФ расположен на Камчатке (<http://www.ikir.kamchatka.ru>). Кроме научных лабораторий ИКИР поддерживает работу комплексных экспедиций и обсерваторий: Мыс Шмидта, Магадан, Ю-Сахалинск, Хабаровск.

**Мурманск и Апатиты, ПГИ.** Полярный Геофизический институт РАН делится на две части – главная в Мурманске ([http://www.olasc.net.ru/pgi\\_r/](http://www.olasc.net.ru/pgi_r/)) и вторая – в Апатитах (<http://pgi.kolasc.net.ru/>). В Апатитах ежегодно проводится общероссийский семинар по полярным суббурям.

**Якутск, ИКФИА.** Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера в Якутске ведет исследования космических лучей, полярных сияний и эффектов высыпающей радиации (<http://ikfia.ysn.ru/>). Имеется раздел долгосрочных прогнозов космической погоды по космическим лучам (<http://ikfia.ysn.ru/fluctuations/index.php>).

**Томск.** Сайт <http://sosrff.tsu.ru/> содержит данные комплексного мониторинга геофизической обстановки: данные наблюдений магнитного поля, ионосферы и шумановских резонансов в реальном времени на станции Сибирского Физико-технического института, Томск. Цифровые данные по запросу можно получить, начиная с августа 2000 года.

**Арктика и Антарктика, ААНИИ.** На сайте отдела геофизики ААНИИ, Санкт Петербург ([http://www.aari.nw.ru/clgmi/geophys/mag\\_main.htm](http://www.aari.nw.ru/clgmi/geophys/mag_main.htm)) представлены данные магнитных обсерваторий в реальном времени в Арктике и Антарктике, которые получает и обрабатывает отдел геофизики ААНИИ. Как правило, на сайте есть данные обсерваторий Диксон, Челюскин, Шпицберген, Тикси, Норильск, Певек, Восток, Мирный, Новолазаревская.

**База данных SPIDR.** Российская версия базы данных SPIDR (The Space Physics Interactive Data Resource) установлена в Москве (<http://clust1.wdcb.ru/spidr>). SPIDR в своей основе имеет спутниковые и наземные данные, используемые в службах по космической погоде США. Кроме России и США, система SPIDR установлена также в Японии, Китае, Австралии и Южной Африке.

## **Образовательные ресурсы в России**

**1. Санкт-Петербург, Университет.** Старейший Университет России традиционно готовит физиков-геофизиков, специалистов по космическим исследованиям (<http://geo.phys.spbu.ru>).

**2. Москва, НИИЯФ МГУ.** К 250-летию юбилею МГУ был запущен микроспутник МГУ-250-Татьяна (<http://cosmos.msu.ru/>). На сайте имеется информация о работе спутника, а данные спутника доступны для анализа. Кроме этого на сайте имеется мультимедийный курс «Жизнь Земли в атмосфере Солнца», для ознакомления учащихся с основными физическими свойствами ближайшего космического пространства и Солнца, а также задания в виде специального космофизического практикума.

**Москва, Космофизика** (<http://www.kosmofizika.ru>). На сайте приведено много исторических данных по развитию СЗФ в России.

**Педагогический университет, Н.Новгород.** За последние годы в Нижнем Новгороде стали готовить специалистов по СЗФ в педагогическом университете, сайт <http://www.spacelab.nnov.ru/site.aspx>. На сайте собрана информация, полезная для студентов и аспирантов.

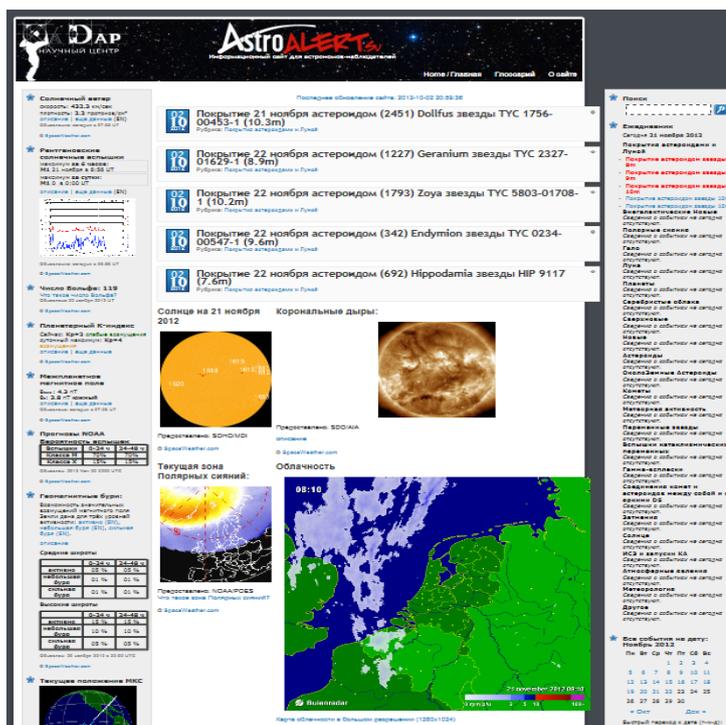
### **Иркутский**

### **Университет**

([http://www.physdep.isu.ru/kaf/kos\\_phis.htm#5](http://www.physdep.isu.ru/kaf/kos_phis.htm#5)).

Солнечно-земная физика, дипольное магнитное поле Земли, магнитосфера Земли, плазмосфера, ионосфера, атмосфера.

**Сайт Ка Дар** ([http://astroalert.ka\\_dar.ru](http://astroalert.ka_dar.ru)). Сайт AstroAlert – проект НЦ Ка-Дар, направленный на оперативное оповещение об интересных событиях в мире наблюдательной астрономии. Сайт создан специально для астрономов-наблюдателей, чтобы облегчить поиск достоверной информации во всех областях практической астрономии и метеорологии.



## Виртуальные обсерватории

<http://vspo.gsfc.nasa.gov> — доступ к данным по космической физике.

<http://virtualsolar.org> — обсерватория солнечных данных.

[www.egso.org/](http://www.egso.org/) — Европейская солнечная обсерватория.

<http://maggy.engin.umich.edu/mist/vgmo.html> — обсерватория геомагнитных данных.

<http://vho.nasa.gov> — обсерватория гелиосферных данных, в основном, по солнечному ветру и космическим лучам.

Сайт **Федерального космического агентства РФ**  
([www.federalspace.ru](http://www.federalspace.ru))



## **Образовательные ресурсы за рубежом**

**НАСА.** Образовательный сайт НАСА по физике магнитосферы, авторы Д. Стерн и М. Передо (<http://www.sprof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html>). На сайте имеется хорошо структурированная информация по всем аспектам физики магнитосферы.

**Университет Райс, США.** Образовательная программа в Университете Райса широко известна, имеет большой объем ресурсов, (<http://space.rice.edu/ISTP/>).

**Университет Оулу, Финляндия.** Учебник по космической физике в виде сборника стандартных текстов по всем аспектам солнечно-земной физики, (<http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/>).

**Университет Бостона, США.** При университете организован Центр по интеграции моделей космической погоды CISM - The Center for Integrated Space Weather Modeling (<http://www.bu.edu/CISM>). Курсы рассчитаны от школьников до аспирантов, в программе участвуют 10 ведущих университетов США по СЗФ.

**НАСА, проект POETRY** (<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/>) – сайт посвящен образовательным программам НАСА, использующим данные спутника IMAGE, название сайта POETRY расшифровывается как «Public Outreach, Education, Teaching and Reaching Youth». Основная задача проекта – популярно объяснить, как солнечные бури воздействуют на Землю, развеять заблуждения по поводу магнитного поля Земли, образования в нем радиационных поясов, и появления полярных сияний.

**НАСА, проект JOVE.** В основе программы JOVE – экспериментальные наблюдения радиоизлучений Юпитера и Солнца (<http://radiojove.gsfc.nasa.gov/>). Авторы программы JOVE разработали простые для повторения радиоприемники, с помощью которых ведется прием космических радиоизлучений, а затем проводится их анализ и обсуждение в сети Интернет. Для участников программы разработаны учебные пособия и регулярно проводятся встречи с учеными НАСА. Подобным же образом работает программа INSPIRE (<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/inspire/>).

**Университет Стенфорда, США.** Стенфордский центр по изучению Солнца имеет один из самых обширных ресурсов по физике Солнца (<http://solar-center.stanford.edu/resources.html>). На сайте имеется большая библиотека образовательных ресурсов как для студентов, так и для учителей. Особенно интересен раздел по гелиосейсмологии – имеется звуковой файл, отображающий колебания Солнца (<http://solar-center.stanford.edu/singing/singing.html>).

**Университет Архус, Дания.** При университете имеется Институт физики и астрономии ([http://bigcat.phys.au.dk/helio\\_outreach/english/engNA0.html](http://bigcat.phys.au.dk/helio_outreach/english/engNA0.html)), в котором подготовлен учебный материал по гелиосейсмологии. В оригинальной и наглядной форме представлены новейшие научные данные по этому разделу СЗФ.

### **Вопросы к главе 3**

1. Как связаны процессы в геосферах с солнечной активностью?
2. Перечислите основные параметры «космической погоды».
3. Для чего нужно контролировать «космическую погоду»?
4. Как связано определение типов погоды, сведения о которых постоянно передают средства массовой информации, с состоянием геомагнитного поля?
5. Изменяются ли типы погоды в отсутствие вспышек на Солнце?
6. Как связаны параметры солнечного ветра и активность Солнца?

## Глава 4

### Экологические аспекты космической опасности

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

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

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

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

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

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

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

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho v^2 CS \quad (4.1)$$

$$\frac{dh}{dt} = -v \sin \theta \quad (4.2)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_z + h} = mg \cos \theta \quad (4.3)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (4.4)$$

Здесь  $m$  – масса метеороида,  $v$  – скорость его подлета к Земле,  $\rho$  – плотность атмосферы в точке,  $S$  – площадь поперечного сечения метеороида (площадь миделя),  $\theta$  – угол его входа в атмосферу,  $h$  – высота над уровнем моря,  $C$  – коэффициент сопротивления воздуха.

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

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

$$P \approx \frac{1}{2} * \rho * v^2, \quad (4.5)$$

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

Таким образом, зависимость изменения скорости тела от действия тормозящей силы и ускорения под действием силы тяжести пропорционально квадрату этой скорости и определяется уравнением (4.5).

Для расчета движения метеороида в нижних слоях атмосферы система уравнений (4.1) – (4.4) не подходит, так как не учитывает абляцию и связанные с ней эффекты потери массы, реактивной силы и т.д.

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

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho v^2 C_S - f v \frac{dm}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \theta \quad (4.7)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_3 + h} + mg \cos \theta - C_L \frac{\rho v^2}{2} S \quad (4.8)$$

$$\zeta \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{2} C_H \rho S (v^2 - v_{cr}^2) n p u v > v_{cr}, \frac{dm}{dt} = 0 n p u v < v_{cr} \quad (4.9)$$

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

Площадь  $S$  в общем случае – величина переменная, причем для случая шара

$$S = S_0 \left( \frac{m}{m_0} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (4.10)$$

Минимальной скоростью столкновения небесного тела с Землей является вторая космическая скорость  $v_2 = 11,2$  км/с, если оно догоняет Землю. Максимальная скорость складывается из скорости обращения Земли вокруг Солнца ( $v_{kp} = 29,8$  км/с), параболической скорости относительно Солнца на расстоянии 1 а.е. ( $v_p = 42,2$  км/с) и второй космической скорости для Земли:

$$v_{\max}^2 = (v_{kp} + v_p)^2 + v_2^2 \quad (4.11)$$

Эта величина составляет  $v_{\max} = 72,8$  км/с. То есть максимальная скорость столкновения всегда превышает критическую  $v_{cr}$ , и при входе тела в верхнюю атмосферу абляция происходит всегда. Угол входа изменяется от  $90^\circ$  (вертикальный вход) до весьма малых значений, которые, впрочем, наблюдаются достаточно редко.

#### 4.1. Воздействие процессов, сопровождающих падение опасного космического тела, на геосистемы

##### *Воздействие на атмосферу и литосферу*

Совокупность сил торможения, гравитации и подъемной силы описывается рядом дифференциальных уравнений (4.1 – 4.9), которые полностью определяют траекторию тела, проходящего через атмосферу и сохраняющего свою целостность. Некоторые из геометрических параметров этой задачи показаны на рис. 4.1 (*Угроза с неба, 2003*).

Крупные тела независимо от угла входа сгореть в атмосфере не успевают. При этом траектория их полета становится все более крутой, пока они не потеряют свою скорость. После этого будет происходить их вертикальное падение в атмосфере при  $\frac{dv}{dt} = 0$ , так как сила тяжести уравновешена силой сопротивления воздуха. В этом случае скорость падения

$$v_n = \left( \frac{m^* g}{C^* \rho^* S} \right)^{0.5} \quad (4.12)$$

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

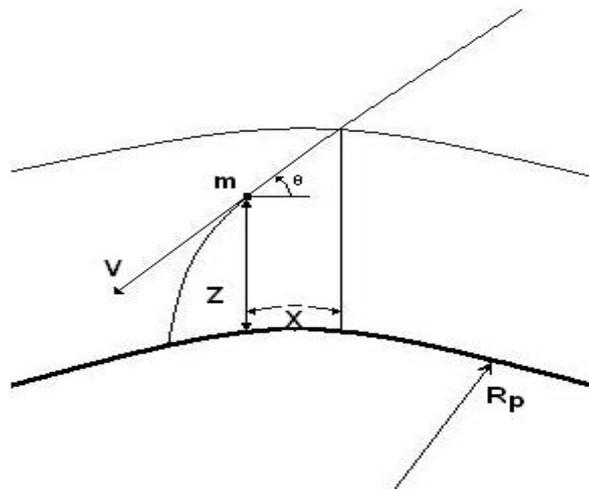


Рис. 4.1. Переменные величины, используемые для описания траекторий движения тела массой  $m$  при прохождении атмосферы планеты радиуса  $R_p$ ,  $V$  – мгновенная скорость и  $\theta$  – мгновенный угол наклона траектории к локальной горизонтали,  $X$  – горизонтальный путь тела, начиная с некоторого произвольно выбранного места,  $Z$  – высота тела над поверхностью планеты

Однако не все тела успевают затормозиться.

Размер небесного тела, способного пройти через атмосферу и на большой скорости врезаться в Землю, определяется неравенством

$$L > 0.15 \frac{P_0}{\rho_0 * g_0 * \sin \theta}, \quad (4.13)$$

где  $P_0$  и  $g_0$  – давление и ускорение силы тяжести на поверхности Земли,  $\rho_0$  – плотность небесного тела. Этот критерий определяет минимальные размеры небесных тел, которые могут сохранить достаточную скорость для образования высокоскоростного ударного кратера. Для Земли это: ледяные метеороиды диаметром более 1,5 м, каменные (>0,6 м) и железные (>0,2 м) метеорные тела. Следует отметить, что данный критерий не относится к обломкам развалившегося в атмосфере тела, которые опускаются на поверхность Земли с дозвуковыми скоростями и образуют ударные кратеры другого вида (Боярчук, 1999).

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

Любое небесное тело, падающее на Землю, сначала встречает на своем пути атмосферу. И лишь пройдя ее, оно может достичь поверхности или, сгорев в атмосфере, передать ей свою энергию.

Процесс входа небесного тела в атмосферу довольно хорошо изучен. Сначала эти тела вступают во взаимодействие с очень разреженной верхней атмосферой, где средняя длина свободного пробега молекул газа превышает диаметр тела. Молекулы газа независимо друг от друга упруго или не упруго сталкиваются с вошедшим в атмосферу небесным телом, вызывая небольшое замедление его скорости, а также выбивают молекулы вещества с его поверхности и нагревают его. Этот режим обтекания не имеет большого значения для крупных небесных тел, но мельчайшие микрометеороиды (менее 10 мкм или 100 мкм диаметром в зависимости от угла и скорости входа в атмосферу) могут полностью замедлиться, отдать приобретенное тепло и придти в состояние покоя в верхних слоях атмосферы, почти не изменившись.

Более крупные тела не так легко затормозить, и они вскоре достигают плотных слоев атмосферы, где их движение характеризуется числом Маха (отношение скорости тела к скорости звука на высоте полета тела), часто превышающим 50. Перед летящим небесным телом образуется ударная волна, и атмосферные газы между ее фронтом и поверхностью тела сильно сжимаются и нагреваются. Поверхность тела плавится и испаряется. Поток воздуха уносит жидкий или твердый материал, проходит абляция (разбрызгивание).

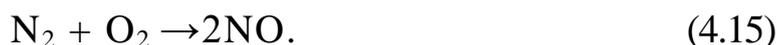
При прохождении небесного тела сквозь атмосферу со сверхзвуковой скоростью создается сильная ударная волна. Ударные волны от крупных тел, падающих на поверхность Земли с большой скоростью, могут вызвать серьезные разрушения. Так, ударная волна, возникшая при падении Тунгусского метеорита, повалила лес на площади около 2 тыс. кв. км. Раскаленный газ за фронтом ударной волны, равно как капельки и частицы уносимого с поверхности тела его вещества, дают световое излучение, видимое наземными наблюдателями как метеоры или болиды.

Энергия, передаваемая летящим небесным телом атмосфере ( $E_{atm}$ ), для малых тел приблизительно равна полной кинетической энергии тела, а для больших тел, которые не успевают затормозиться, она оценивается следующим образом:

$$E_{atm} = (\pi/2)C_D L^2 V^2 \rho_0 H / \sin \theta, \quad (4.14)$$

где  $H$  — шкала высот в атмосфере Земли, равная для стандартной атмосферы 8,6 км. Небольшие метеороиды теряют в атмосфере всю свою энергию. Эти потери в основном связаны с ударной волной и нагревом; при этом излучение света составляет примерно 0,01% общих затрат энергии.

Помимо нагрева, излучения и генерации ударных волн, при пролете небесного тела в атмосфере с космической скоростью начинают происходить определенные химические процессы. Как известно, земная атмосфера в основном состоит из азота (77%) и кислорода (21%). Ударное сжатие воздуха за фронтом ударной волны вызывает реакцию между кислородом и азотом, приводящую к образованию окисла азота NO:



Количество NO, образующегося при пролете небесного тела, пропорционально величине энергии, передаваемой атмосфере  $E_{atm}$ . Оно составляет примерно 7 г на каждый миллион Джоулей передаваемой летящим телом энергии. Так, при падении Тунгусского метеорита образовалось около 30 млн. т окисла азота. Наблюдавшийся после падения метеорита беспрецедентный рост леса в этом районе, был вызван нападением на землю этих окислов азота, сыгравших роль удобрений. С другой стороны, сразу после падения в этих районах должны были идти кислотные дожди. К сожалению, исследования в районе падения Тунгусского метеорита начались лишь через 20 лет после этого события.

Небольшие метеориты, падающие на Землю, редко представляют собой единое целое; обычно они состоят из группы осколков, образующих поле кратеров. Это и неудивительно, так как аэродинамические напряжения в летящем теле возрастают приблизительно от 10 МПа (100 атмо-

сфер) при скорости 20 км/с на высоте 30 км до почти 100 МПа (1000 атмосфер) на высоте 15 км. Такое давление способно разрушить подавляющее количество летящих небесных тел. Только самые прочные и крупные железные или каменные метеориты имеющие высокую скорость могут достигнуть поверхности Земли.

Тело входит в атмосферу, и по мере того, как оно встречает все более плотные слои газа, в нем растут аэродинамические напряжения. Основная часть разрушения происходит в нижних слоях атмосферы. При разрушении основного тела происходит его расширение в боковом направлении, в связи с чем увеличивается общая площадь поперечного сечения и, следовательно, сопротивления, что вызывает дальнейший рост напряжений. Масса разрушенного обломком расширяется в боковом направлении до тех пор, пока окружающая ударная волна не разделится на отдельные ударные волны, окружающие каждый обломок. Эти фрагменты в дальнейшем могут снова дробиться или двигаться к поверхности Земли без разрушений.

При падении ряда метеоритов на поверхность Земли очень часто наблюдается выпадение так называемых метеоритных дождей. Они образованы фрагментами разрушившегося тела, как правило, на высоте 10—15 км. Именно таким был метеоритный дождь, вызванный в 1947 г. падением Сихотэ-Алинского железного метеорита.

**Сихоте-Алинский железный метеорит** (рис. 4.2)

Упал 12 февраля 1947 года на территории Приморского края, в западных отрогах Сихотэ-Алиня в 10 час. 38 мин. местного декретного времени (0 час. 38 мин. мирового). Координаты места падения - 46°10" с.ш., 134°39" в.д.

Траектория - азимут 20°, угол наклона к горизонту - 38°, на конечном отрезке 60°. Длина видимой траектории болида - 140 км. Время полета болида - 4-5 сек. Радиус звуковых явлений - 120 км. Сотрясение почвы от столкновения с Землей - 20-30 км (во Владивостоке - 420 км - сейсм не зарегистрирован).

Сопутствующие явления: мощный дымный след, звуки - сильные в момент столкновения с Землей и слабые во время полета, электрофонные отмечены как редкость; после взрыва вверх взметнулось черное облако высотой до 10 км. На следующее утро снег на большой площади выглядел серым.

Во время полета в атмосфере метеорит дробился несколько раз: появился на высоте 110 км; первое дробление - 58 км, второе - 34 км, третье - 16 км и четвертое - 6 км. Выпал несколькими рядами обломков.

Область рассеяния метеоритных обломков имеет площадь 12x4 км. В передней (головной) части эллипса выпали самые крупные обломки, в тыловой - самые мелкие. В кратерном поле площадью 0,75 км.кв. насчитывается 24 кратера диаметром более 9 м, 98 воронок диаметром 0,5 - 9 м и 78 лунок диаметром менее 0,5 м. В кратерах метеориты от удара о Землю разлетелись на множество осколков, в воронках и лунках - сохранились целыми. Мелкие индивидуальные экземпляры рассеялись по всей площади прямо по поверхности.

Самый крупный кратер имеет диаметр 26 м и глубину 6 м. Самый крупный индивидуальный экземпляр весит 1745 кг.

Масса собранного вещества метеорита составляла на 1986 год более 27 тонн.

Расчетная масса метеорита на входе в атмосферу 1000 тонн, выпавшего вещества - порядка 70 - 100 тонн.

В.Г. Фесенковым рассчитана доатмосферная траектория метеорита и сделан вывод, что он пришел из центральной части пояса астероидов.

Из грубой структуры следует, что метеорит получился при раскристаллизации жидкого расплава железа (93,32%), никеля (6%) и кобальта (0,47%) в условиях полного отсутствия кислорода. Структура такой размерности могла образоваться при скорости охлаждения менее 10°C за миллион лет. Такие условия могли быть обеспечены в центральной части родительского тела. Примерно 450 млн. лет назад тело разрушилось, и метеорит (астероид!) начал самостоятельное путешествие по поясу астероидов. Примерно 70 млн. лет назад он распался еще раз. По отсутствию отчетливых признаков метаморфизма можно судить о том, что во время своего вращения вокруг Солнца он не подвергался сколько-нибудь заметным воздействиям температур (не подходил близко к Солнцу) и давлений (не сталкивался с другими космическими телами).

По классификации метеорит отнесен к одной из 13 химических групп - II В Ap. В этой группе все метеориты - гексаэдриты и грубые октаэдриты. Всего таких метеоритов 13, или 2,7% всех железных метеоритов. Считается, что это генетическая классификация, т.е. у каждой группы было свое родительское тело

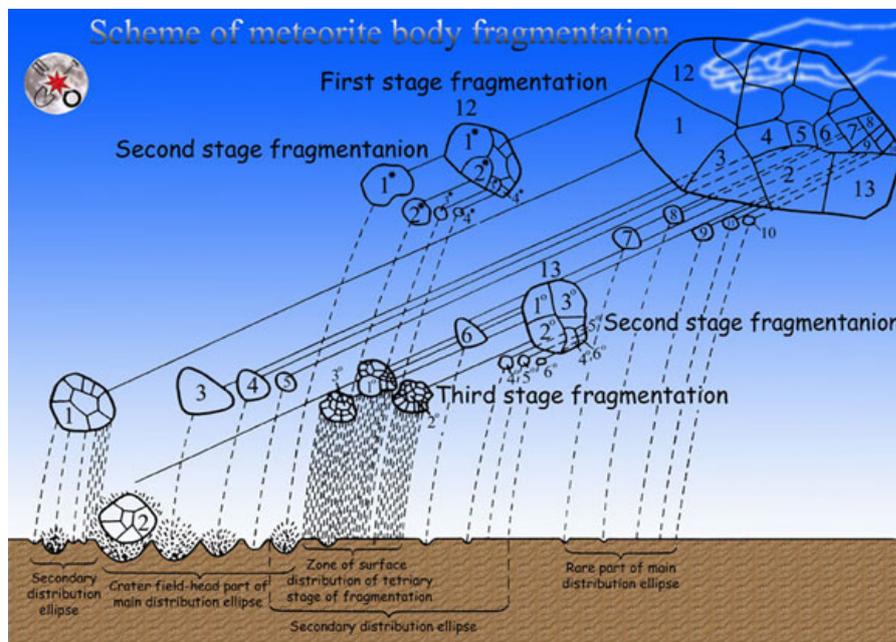


Рис. 4.2. Схема падения Сихоте-Алинского метеорита

Фрагментация метеорита приводит к тому, что результатом удара его о Землю будет поле кратеров. Это поле кратеров имеет форму эллипса. Крупные фрагменты медленнее тормозятся в атмосфере, поэтому пролетают дальше, так что самые большие кратеры находятся обычно на дальнем по траектории движения конце этого эллипса, а мелкие фрагменты падают ближе больших, что обусловлено их более сильным замедлением за счет аэродинамического сопротивления. В течение короткого интервала времени при дроблении давление между обломками небесного тела больше давления торможения, что является одной из причин появления бокового импульса. Эта сила исчезает, когда обломки разлетаются на расстоя-

ние, сравнимое с их диаметром. Скорость движения фрагмента в поперечном направлении  $V_T$ , сообщаемая за счет указанного процесса, по порядку величины составляет

$$V_r \approx V \sqrt{\rho / \rho_0}. \quad (4.16)$$

Рассеяние обломков в поперечном направлении ( $\Delta Y$ ) определяется по скорости  $V_T$  и времени полета фрагмента ( $t$ ) от момента дробления до удара о Землю. Если разрушение происходит на высоте  $Z$ , то

$$\Delta Y \approx V_T Z t / \sin \theta. \quad (4.17)$$

Величина  $\Delta Y$  в уравнении (1.9) имеет максимум при  $Z = 2H$ , или около 15 км для Земли. При угле вхождения в атмосферу около  $15^\circ$  из уравнения (4.9) получаем максимальное боковое рассеяние для Земли около 1 км, что находится в согласии с известными полями метеоритных кратеров.

Из (4.9) также следует, что размер эллипса рассеяния не зависит ни от размера падающих небесных тел, ни от их скорости. Если тело мало, кратеры будут отстоять далеко друг от друга в пределах эллипса рассеяния. Если тело велико, то кратеры будут больше и займут значительную часть площади эллипса рассеяния. Начиная с некоторого размера небесного тела, его фрагменты заполнят весь эллипс рассеяния и картина последствий падения будет выглядеть как один кратер, возникший при почти одновременном ударе о Землю множества обломков. Для Земли этот критический размер соответствует массе небесного тела примерно равной от  $10^5$  кг (диаметр 2 м) до  $10^{10}$  кг (диаметр 100 м) в зависимости от угла вхождения в атмосферу.

Кратер, возникший в результате удара о Землю множества фрагментов разрушенного небесного тела, морфологически и структурно отличается от кратеров, образованных не разрушившимся телом. Хотя в обоих процессах кратеры имеют одинаковые основные черты, такие, как приподнятый вал и окружающие его отложения выбросов, но кратеры, созданные фрагментами разрушенного тела, аномально мелки по сравнению с кратерами, созданными не разрушившимся небесным телом, и характеризуются почти плоским дном. Более плотные сгустки обломков создают кратеры с центральной горкой. Чем больше размер небесного тела, тем меньше процессы его дробления влияют на вид образующегося кратера.

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

не формируется (при меньших скоростях соударения), то разлет выбросов сильно тормозится сопротивлением атмосферы и поперечные размеры области их рассеяния будут ограничены. Атмосфера не только влияет на характер отложений выбросов, но и отсеивает самую мелкую их фракцию, которая может оставаться во взвешенном состоянии длительный период времени (месяцы, вплоть до года в земной атмосфере), Эта взвешенная пыль, при падении на Землю очень крупных тел, может оказать существенное влияние на климат.

Выбрасываемый из точки удара султан пара состоит из самого горячего и быстро разлетающегося вещества, обычно обгоняющего даже наиболее высокоскоростные частицы твердых выбросов. Атмосферные газы отбрасываются таким облаком горячих паров, давление которых в начале расширения составляет несколько ГПа (десятки тысяч атмосфер). При расширении пара от точки удара формируется ударная волна.

При относительно небольшом ударе султан пара расширяется до тех пор, пока давление в нем не сравняется с давлением окружающей атмосферы. Такое расширение пара можно считать адиабатическим ( $\gamma$  — показатель адиабаты), и, если известна та часть энергии удара ( $E_a$ ), которая пошла на образование раскаленного пара, то радиус ( $r$ ) равновесного облака пара (или огненного шара, пользуясь военной терминологией, принятой при описании ядерных взрывов) определяется величиной

$$r = [3(\gamma - 1) / 4\pi\gamma P_0]^{1/2} * E_a^{1/2} \quad (4.18)$$

Хотя давление расширившегося облака пара равно давлению в атмосфере, температура пара обычно намного выше, чем в окружающем его воздухе. Поэтому облако пара поднимается вверх подобно воздушному шару, наполненному горячим воздухом, за счет силы Архимеда (рис. 4.3.а). Центральная часть облака поднимается быстрее периферийных, что заставляет его «выворачиваться» и превращаться в тор. Горячий вращающийся тор расширяется, охлаждается и смешивается в процессе подъема с окружающим воздухом. В конце концов, он стабилизируется на некоторой высоте в стратосфере и окончательно рассеивается. Место удара, таким образом, подобно месту ядерного взрыва и является источником классического грибовидного облака, которое может захватывать пыль и обломки и поднимать их на большую высоту. Также как и при ядерном взрыве, до образования грибовидного облака в окружающее пространство идет мощное световое и тепловое излучение, способное вызывать катастрофические пожары.

Атмосферные явления, связанные с ударом большой силы, существенно отличаются от рассмотренных выше. Если радиус расчетного равновесного облака газа  $r$  превышает примерно одну масштабную единицу высоты атмосферы  $H$ , то равновесие не достигается. Наоборот, расши-

ряющиеся газы прорываются через верхнюю часть атмосферы и продолжают расширяться в околоземное космическое пространство. Большой султан пара расширяется от точки удара, и пар (который может содержать пыль и обломки) движется к верхним слоям атмосферы с высокой скоростью, тормозясь только силой притяжения к Земле. Этот процесс схематически изображен на рис. 4.3.б. Предполагается, что с ним связан выброс тектитов — стекловидных шариков затвердевшего расплава — за пределы земной атмосферы. Многие поля рассеяния тектитов простираются на тысячи километров, что трудно объяснить чем-либо иным, кроме продолжительного баллистического полета за пределами земной атмосферы.

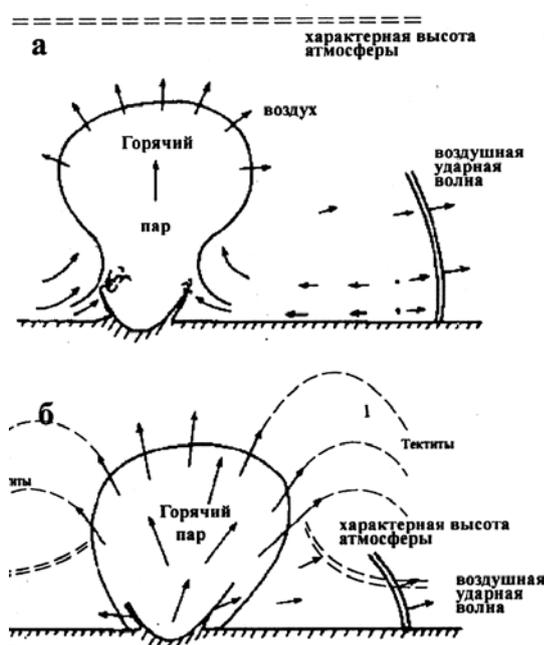


Рис. 4.3. *Взаимодействие султана пара с окружающей атмосферой*

Микротектиты (стекловидные шарики диаметром  $<1\text{мм}$ ) образуют протяженные слои в глубоководных морских отложениях, что тоже не соответствует обычному механизму рассеяния их в атмосфере. Условия, определяющие переход между расширением огненного пара и «прорывом» атмосферы, до конца не известны, особенно в случае ударов. Ни ядерные взрывы, ни известные извержения вулканов не сопровождалось таким явлением. Мощность самого большого наземного ядерного взрыва, проведенного в 1961 г. в Советском Союзе, составляла  $\sim 60\text{ Мт}$ . При этом в атмосферу выделилось  $2,5 \cdot 10^{17}$  Дж энергии. Численное моделирование показало, что для начала «прорыва» в атмосферу должно быть выделено как минимум  $150\text{ Мт}$ . Это соответствует каменному метеороиду диаметром  $100\text{ м}$ , падающему со скоростью около  $30\text{ км/с}$  и образующему кратер диаметром  $3\text{ км}$  при условии, что  $100\%$  его энергии перейдет в султан

пара. Так как цифра 100% маловероятна, 3 км можно принять за минимальный диаметр кратера, султан пара из которого вырвется за пределы атмосферы. Кратер Рис в Германии диаметром 22 км, вероятно, является источником молдавитов – тектитов, которые были найдены в 400 км от этого кратера. Данный факт показывает, что энергия удара заметно превосходит критическую энергию «прорыва». Кратер Босумтви в Гане диаметром 10,5 км, по-видимому, служит источником тектитов в Кот-д'Ивуар, так что султан пара из кратера даже диаметром 10 км способен «прорвать» атмосферу.

Удары большой и малой силы создают мощную ударную волну в нижней части атмосферы. Здесь тоже имеет место аналогия с поражением при ядерном взрыве. Радиус зоны поражения ударной волной ( $R_s$  в км), возникающей при взрыве с энергией  $E$  Мт, определяется по:

$$R_s = 5,6 E^{1/3} . \quad (4.19)$$

В формуле (2.11.) коэффициент в правой части зависит от высоты и взрыва и приведен в формуле для наземного взрыва, при взрыве в атмосфере (как, например, взрыв Тунгусского метеорита) этот коэффициент увеличивается и становится равным 8.

Помимо взаимодействия с атмосферой, часть энергии удара падающего тела переходит в сейсмические волны в земной коре. Доля полной энергии удара, передаваемая земной коре, составляет примерно 5%. Эта энергия приводит к землетрясению с эпицентром в точке удара. Характер землетрясения определяется по классической формуле Гуттенберга-Рихтера (*Рихтер, 1963*)

$$\lg E_s = 4,6 + 1,5 M, \quad (4.20)$$

где  $E_s$  — сейсмическая энергия в джоулях, а  $M$  — сила землетрясения в баллах по шкале Рихтера.

Ч. Рихтер в 1935 г. предложил для оценки силы землетрясения (в его эпицентре) десятичный логарифм (магнитуда  $M_L$ ) перемещения  $A$  (в микрометрах) иглы стандартного сейсмографа Вуда-Андерсона, расположенного на расстоянии не более 600 км от эпицентра:  $M_L = \lg A + f$ , где  $f$  — корректирующая функция, вычисляемая по таблице в зависимости от расстояния до эпицентра. Энергия землетрясения примерно пропорциональна  $A^{3/2}$ , то есть увеличение магнитуды на 1,0 соответствует увеличению амплитуды колебаний в 10 раз и увеличению энергии примерно в 32 раза.

Классификация была теоретически обоснована Ч. Рихтером и Б. Гуттенбергом в 1941-1945 гг.

В России применяется наиболее широко используемая в мире 12-балльная шкала MSK-64 (Медведева-Шпонхойера-Карника), восходящая к шкале Меркалли-Канкани (1902), в странах Латинской Америки принята 10-балльная шкала Росси-Фореля (1883), в Японии — 7-балльная шкала.

Эту шкалу часто путают со шкалой интенсивности землетрясения в баллах (по 12-балльной системе), которая основана на внешних проявлениях подземного толчка (воздействие на людей, предметы, строения, природные объекты). Когда происходит землетрясение, то сначала становится известной именно его магнитуда, которая определяется по сейсмограммам,

а не интенсивность, которая выясняется только спустя некоторое время, после получения информации о последствиях.

Самое сильное землетрясение, когда-либо зафиксированное (31 января 1906 г. у берегов Эквадора), имело магнитуду  $M = 8,9$ . Это соответствует полной энергии удара  $2,8 \cdot 10^{19}$  Дж. Такая энергия выделяется при падении астероида диаметром 450 м со скоростью 20 км/с. Однако, разрушительное действие таких ударных землетрясений существенно меньше, чем обычных землетрясений, так как при ударных землетрясениях распространяются сейсмические продольные  $P$  - волны, а при обычных землетрясениях более разрушительные поперечные  $S$  – волны. По аналогии, эксперименты ядерными взрывами показали, что по разрушительной силе ударные землетрясения соответствуют на единицу меньшим по магнитуде естественным землетрясениям.

### *Метеоритные кратеры на поверхности Земли*

За всю историю Земли (включая начальные этапы ее эволюции, когда столкновений было больше) на ней могло образоваться порядка 22 тысяч ударных кратеров с диаметрами более 20 км (*Кагиров, 2002*).

Некоторые известные на сегодняшний день крупные астроблемы (кратеры, образованные падением небесных тел) на поверхности нашей планеты: Попигайская астроблема (диаметр около 100 км, возраст 36-37 млн. лет), Карская (~65 км, 70 млн. лет), Пучеги-Катунская (~80 км, 175 млн. лет) на территории России; кратер Чиксулуб (Chicxulub) диаметром 170÷300 км и возрастом 65 млн. лет на побережье Мексики. Крупнейший метеорит упал в Аризоне (Barringer Meteor Crater, Каньон Дьявола диаметром 1,2 км, глубиной ~175 м, возрастом около 50 тысяч лет). Кратер Маникуаган (70 км, 200 млн. лет) на севере Канады. Всего же на Земле известно более 200 астроблем (*Микиша и др., 1995*).

В 1998 году число достоверно установленных астроблем превысило 200 (в том числе 20 из них в России), и ежегодно выявляется 2-5 новых. Размеры метеоритных кратеров различны - от 10-30 м до 340 км. Так же сильно колеблется и время их образования - от 2,5 млрд. лет назад до наших дней. При этом небольшие (измеряемые десятками и сотнями метров) кратеры (их около 15%) относятся к молодым образованиям с возрастом не более 1 млн. лет. Причина этого – воздействие гидрометеорологических факторов, приводящее к уничтожению мелких структур. Крупные астроблемы диаметром в десятки и сотни километров имеют возрасты, измеряемые десятками и сотнями миллионов лет. Распределение астроблем по поверхности Земли носит случайный характер. Больше всего их в восточной части Северной Америки и Европе, то есть в геологически наиболее изученных районах земного шара (рис. 4.4).

К настоящему времени на поверхности Земли известно более 230 астроблем. Однако, далеко не вся поверхность Земли обследована, особенно дно океанов.



Рис. 4.4. Расположение основных астроблем на поверхности Земли

Метеоритные кратеры подразделяются в основном на два типа.

*Ударные кратеры.*

Диаметр не более 100 м. Образуются при частичном дроблении и выбрасывании горных пород и возникли вследствие падения относительно небольших метеоритов, летевших со скоростью не более 2,5 км/с, что недостаточно для взрывного испарения. В центральной части кратера такого типа часто находится осколок метеорита. Примером таких кратеров являются Сихотэ-Алинские, Соболевский (рис. 4.5).

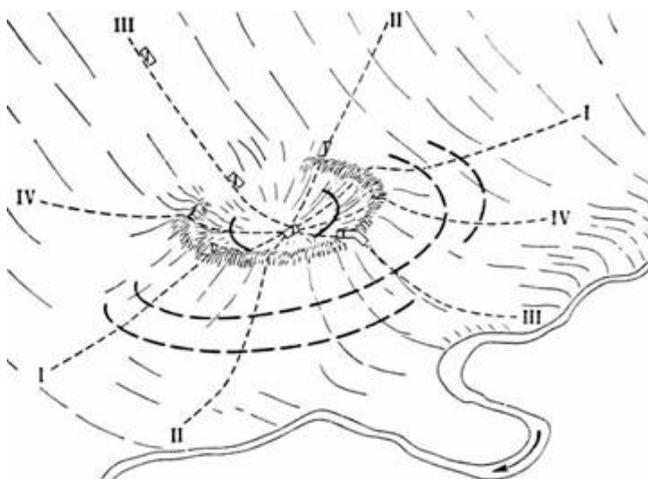


Рис. 4.5. Соболевский метеоритный кратер. Показаны внутренний кольцевой разлом и два внешних, с диаметрами примерно 0,5; 1,5 и 2D. Римскими цифрами обозначены лучевые профили, по которым проводились сейсмические работы и отбирались пробы грунта.

В 2005 г. был проведен эксперимент Deep Impact по бомбардировке ядра кометы с космического аппарата. Медный снаряд Impactor массой в 370 кг столкнулся с ядром кометы 9P/Tempel 1 на скорости 37 тыс. км/час, оставив на поверхности космического тела ударный кратер диаметром до 200 метров и глубиной 50 м.

### *Взрывные кратеры.*

Возникают при взрыве метеороида в момент его соударения с земной поверхностью. Крупный метеороид, подлетающий к Земле со скоростью 3—20 км/с, при столкновении с ней взрывается в результате торможения о горные породы. Вещество его полностью или почти полностью испаряется при взрыве. Взрывные кратеры бывают заполнены раздробленной породой, которая нередко оплавлена. В некоторых наиболее крупных кратерах обнаружены своеобразные породы, получившие название импактитов. Они почти целиком состоят из переплавленных пород, застывших в виде стекла. В небольшом количестве содержатся в них и обломки нерасплавленных пород.

Горные породы, подвергшиеся метеоритному взрыву, разбиваются коническими трещинами. Вершины трещин конусов разрушения указывают направление, откуда пришла ударная волна. Импактиты и конусы разрушения являются доказательством метеоритного происхождения древнего кратера.

Ударная волна создает давление свыше  $5 \cdot 10^6$  атмосфер. Под её воздействием горные породы мишени и ударника сильно сжимаются, что приводит к взрывному росту температуры и давления, в результате чего в окрестностях соударения горные породы нагреваются и частично плавятся, а в самом центре, где температура достигает 15 000 С, — испаряются. В этот расплав попадают и твердые обломки метеорита. В результате после остывания и затвердевания на днище кратера образуется слой импактита (от англ. *Impact* — «удар») — горной породы с весьма необычными геохимическими свойствами. В частности, она весьма сильно обогащена крайне редкими на Земле, но более характерными для метеоритов химическими элементами — иридием, осмием, платиной, палладием.

При сильных столкновениях твёрдые породы ведут себя подобно жидкости. В них возникают сложные волновые гидродинамические процессы, один из характерных следов которых — центральные горки в крупных кратерах. Процесс их образования подобен появлению капли отдачи при падении в воду небольшого предмета. При крупных столкновениях сила взрыва столь велика, что выброшенный из кратера материал может даже улететь в космос. Именно так на Землю попали метеоро-

риты с Луны и с Марса, десятки которых обнаружены за последние годы.

Схема образования кратера взрывного типа представлена на рис. 4.6.

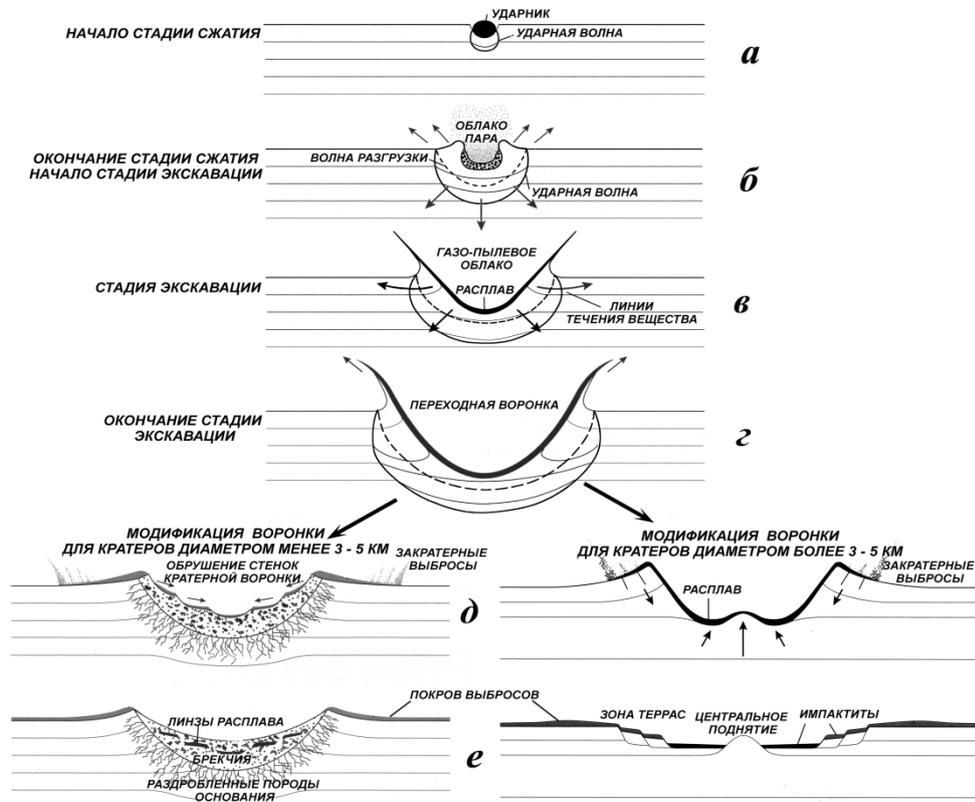


Рис. 4.6. Образование взрывных метеоритных кратеров в слоистой мишени

Здесь: а) начальное проникновения ударника в мишень, сопровождающееся образованием сферической ударной волны, распространяющейся вниз; б) развитие полусферической кратерной воронки, ударная волна оторвалась от контактной зоны ударника и мишени и сопровождается с тыловой части догоняющей волной разгрузки, разгруженное вещество обладает остаточной скоростью и растекается в стороны и вверх; в) дальнейшее формирование кратерной переходной воронки, ударная волна затухает, днище кратера выстлано ударным расплавом, от кратера распространяется наружу сплошная завеса выбросов; г) окончание стадии экскавации, рост воронки прекращается. Стадия модификации протекает по-разному для малых и больших кратеров. В малых кратерах происходит соскальзывание в глубокую воронку несвязного материала стенок – ударного расплава и раздробленных пород. Перемешиваясь, они образуют импактную брекчию. Для переходных во-

ронок большого диаметра начинает играть роль гравитация – из-за гравитационной неустойчивости происходит выпучивание вверх днища кратера с образованием центрального поднятия.

Одним из классических метеоритных кратеров взрывного типа является знаменитый Аризонский кратер, называемый еще иначе Каньон-Диаболо, расположенный в пустынной местности штата Аризона, вблизи ущелья Дьявола (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Аризонский метеоритный кратер  
(диаметр: 1,186 км, глубина 174 м; возраст: 49 тысяч лет)

Интересно отметить, что в результате наземного обследования создавалось представление, что кратер имеет круглую форму. Когда же был сделан фотографический снимок с самолета, то оказалось, что он квадратной формы с несколько сглаженными углами. То есть, Аризонский кратер имеет воронкообразную квадратную форму без центральной горки, вздыбленные вверх и наружу слои пород вокруг кратера, и вокруг него найдена большая масса метеоритного материала. Квадратная форма говорит о том, что даже взрывные кратеры не обязательно имеют идеально круглую форму. Форма Аризонского кратера показывает, что часть взрывных кратеров повторяет форму залегающих внизу горных пород.

Вокруг кратера в радиусе до 15 км было собрано много тысяч осколков железного метеорита общим весом около 30 тонн. Было установлено, что по валу кратера рассеяны огромные глыбы и мелкие осколки песчаника и известняка, выброшенные взрывом из кратера. Пласты горных пород, обнаженные на внутренних склонах кратера, имеют

наклонное направление, в то время как в окрестностях кратера они залегают почти горизонтально».

В литературе иногда описывается характер образования *ударного кратера третьего типа*, размеры которого являются наибольшими.

В любом из описанных выше вариантов ударные кратеры имеют следующие особенности.

1. В центре не может быть вулканического жерла.
2. Объем вала выброшенного материала вокруг кратера всегда примерно равен объему воронки (для вулканического кратера объем выброшенного грунта гораздо больше объема воронки).
3. Поверхность дна воронки усыпана грунтом, осевшим после взрыва.
4. Уровень краев воронки (исключая насыпанный вал) чуть выше уровня первичной поверхности (за счет отраженной волны возникает кольцевое вспучивание вокруг воронки).
5. Поверхность и края воронки имеют следы ударного уплотнения грунта.
6. Вокруг воронки и в ней самой находятся следы вещества упавшего тела (метеорита, бомбы и т.п.).
7. Вследствие ударного взрыва возможно появление термоизмененных следов вещества (оплавленные куски, осколки и т.п.)

Форма и размеры астроблем, характер преобразования в них пород земной коры являются результатом ударного метаморфизма - процесса своеобразного, совершенно не похожего на другие геологические процессы, происходящие на Земле (и на других планетах Солнечной системы). Метаморфизм развивается при соударениях космических тел друг с другом. При этом в момент удара давление на горные породы достигает нескольких ГПа, а температура измеряется десятками тысяч градусов. Такие параметры являются следствием реализации при ударе очень высоких энергий за крайне малое время.

Энергия соударения космического тела с поверхностью планеты зависит от его массы и скорости. Мощная и плотная атмосфера Земли тормозит космическое тело тем сильнее, чем больше его диаметр, так как оно перемещает впереди себя газ, сжимая его и постепенно затормаживаясь. Если уплотненная масса газа ( $M_{газа}$ ) достаточно велика (при  $M_{газа} > 10M_{метеорита}$  скорость движения падает на 90% и более), то скорость соударения приближается к нулю. В Намибии (Южная Африка) на поверхности земли лежит железный метеорит Гоба, вес которого около 60 т. Ни кратера, ни даже лунки при его падении не образовалось - метеорит приземлился как бы на воздушной подушке, скорость соударения была практически нулевой.

При скоростях соударения до  $3\text{--}5 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$  образуются ударные кратеры (лунки, воронки, по размеру соответствующие метеориту-ударнику). Породы мишени дробятся и выбрасываются из воронки, распределяясь равномерно вокруг нее при вертикальном падении или вперед по направлению падения при ударе под углом. При больших скоростях соударения происходит взрыв.

Суммарная энергия, реализуемая в процессе соударения, может превышать  $10^{19}\text{--}10^{23}$  Дж. Если сравнить эту величину с энергией катастрофических вулканических извержений ( $1,44\cdot 10^{20}$  Дж при извержении вулкана Тамбора в 1815 году или  $1,81\cdot 10^{19}$  Дж для вулкана Кракатау в 1883 году), то она примерно того же порядка. Однако результаты вулканического взрыва и импактного события совершенно несопоставимы. Это связано с тем, что в вулканическом процессе энергия расходуется не одномоментно, а в серии следующих друг за другом пароксизмов на протяжении  $10^3\text{--}10^5$  с. В импактном процессе реализация кинетической энергии космического тела занимает промежуток времени от нескольких миллиардных долей секунды до первых секунд (тем дольше, чем больше суммарная энергия). Такая высокая плотность энергии определяет колоссальные градиенты параметров (давления и температуры) и как следствие - очень большие скорости протекания механических и тепловых процессов.

### *Воздействие на гидросферу*

Попадание космических тел при их столкновении с Землей в океан, а не на сушу, происходит чаще, так как океаны занимают по площади 70% всей поверхности нашей планеты. При ударе небесного тела о водную поверхность часть энергии перейдет в волны, образующиеся в воде. По аналогии с волнами, возникающими при подводных землетрясениях, их можно назвать тем же термином — цунами. Реально процесс удара космического тела с образованием цунами еще ни разу не наблюдался, поэтому в настоящее время нет экспериментальной информации о крупномасштабных столкновительных цунами. Основным инструментом исследований является математическое и лабораторное моделирование, хотя в каждом конкретном случае возникают вопросы перехода от малых лабораторных масштабов к большим масштабам падения крупных небесных тел на водную поверхность.

В прогнозах столкновительного цунами в настоящее время имеются значительные расхождения, составляющие 2—3 раза в величине амплитуды волны, набегавшей на берег. О масштабах разрушения можно судить по результатам расчетов, которые воспроизводят детальную картину гид-

родинамических процессов, вызванных ударом в океан небесного тела. При входе астероида в воду океана Земли впереди него образуется ударная волна большой интенсивности. В силу того, что астероид движется с гиперзвуковой скоростью, ударная волна будет сильно вытянутой, а ее передний фронт будет отстоять от небесного тела на незначительное расстояние. Следовательно, процесс взаимодействия астероида с водой будет определяться в основном ударом самого космического тела. При глубине океана, равной 5 км, и вертикальном падении каменного тела, имеющего поперечный размер 10 км и падающего со скоростью 20 км/с, полная энергия удара эквивалентна  $6-10^7$  Мт. Через 120 секунд после такого удара высота вырванной из океана воды, а также грунта дна океана достигает 35 километровой высоты над первоначальным уровнем океана. Высота образовавшейся при этом волны составит примерно 4 км.

Аналогичные расчеты проведены также и для средних комет (диаметр ядра кометы 2 км, скорость 20 км/с, вертикальный удар, глубина океана 4 км). Через 37 секунд после удара высота образующейся волны на расстоянии 18 км от места удара составляет 1 км. Энергия железного тела поперечником 150 м, движущегося со скоростью 20 км/с, составляет 600 Мт. Такое тело достигнет дна моря глубиной 600 м почти без торможения. Вследствие образовавшейся при этом ударной волны испарится огромное количество воды. После удара о плотные породы морского дна железное тело взорвется. Такой подводный взрыв будет напоминать подводный ядерный взрыв.

На рис. 4.8 представлены результаты моделирования цунами, возникающего в результате падения 200-м астероида в океан глубиной 4 км на скорости 20 км/с. Через 300 с цунами займут зону размерами 50X50 км с высотой передней волны 325 м.

Высота волны изменяется обратно пропорционально расстоянию в километрах от места удара. Так, при ударе 2-км кометы в океан глубиной 4 км высота волны составит 10 м на расстоянии 2000 км, а при ударе 150-м железного тела в море глубиной 600 м — на расстоянии 300 км. Расчеты показали, что последствия от падения в океан каменного астероида диаметром 1 км могут быть разрушительными на расстояниях до 100—200 км от побережья океана.

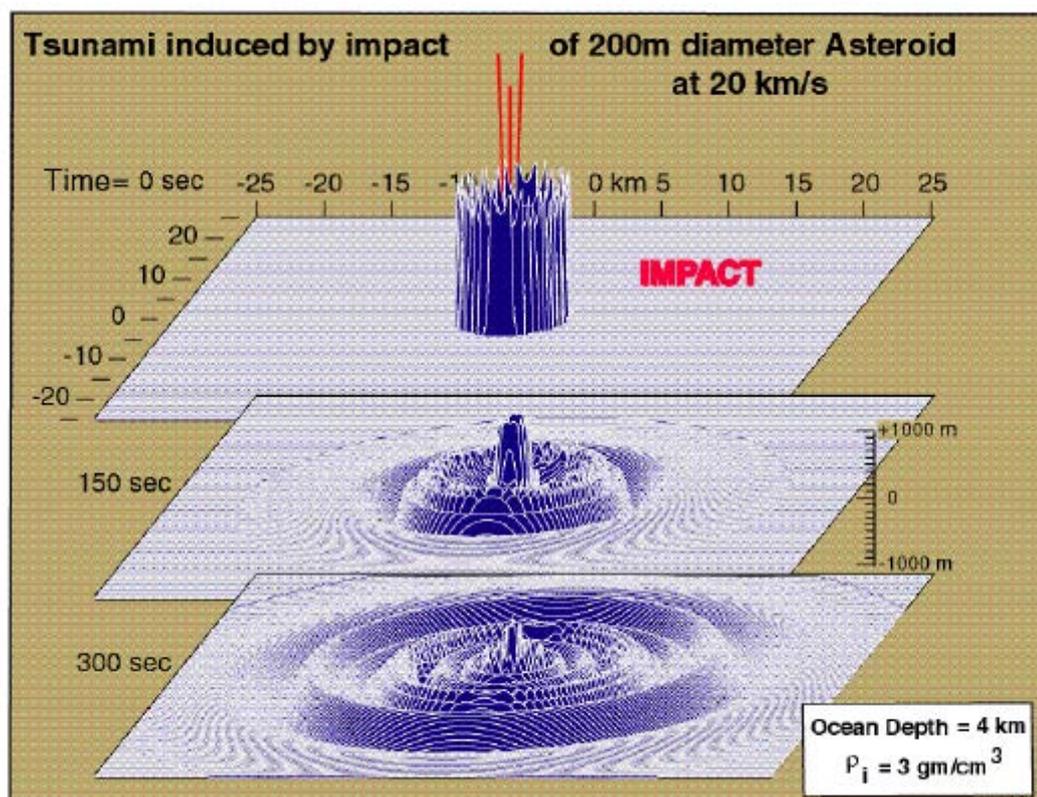


Рис. 4.8. Один из вариантов моделирования падения 200-м астероида в океан глубиной 4 км

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

волн к 11 с имела максимальную высоту 28 м и находилась на расстоянии 300 м от центра взрыва. На расстоянии 6,6 км наиболее высокой была девятая волна – 1,8 м. Обработка этих результатов дала возможность получить эмпирическое соотношение между глубиной водоема и характерного размера с энергией  $E$  при условии, что разность высоты волны над уровнем дна и глубины водоема меньше самой глубины дна  $H_0$

$$E \sim H_0^2. \quad (4.21)$$

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

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

$$h \sim r^{-1}. \quad (4.22)$$

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

Таким образом, при столкновениях с большими телами, размером в несколько километров и более, оказывающими глобальные воздействия на Землю, удары в сушу и в океан близки по последствиям. Удары в океан малых тел будут приводить к меньшим последствиям, чем удары в сушу.

Удары же в океан тел промежуточных размеров (от 100 м до 1 км) могут приводить к большему ущербу, чем аналогичные удары в сушу. Причиной тому являются волны цунами, которые формируются в океане и, распространяясь по поверхности воды со слабым затуханием, обрушиваются на берег, опустошая обширные, подчас густо заселенные территории.

На рис. 4.9 представлены результаты расчета распространения ударных цунами по Мировому океану (S.N. Ward, E. Asphaug, 2000).

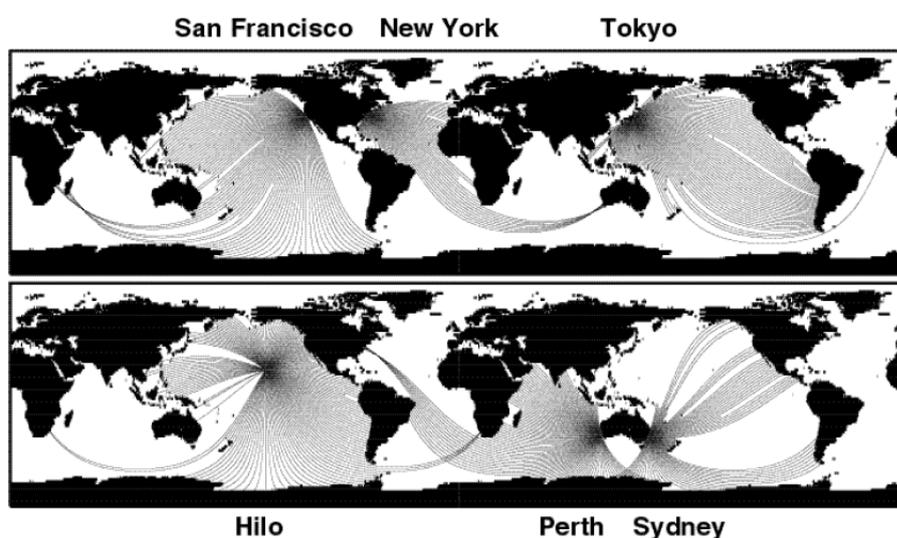


Рис. 4.9. Распространение цунами по Мировому океану при падении астероидов в его различные зоны (Сан Франциско, Нью Йорк, Токио, Хило, Перт, Сидней)

Открытый в 2004 году потенциально опасный объект 2004 MN4=(99942) Apophis диаметром 270-350 метров, в 2029 году пройдет в опасной близости от Земли. В 2036 году он имеет ненулевую вероятность столкнуться с Землей. Одна из возможных траекторий вхождения его в атмосферу представлена на рис. 4.10.

Моделированию последствий падения астероида Апофис на Землю показывает, что оно вызовет региональную экологическую катастрофу (исходя из диаметра 270 метров, плотности  $3000 \text{ кг/м}^3$ , скорости входа в атмосферу  $12,6 \text{ км/с}$ ):

- энергия столкновения с Землей — 1,7 Гигатонн;
- высота разрушения – до 50 км;
- диаметр окончательного кратера — до 6 км.



Рис. 4.10. Одна из вероятных траекторий падения астероида Апофис в 2036 г. (по трассе обозначены углы входа)

При возможном падении в Мексиканский залив 13.04.2036 астероид вызовет цунами, которое через час при достижении берега будет иметь высоту до 10-12 м (рис. 4.11), сравнимую с высотой цунами в Таиланде в декабре 2004 г. (около 300 тысяч жертв).

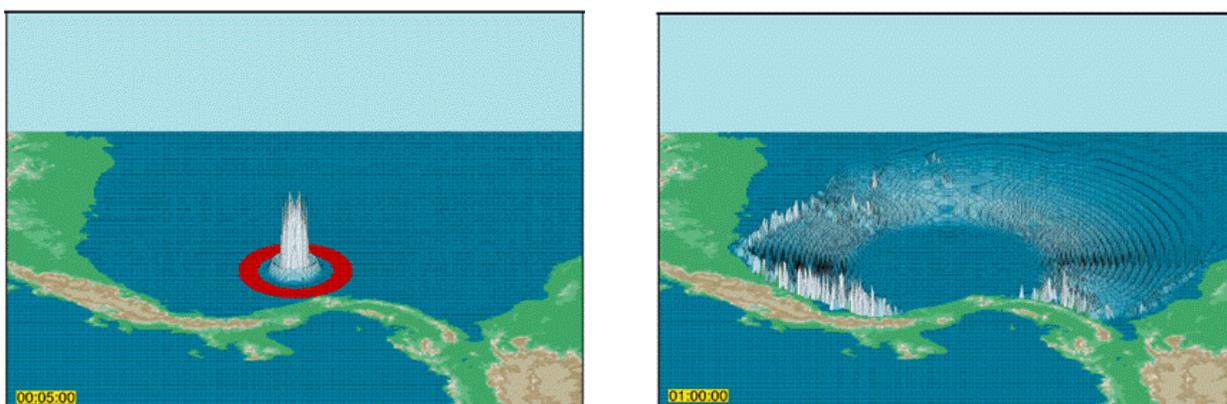


Рис. 4.11. Возможное цунами от астероида Апофис в Мексиканском заливе

#### *Челябинское падение 2013 г. и его последствия*

Утром 15 февраля 2013 года примерно в 9 час. 20 мин. по местному времени (UTC+6) метеорное тело взорвалось в окрестностях Челябинска на высоте 15—25 км (рис. 4.12).

По расчетам НАСА, метеороид диаметром около 17 метров и массой порядка 10 тыс. тонн, вошёл в атмосферу Земли на скорости около 18 км/с. Судя по продолжительности атмосферного полёта, вход произошёл под очень острым углом. Спустя примерно 32,5 сек после входа в атмосферу небесное тело разрушилось. Разрушение представляло собой серию событий, сопровождавшихся распространением ударных волн. Общее количество высвободившейся энергии по оценкам НАСА составило около 500 килотонн в тротиловом эквиваленте, по оценкам РАН — 100–200 килотонн. По оценкам сотрудников института астрономии РАН мощность взрыва составляла от 0,4 до 1,5 Мт в тротиловом эквиваленте. Считается, что это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю со времени падения Тунгусского метеорита в 1908 году, и соответствует событию, происходящему в среднем раз в 100 лет. Из-за пологой траектории вхождения тела только сравнительно небольшая часть энергии взрывов достигла населённых пунктов.

**Тротиловый эквивалент** — мера энергосодержания высокоэнергетических событий, выраженная в количестве тринитротолуола (ТНТ), выделяющем при взрыве равное количество энергии.

Удельная энергия взрывного разложения тринитротолуола в зависимости от условий проведения взрыва варьирует в диапазоне 980—1100 кал/г. Для сравнения различных видов взрывчатых веществ условно приняты значения 1000 кал/г и 4184 Дж/г.

1 грамм тринитротолуола выделяет 4184 джоулей;

1 килограмм ТНТ =  $4,184 \cdot 10^6$  Дж;

1 тонна ТНТ =  $4,184 \cdot 10^9$  Дж;

1 килотонна (кт) ТНТ =  $4,184 \cdot 10^{12}$  Дж;

1 мегатонна (Мт) ТНТ =  $4,184 \cdot 10^{15}$  Дж;

1 гигатонна (Гт) ТНТ =  $4,184 \cdot 10^{18}$  Дж.

Эти единицы используются для оценки энергии, выделяемой при ядерных взрывах, подрывах химических взрывчатых устройств, падениях астероидов и комет, взрывах вулканов.

Так, энергия взрыва ядерной бомбы «Малыш» над Хиросимой 6 августа 1945 года по разным оценкам составляет от 13 до 18 кт ТНТ, что соответствует полной конверсии в энергию приблизительно 0,7 г массы ( $E = mc^2 = 0,0007 \cdot (3 \cdot 10^8)^2$ ).

Для сравнения, общее мировое потребление электроэнергии за 2005 год ( $5 \cdot 10^{20}$  Дж) равно 120 Гт ТНТ, или в среднем 3,8 кт в секунду.

Из-за ударной волны пострадали 1613 человек, большинство — от выбитых стёкол. Были госпитализированы по разным данным от 40 до 112 человек; двое пострадавших были помещены в реанимацию.

Ударная волна повредила здания. Материальный ущерб был предварительно оценён в сумму от 400 млн. до 1 млрд. рублей. В трех районах Челябинской области был введён режим ЧС.

Небесное тело не было обнаружено до его вхождения в атмосферу. Первые осколки, в виде небольших метеоритов, были найдены несколькими днями позже.

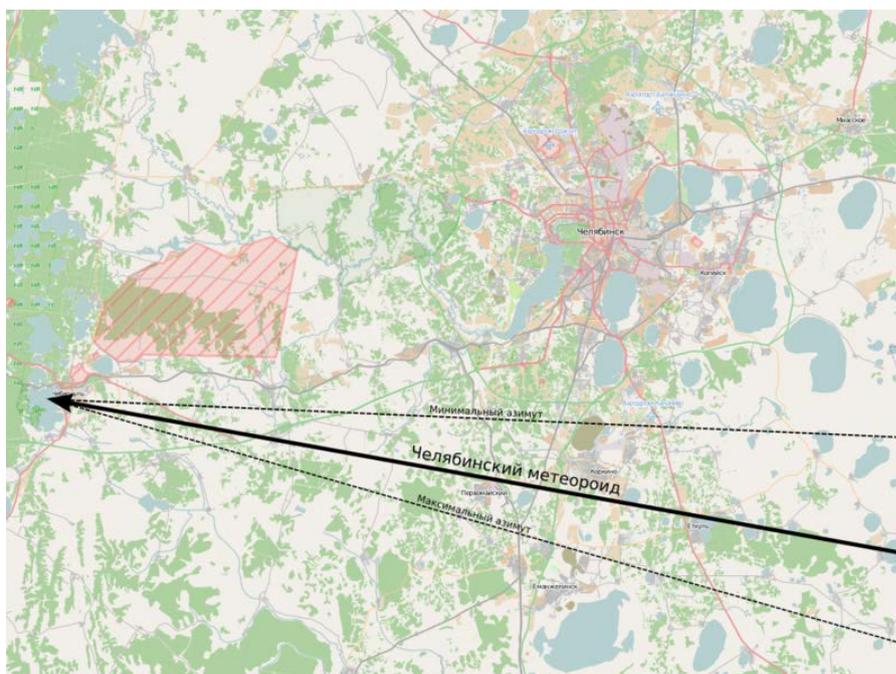


Рис. 4.12. Траектория падения Челябинского метеороида 2013 г.

Данные разных исследователей несколько отличаются друг от друга.

По первоначальным оценкам Института динамики геосфер РАН, масса объекта при входе в атмосферу оценивалась в 10—100 тонн, мощность взрыва — несколько килотонн, скорость входа в атмосферу 15—20 км/с, высота разрушения 30—50 км, высота высвобождения основной энергии — 5—15 км. Исследователи Иркутского госуниверситета считают, мощность взрыва была больше, чем у Витимского болида, упавшего в 2002 г. в Иркутской области. Скорость метеороида при падении составила от 20 до 70 километров в секунду.

Ядерный взрыв или взрыв болида в атмосфере создают низкочастотные звуковые волны (меньше 20 Гц), которые можно использовать для определения параметров события. Данные расположенных по всему миру инфразвуковых станций слежения за ядерными испытаниями (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) показали наличие источника инфразвуковых волн в Уральских горах, что позволило сделать оценки мощности. Среди всех событий это было наиболее мощным со времени ввода в строй первой станции в 2001 году. Этот источник инфразвука оказался не стационарным, как было бы при испытании ядерного оружия в шахте, а перемещался, что было отмечено по изменению направления на источник. Самая дальняя станция, которая зафиксировала данное событие, расположена в Антарктиде в 15000 км от источника. Инфразвуковые волны обогнули Землю несколько раз. По словам Питера Брауна, «гриб» сформировавшийся через две минуты по-

сле взрыва имел 5 км в диаметре и 7 км в высоту, а пыль попала в Европу с ветрами через неделю.

15 февраля учёные НАСА сообщили, что космический объект был 15 метров в диаметре и вызвал взрыв мощностью 300 килотонн в тротиловом эквиваленте. Чуть позже оценка энергетической мощности взрыва была увеличена до 470 килотонн. Вечером того же дня НАСА обнародовала уточнённые данные о метеороиде на основе анализа данных инфразвуковых станций слежения: до входа в атмосферу Земли объект был около 17 метров в диаметре, массой до 10 000 тонн и двигался со скоростью 18 км/с. Через 32,5 секунды после входа в атмосферу объект полностью разрушился, в результате чего высвобожденная энергия составила около 500 килотонн в тротиловом эквиваленте. По оценке НАСА, данное тело существенно превышает Сихотэ-Алиньский метеорит по размерам, и является крупнейшим после падения Тунгусского в 1908 году. По оценкам РАН мощность взрыва существенно меньше, 100—200 килотонн.

До сих пор только один раз учёным удалось предсказать столкновение небесного тела с Землёй: это был астероид 2008 TC<sub>3</sub>, упавший в 2008 г. в северном Судане и открытый за двое суток до падения.

Аппаратура, установленная на геостационарных спутниках, работающих в интересах Министерства обороны США и Министерства энергетики США, позволяет как отслеживать воздушные ядерные взрывы, так и измерять кривые светимости сгорающих в атмосфере болидов. 1 марта НАСА стали известны уточнённые данные по полной светимости суперболида, которая составила  $E_0 = 3,75 \cdot 10^{14}$  Дж или 90 кт, из чего по эмпирической формуле для полной энергии взрыва следует  $E = 8,2508 \cdot E_0^{0,885}$ , что составляет 440 кт. Скорость болида по тем же данным в момент максимальной яркости составила 18,3 км/с. Событие произошло в точке с координатами 54.8° с. ш. 61.1° в. д. на высоте 23,3 км в 03:20:33 по Гринвичу. Оценка массы и среднего размера, предполагая значение средней плотности равным 3,6 г/см<sup>3</sup>, составила соответственно 11 000 тонн и 18 метров.

После опроса свидетелей и анализа данных с видеорегистраторов учёные института астрономии РАН смогли вычислить траекторию метеороида в космическом пространстве. Данные указывают на четыре взрыва, самый крупный из которых произошёл на высоте 23 км. Его эпицентр находился над точкой в 3 км на востоке от посёлка Первомайский. Наибольшие разрушения претерпела область длиной 50 км, в которую попал город Челябинск, перпендикулярно к траектории полёта тела.

Вместе с тем, весьма распространенной является версия о том, что данный метеороид мог быть ледяным ядром кометы с вкраплениями в нее каменных частиц. На это указывает мощная ударная волна (в Сихотэ-Алиньском падении ее практически не было) и цвет дыма после взрыва, скорее похожий на пар (рис. 4.13).



Рис. 4.13. След Челябинского болида через 18 мин. после взрыва

#### 4.2. Экологические риски падений опасных космических тел

Расчеты эффектов, возникающих при падении крупного космического тела, производятся по аналогии с расчетом последствий наземных и воздушных ядерных взрывов.

При наземном ядерном взрыве первоначально примерно 90% выделившейся энергии расходуется на разогрев вещества зарядного устройства в зоне реакции. Температура вещества в этой зоне для мегатонного взрыва достигает 100 млн. К, давление – 1 ТПа (Архинов и др., 2003).

При контактном взрыве 1 Мт на мягком грунте радиус воронки оценивается в среднем в 130 м, глубина - 50 м, в атмосферу выбрасывается до  $10^6$  т грунта, который, оседая, участвует в образовании навала.

На рис 4.14 представлено пространственное распределение изменения давления во фронте ударной волны для 1 Мт взрыва.

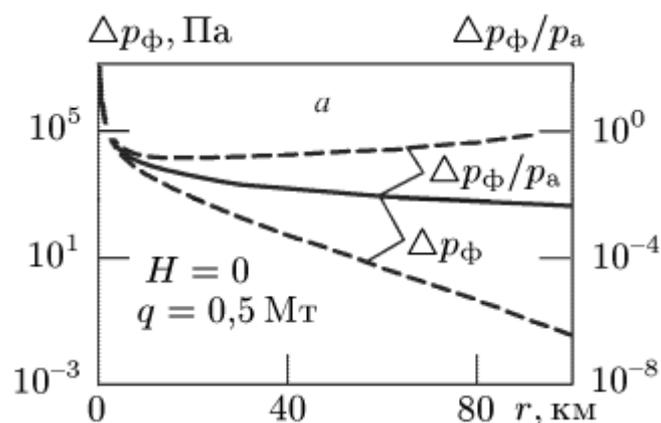


Рис. 4.14. Распределение избыточного давления  $\Delta p_\phi$  и интенсивности  $\Delta p_\phi/p_a$  во фронте ударной воздушной волны

При взрыве образуется воздушная ударная волна.

Территория, подвергшаяся воздействию ударной волны, называется очагом взрыва. Его внешняя граница проходит через точки на местности с избыточным давлением во фронте ВУВ  $\Delta P_\phi = 3$  кПа. В очаге взрыва принято выделять следующие круговые зоны.

В пределах зоны ВУВ, с целью прогнозирования последствий взрыва, выделяют зоны разрушений.

Зона полных разрушений -  $\Delta P_\phi = 100$  кПа, 100% безвозвратных потерь среди населения, полное разрушение зданий и сооружений.

Зона сильных разрушений -  $\Delta P_\phi = 70$  кПа, до 90% безвозвратных потерь среди незащищенного населения, полное и сильное разрушение зданий и сооружений.

Зона средних разрушений -  $\Delta P_\phi = 30$  кПа, до 20% безвозвратных потерь среди незащищенного населения, среднее и сильное разрушение зданий и сооружений.

Зона слабых разрушений -  $\Delta P_\phi = 15$  кПа, слабое и среднее разрушение зданий и сооружений.

Зона расстекления зданий и сооружений -  $\Delta P_\phi = 3$  кПа. Внешняя граница данной зоны определяет безопасное эвакуационное расстояние.

Величины опасных для людей опасных значений избыточного давления в очаге взрыва представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1

## Вероятность летальных исходов в очаге взрыва

Зоны разрушений	Зона полных разрушений	Зона сильных разрушений	Зона средних разрушений	Зона слабых разрушений	Зона малых повреждений
Избыточное давление $\Delta P_{\phi}$ , кПа	> 100	70	22	14	5
Вероятность смерти незащищенных людей	0,75	0,55	0,13	0,05	0
Вероятность смерти людей в зданиях	0,35	0,2	0,025	0,008	0

*Характеристика воздействия ударной волны на людей*

Ударная волна может нанести незащищенным людям травмы, контузии или быть причиной их гибели.

Поражения ударной волной могут быть непосредственными или косвенными.

**Непосредственные поражения** возникают в результате воздействия избыточного давления и скоростного напора. Ввиду небольших размеров тела человека ударная волна мгновенно охватывает человека и подвергает его сильному сжатию. Процесс сжатия продолжается в течение всего периода фазы сжатия (несколько секунд). Мгновенное повышение давления воспринимается человеком как резкий удар. В то же самое время скоростной напор перемещает тело в пространстве.

**Косвенные поражения** люди могут получить в результате ударов обломками разрушенных зданий и сооружений или в результате ударов летящих с большой скоростью осколков стекла, камней и других предметов. Например, при  $\Delta P_{\phi}=35$  кПа плотность летящих осколков достигает 3500 штук на квадратный метр. Скорость перемещения осколков – 50 м/с.

Воздействие ударной волны на незащищенных людей характеризуется: легкими, средними, тяжелыми, крайне тяжелыми травмами. Характеристика степени поражения людей приведена в табл. 4.2.

Таблица 4.2

## Степень поражения людей в очаге взрыва

$\Delta P_{\phi}$ , кПа	Степень поражения	Характер поражения
1	2	3
20-40	Легкая	Легкая общая контузия организма, временное повреждение слуха, ушибы и вывихи конечностей
40-60	Средняя	Серьезные контузии, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей, сильные вывихи и переломы конечностей
60-100	Тяжелая	Сильная контузия всего организма, повреждение внутренних органов и мозга, тяжелые переломы конечностей; возможен смертельный исход
Свыше 100	Крайне тяжелая	Получаемые травмы очень часто приводят к смертельному исходу

Характер теплового поражения человека и степень ожогов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

## Характер теплового поражения человека в очаге взрыва

Степень ожога	Тепловой импульс $I_t$ , кДж/м <sup>2</sup>	Характер поражения
Первая	80-100	Покраснение и припухлость кожи. В лечении не нуждаются
Вторая	160-400	Образование на коже пузырей, наполненных жидкостью, потеря трудоспособности. Необходимо лечение
Третья	400-600	Полное разрушение кожного покрова, образование язв. Необходимо длительное лечение
Четвертая	Свыше 600	Омертвление подкожной клетчатки, мышц и костей, обугливание. Возможен смертельный исход

Подобные расчеты показывают, что при падении на Землю небесного тела размером менее 10 метров оно потеряет свою космическую скорость в атмосфере, и если упадет на поверхность, то способно причинить ущерб на площади, соизмеримой со своим размером — поразить челове-

ка, животное, автомобиль или здание — только при прямом попадании. Небесные тела большего размера — начиная с диаметра 30—50 метров — способны причинить значительно более сильный ущерб. Они могут или взорваться в нижних слоях атмосферы, как Тунгусский метеорит, или, достигнув поверхности, образовать кратер и произвести разрушения на площади в десятки и сотни квадратных километров. Энергия таких взрывов и ударов эквивалентна взрыву водородной бомбы мощностью от 10 Мт. Катастрофу такого рода можно назвать *локальной*. При падении на Землю небесного тела диаметром от нескольких сотен метров до 1,5 километров, оно прошивает все слои атмосферы, практически не потеряв скорости, и врывается в поверхность (суши или океана) с огромной энергией. Последствия такого удара подобны крупнейшим землетрясениям, извержениям вулканов или ограниченной ядерной войне. В океане при таком падении образуются грандиозные волны цунами. Разрушения и пожары могут охватить миллионы квадратных километров (вплоть до целого материка). Катастрофу такого рода можно назвать *региональной*. Начиная с некоторого порогового значения, которое оценивается величиной  $2 \cdot 10^4$  Мт, что соответствует падению на Землю небесного тела диаметром свыше 1,5 километров, последствия столкновения охватывают весь земной шар, в силу чего такую катастрофу называют *глобальной*.

В табл. 4.4 сведены основные последствия столкновения небесного тела с Землей при различных энергиях соударения.

Последствия столкновения небесного тела с Землей достаточно разнообразны и могут иметь самые печальные последствия для жизни и деятельности людей.

Наиболее частыми являются столкновения Земли с веществом как регулярных, так и спорадических метеорных потоков, с метеороидами. В результате в течение года в атмосферу Земли попадает (*Микиша и др., 1995*) до  $2 \cdot 10^5$  тонн метеорного вещества в виде мелких фракций (или даже до  $3 \cdot 10^6$  т/сут. — *Сазонов, 2000*), которые или полностью испаряются в верхней атмосфере, или долетают до поверхности Земли в виде небольших метеоритов. Наиболее крупные метеороиды, входящие в состав метеорных потоков, выпадают на Землю в виде метеоритов.

За XX столетие на Землю упали два крупных метеорита: Тунгусский (1908 г.) и Сихоте-Алиньский (1947 г.). Оценка энергии Тунгусского явления дает величину около 5-20 Мт, энергии Сихотэ-Алиньского — величину, соответствующую взрыву примерно до 20 Кт. Для сравнения, оценка массы Аризонского метеорита (астероида?) — 12 тыс. тонн, что дает энергию соударения с Землей эквивалентную 250 Мт.

## Действие поражающих факторов при падении небесного тела на Землю

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

Авторы целого ряда работ провели расчет соответствия диаметра метеоритного (или астероидного) кратера магнитуде землетрясения, сопоставив энергию удара метеорита при скорости столкновения 40 км/с энергии землетрясения. Энергия сильнейшего (магнитуда 8,9 по шкале Рихтера) землетрясения сравнима по этим расчетам с энергией удара астероидного тела диаметром 2 км (что, кстати, не совсем соответствует результатам, приведенным выше). Глобальность ожидаемой катастрофы при ударе с такой энергией подтверждается оценкой размера кратера, образующегося на Земле в результате соударения. Расчеты для энергии, соответствующей землетрясению в 8,9 балла, дают глубину кратера порядка 20 км, что равно средней толщине земной коры. Далее делаются следующие выводы: 1) астероиды диаметром менее 0,5 км вызывают

локальные повреждения на поверхности Земли; 2) астероиды диаметрами от 0,5 км до 2 км вызывают серьезные повреждения регионального характера; 3) астероиды с диаметрами более 2 км способны вызвать катастрофу глобального масштаба; 4) кроме этого, при глобальной катастрофе в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, что приводит к эффекту «ядерной зимы».

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

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

С ударами крупных метеороидов и астероидов часто связывают массовые уничтожения биоты, происходившие время от времени в истории Земли. На рис. 4.15 представлены данные о периодах катастрофического вымирания морских животных за последние 250 млн. лет (*Raup, Sepkoski, 1984*).

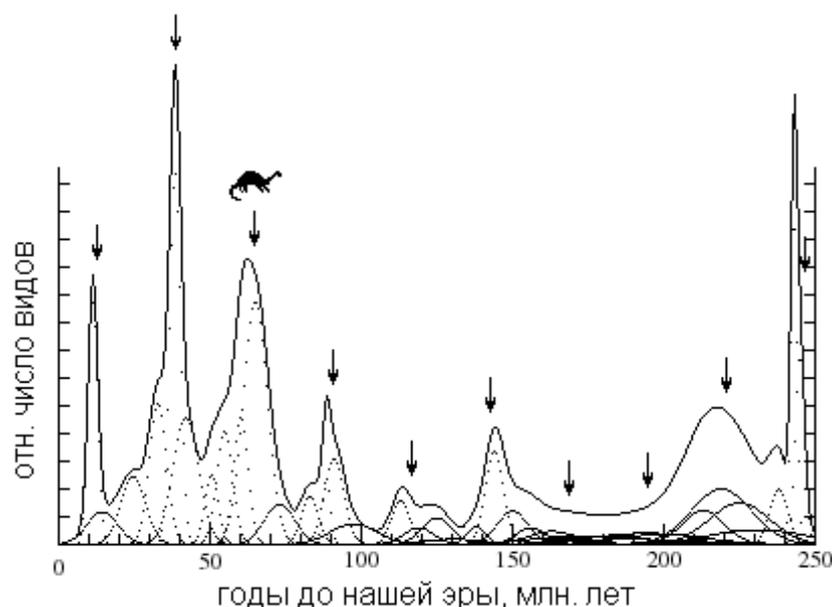


Рис. 4.15. Периоды катастрофического вымирания морских животных (пик 65 млн. лет соответствует Юкатанскому событию)

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

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

При указанных скоростях входа в атмосферу Юпитера и шкале ее высот 30 км лобовое давление на фрагменты кометы SL9 составляло величину порядка  $10^5$  атм, и разрушение их начало происходить еще над облаками планеты. В дальнейшем образовавшаяся крупная пыль в облаке горячего газа (до десятков тысяч градусов за ударной волной) взры-

валась и в таком виде, расширяясь, продолжало двигаться вглубь атмосферы. Через несколько десятых долей секунды после взрыва основная часть вещества собиралась в чашеобразном слое радиусом  $\sim 3$  км и толщиной  $\sim 1$  км с отогнутыми вверх краями чаши. Через 1 с после взрыва облако имеет радиус около 7 км, через 6 с – 10 км. Далее ударная волна движется вниз и достаточно быстро затухает. После ее ухода образуется термик (облако нагретого газа), который всплывает под действием архимедовой силы. Образуется струйно-конвективное движение газа вверх со скоростью до 3,5 км/с. Колонка восходящего газа имеет диаметр порядка 40 км и состоит лишь на 10-15% из вещества кометы. В дальнейшем выходящие из атмосферы Юпитера и наблюдавшиеся астрономами огненные шары имели размеры в несколько тысяч км и поднимались над лимбом планеты на  $\sim 3000$  км. На местах входа фрагментов кометы в атмосферу образовывались пятна размерами в несколько тысяч км и сохранявшиеся в течение нескольких месяцев (*Тирский, 2001*).

Наблюдались: генерация внутренних гравитационных волн поднимающимися облаками взрыва, возмущения ионосферы и магнитосферы, аномалии в радиоизлучении радиационных поясов Юпитера. Более слабо проявили себя эффекты: световое эхо от спутников Юпитера, возбуждение сейсмической активности в процессе столкновения. Имеются отдельные сообщения о наблюдении уярчения радиационных поясов в ДМ-диапазоне, возбуждение фиолетового полярного сияния, вспышки УФ- и рентгеновского излучения при ударе одного из осколков, уменьшение яркости плазменного тора спутника Ио в крайнем ультрафиолете и др. (*www.science.ru., 2002*).

Последствия столкновения наблюдались даже через несколько лет КА Cassini, который исследовал Юпитер уже в 2000-2001 гг. (*www.spacenews.ru, 2004*).

Оценка частоты столкновений опасных тел с Землей в современную эпоху дает величины, значительно более низкие по сравнению с частотой разрушительных землетрясений: для тел типа Тунгусского метеорита от 200 до 700 лет, для астероидов с диаметром от 0,5 до 2 км – частота составляет 70-20 тысяч лет, для астероидов диаметром более 2 км – 1 млн. – 300 тыс. лет (*Микиша, 1995*).

В качестве номинального порога, при котором наступает глобальный эффект, в (*Боярчук, 1999*) принимается значение энергии  $2 \cdot 10^5$  Мт, соответствующее энергии каменного небесного тела диаметром 1,5 км. Как отмечают авторы этой работы, ошибки в определении номинальной пороговой энергии могут составить целый порядок. Более оптимальным, видимо, его значение в диапазоне  $1,5 \cdot 10^4 \div 10^7$  Мт, что соответст-

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

С другой стороны, основываясь на результатах, полученных в результате испытаний ядерного оружия, следует, что взрыв с энергией  $10^5$ - $10^6$  Мт приводит к образованию такого количества пыли, что это вызовет резкое снижение температуры на большей части суши и приведет к эффекту «ядерной зимы» (Вавилов, 1988; Израэль, 1987; Моисеев, 1988; Стенчиков, 1987). Такая энергия выделяется и при столкновении Земли с небесным телом размерами 1-2 км и скоростью 20 км/с. Нижняя оценка частоты таких соударений – около 300 тыс. лет.

На рис. 4.16 представлена усредненная по различным данным (Боярчук, 1999; Сазонов, 2000) зависимость частоты столкновения астероидов от их размеров.



Рис. 4.16. Частота  $N$  столкновения астероидов с Землей в функции их размеров или мощности соударения

При энергиях соударения меньших 1-2 Мт кометные тела взрываются в верхних слоях атмосферы. При таких энергиях основную опасность представляют каменные и железо-каменные метеориты. Кометы дают основной вклад в общий поток опасных тел при энергиях соударения 3-20 Мт. В частности, распад ядер мини-комет в ОКП на высотах 8000-24000 км над Землей приводит к образованию крупных облаков

водяного пара, что может вызвать повышение уровня океана на 2,5 см каждые  $10^4$  лет (Сазонов, 2000). При энергиях, больших 20 Мт и до  $\sim 10^6$  Мт астероидный и кометный компоненты дают примерно одинаковый вклад в общий поток опасных объектов. При более высоких энергиях соударений кометная составляющая резко возрастает.

Вместе с тем иногда считают (Сазонов, 2000), что неизвестны еще около  $10^5$  астероидов и комет, имеющих размеры более 100 м, и пересекающие орбиту Земли. Этот факт совместно с анализом свыше 130 ударных кратеров на поверхности Земли может значительно повысить вероятности столкновения Земли с естественными космическими объектами.

Далее перечислим результаты воздействия космических тел естественного происхождения на околоземное космическое пространство.

Это периодические и внезапные процессы резкого повышения загрязненности ОКП частицами метеорного, астероидного, кометного происхождения, компонентами газов кометного происхождения, что ведет к уменьшению общего потока тепла, поступающего в биосферу, физическим и химическим процессам в верхней атмосфере и ионосфере, изменяющим их свойства, изменению условий прохождения радиоволн различных частот через ионосферу.

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

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

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

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

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

Основываясь на результатах, полученных в ходе испытания ядерного оружия, было получено, что взрыв с энергией  $10^5$  -  $10^6$  Мт должен привести к образованию такого количества пыли и атмосфере, что это вызовет снижение температуры па большей части суши, по крайней мере, на

несколько градусов Цельсия. Такая энергия выделится при столкновении с Землей тела с размерами 1 - 2 км со скоростью 20 км/с.

В соединении с другими прямыми эффектами, сопровождающими падение крупного тела (гибель миллионов людей, разрушение озонового слоя, отравление почвы и поверхностных вод кислотными дождями и т.п.), гибель урожая и массовый голод могут повлечь смерть нескольких миллиардов людей и дестабилизацию всей человеческой цивилизации. Гибель динозавров и многих других видов живых существ на пороге Кайнозойской эры была, по-видимому, вызвана одним из таких событий.

Космические тела способны не только приносить на Землю энергию, по сравнению с которой энергия даже наиболее мощного ядерного взрыва представляется карликовой, но они также могут оказаться детонатором ядерного конфликта между различными странами, поскольку световые и тепловые эффекты, возникающие при взрыве подобных тел в атмосфере или на земной поверхности, могут быть восприняты враждующими сторонами как начало ядерной атаки и повлечь за собой ответные действия.

Таблица 4.5

Экологические последствия космической опасности

Объект	Размеры	Частота (раз в ... лет)	Размер кратера (км)	Результат столкновения с Землей
Пылинка	$D < 0.1$ см			Сгорает
Метеороид	$0.1 \text{ см} < D < 0.5$ м			Сгорает
	$0.5 \text{ м} < D < 20-30$ м			Долетают до Земли с малой скоростью
	$> 30$ м	250	Нет $> 0.5$	Типа Тунгусского события Аризонский кратер
Астероид	$> 100$ м	5 тыс.	$> 2$	Региональная катастрофа
	$> 1$ км	600 тыс.	$> 20$	Глобальная катастрофа
	10 км	100 млн.	200	Конец цивилизации

Таким образом, астероидная и метеоритная (включая ядра комет) опасность существует и способна достаточно активно воздействовать на природу Земли. Однако, хотя падение на Землю небесного тела является

достаточно редким событием, риск погибнуть в результате космической катастрофы для каждого отдельного человека вполне сопоставим с риском гибели от более традиционных источников опасности (*Боярчук, 1999*).

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

### **4.3. Оценка риска космической опасности для человека.**

Понятно, что определенная вероятность того, что на Землю упадет небесное тело, способное причинить значительный ущерб людям, существует. Такие события весьма редки, поэтому у человечества нет опыта «астероидной опасности».

Непосредственное попадание метеорита в человека — явление крайне редкое и при рассмотрении риска может практически не учитываться. Реальную опасность представляет падение достаточно крупных небесных тел — только они способны достигнуть поверхности Земли или нижних слоев атмосферы и причинить сильные разрушения, сравнимые с крупными природными катастрофами или взрывом водородной бомбы. Самое разрушительное землетрясение унесло около 2 миллионов жизней людей. Такие стихийные бедствия, как оползни, цунами, ураганы и извержения вулканов, уносили до 300 тысяч жизней людей каждое. Столкновение небесного тела с Землей, вообще говоря, не имеет верхнего предела разрушительности — оно может стать причиной гибели всего человечества и, даже, почти всего живого на Земле. Поэтому, несмотря на чрезвычайную редкость таких событий, они становятся в ряд с другими источниками риска погибнуть для человека.

По современным данным построен ряд источников риска гибели людей в порядке их опасности (табл. 4.6).

Значимость каждого источника риска различна в разных странах. Далеко не во всех частях мира происходят землетрясения, случаются ураганы и наводнения, извергаются вулканы. Для падения же небесных тел вся поверхность Земли одинаково уязвима и в этом отношении все страны и народы подвержены риску столкнуться с этим событием.

Хотя падение на Землю достаточно крупного тела и представляет весьма редкое событие, можно показать, что риск погибнуть в результате

космической катастрофы для каждого отдельного человека оказывается не меньшим, чем риск, которому подвергаются люди от более привычных источников опасности.

Значимость каждого источника риска различна в разных странах. Далеко не во всех частях мира происходят землетрясения, случаются ураганы и наводнения, извергаются вулканы. Для падения же небесных тел вся поверхность Земли одинаково уязвима и в этом отношении все страны и народы подвержены риску столкнуться с этим событием.

Хотя падение на Землю достаточно крупного тела и представляет весьма редкое событие, можно показать, что риск погибнуть в результате космической катастрофы для каждого отдельного человека оказывается не меньшим, чем риск, которому подвергаются люди от более привычных источников опасности.

Таблица 4.6

Глобальные источники гибели людей

<i>№ значимости в мире</i>	<i>Источник</i>	<i>Смертность в год на 100 тыс.чел. в России (1990-е гг.)</i>
1	Основные болезни (сердца, рак)	1018,77
2	Войны и геноцид	0,5
3	Эпидемии	16,47
4	Голод	**
5	Болезни органов дыхания и пищеварения	120,02
6	Дорожно-транспортные происшествия	26,84
7	Самоубийства и убийства	59,1
8	Ураганы и наводнения	**
9	Отравления и пожары	32,89
10	Землетрясения	-
11	Несчастные случаи (в т.ч. авиа и ж/д)	77,34
12	Падение небесного тела с глобальными разрушительными последствиями	(1)*
13	Грозы, вулканы	**
14	Укусы ядовитых существ	**
15	Падение небесного тела с локальными последствиями (типа Тунгусского)	(0,0005)*
16	Терроризм	**

\*— вычисленные величины

\*\* — нет данных

В работе (Замышляев, 2000) рассчитаны риски для человека при падении ледяных  $D_{лед} \leq 250м$  и для каменных  $D_{кам} \leq 100м$  астероидов.

Для этих размеров рассмотрено динамическое торможение в воздухе с «взрывным» характером выделения тепловой энергии на определенной высоте, создающей воздушную ударную волну:

- тепловая энергия взрывного характера –  $E_{\text{теп}} = 0,6E_{\text{кин}}$
- энергия светового излучения –  $E_{\text{св.изл}} = (0,1 - 0,15)E_{\text{теп}}$
- энергия воздушной ударной волны –  $E_{\text{ув}} \approx 0,5E_{\text{кин}}$

$$\text{где } E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} \left( \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \right) \cdot \rho_{\text{аст}} \cdot V_{\text{аст}}^2 \quad (4.23)$$

Установлено, что взрывная ударная волна от астероида соответствует ударной волне от ядерного взрыва при

$$q_{\text{яв}} \approx E_{\text{кин}} \text{ и } H_{\text{яв}} = H_{\text{сг.аст}}$$

$$q_{\text{яв}} = E_{\text{кин}}$$

При  $D_{\text{лед}} \geq 250\text{м}$  и  $D_{\text{кам}} \geq 100\text{м}$  астероид долетает до поверхности Земли с «взрывным» выделением тепловой энергии на поверхности или на небольшой глубине (табл. 4.7).

*Поражение населения. Индивидуальный и коллективный риск смертельного исхода от падения астероидов*

*Зоны поражения для открыто расположенного человека*

$$S_{0,8} = \pi \cdot r_{0,8}^2, \text{ где } r_{\text{з.л.}} = r_{0,8} \rightarrow \Delta P_{\phi} = 0,8 \frac{\text{кЗ}}{\text{см}^2} \quad (4.24)$$

*Зоны поражения для человека, расположенного в здании*

50% смертельного исхода при разрушении здания

1% смертельного исхода при разрушении остекления

Разрушение здания:  $S_{0,28} = \pi \cdot r_{\text{зд}}^2 = \pi \cdot r_{0,28}^2$ , где  $r_{0,28} \rightarrow \Delta P_{\phi} = 0,28 \frac{\text{кЗ}}{\text{см}^2}$

Разрушение остекления:  $S_{0,07} = \pi \cdot r_{\text{ост}}^2 = \pi \cdot r_{0,07}^2$ , где  $r_{0,07} \rightarrow \Delta P_{\phi} = 0,07 \frac{\text{кЗ}}{\text{см}^2}$ .

Индивидуальный риск смерти человека при ЧС для региона:

$$R_{\text{см}}^{\text{И}} = \frac{N_{\text{см}}}{N_{\text{рег}}} P_{\text{ЧС.рег}} \quad (4.25)$$

где  $N_{\text{см}} = \rho_{\text{сп}} \int_0^{\infty} 2\pi \cdot r \cdot P_{\text{см}}(r) dr$ , и координатный закон поражения человека

$$P_{\text{см}}(r) = \int_0^{\infty} P_{\text{см}}(g) \cdot P_g(r) \cdot dg.$$

Соотношение мощности ядерного взрыва с мощностью взрыва при соударении астероида с поверхностью Земли

Тип астероида	Ледяной	Каменный
Размер астероида, $D_j$ , м	$q$ , Мт/Н, км	
40	2,4/26	9,6/8
60	7,0/20	35/4
80	20/16	85/2
100	44/12	168/0,1
120	80/9	290/0
140	140/6	460
160	220/4	690
180	320/2	980
200	450/1	1350
250	880/0	2630
300	1510	4540
350	2410	7220
400	3590	10770
450	5110	15340
500	7010	21040
600	12120	36350

При ступенчатом законе поражения человека:

$$P_{см}(r) = 1 \text{ при } r \leq r_{з.п.}$$

$$P_{см}(r) = 0 \text{ при } r \geq r_{з.п.}$$

$$N_{см} = \rho_{ср} \cdot S_{з.п.} = \rho_{ср} \cdot 2\pi \cdot r_{з.п.}^2 \quad (4.26)$$

Индивидуальный риск смерти от падения  $i,j$ -го астероида ( $D_{i,j} = 2 \cdot R_{аст.i,j}$ ) для людей, расположенных открыто:

$$R_{см.i,j}^И = \frac{N_{см.i,j}}{N_{рег}} \cdot \frac{S_{рег}}{S_{земля}} \cdot P_{i,j} = \frac{S_{з.п.i,j}}{S_{земля}} \cdot P_{i,j} \quad (4.27)$$

для людей , находящихся в зданиях:

$$R_{i,j}^H = \left[ 0,5 \cdot S_{0,28,i,j} + 0,01(S_{0,07,i,j} - S_{0,28,i,j}) \right] \frac{P_{i,j}}{S_{земля}}. \quad (4.28)$$

Распределение населения для России:

- городское (70%): открыто- 0,1; в зданиях- 0,9
- сельское (30%): открыто- 0,5; в зданиях- 0,5.

Индивидуальные средние риски смертельного исхода человека для России

от падения астероидов малых размеров (до  $D \leq 60$ м)

$$R_{см}^H = 2 \cdot 10^{-8}$$

от падения астероидов с размерами до  $D=600$ м

$$R_{см}^H = 3,5 \cdot 10^{-7}$$

Индивидуальные риски смертельного исхода человека для России от всех ЧС:  $R_{см.ЧС}^H = 10^{-4}$  больше, чем от астероидов, на  $\sim 3$  порядка.

Коллективный риск смертельного исхода человека для России от падения астероидов с размерами до  $D=600$ м:

$$R_{см.Рос}^{КОЛ} = R_{см}^H \cdot N_{Рос} = 55 \text{ чел.}$$

В то же время при падении на Москву астероида малых размеров ( $D=40-60$ м) погибнет более  $N_{см} = 1$  *Омлн.чел.*, а ущерб будет порядка  $Y^э = 200$  *триллионов рубль.*

Затраты на создание системы защиты не будут превышать приемлемую по рискованной концепции стоимость 55 триллионов рублей.

При использовании созданной системы и для защиты территорий других государств предотвращенный риск будет больше, и допустимая стоимость ее создания возрастет в несколько раз.

Риск погибнуть в результате космической катастрофы является произведением вероятности падения на Землю космического тела на вероятность того, что это падение вызовет смерть данного индивидуума. Оценим годичный риск погибнуть от падения тела, подобного Тунгусскому метеориту. Годичная вероятность столкновения последнего с Землей равна 0,003. Примем, что в результате падения погибнут все индивидуумы в зоне поражения. При энергии, равной 15 Мт, зона поражения составит примерно 1200 км<sup>2</sup>. Риск погибнуть в течение года вычисляется, как произведение вероятности столкновения Земли с космическим телом на вероятность оказаться в зоне поражения. При условии равномерного распределения населения по земной поверхности (включая океаны и Антарктиду) в зоне поражения окажется около 14 тыс. человек. Это значит, что вероятность погибнуть в течение года от такого падения небес-

ного тела для индивидуума составляет  $1/130000000$ , что соответствует (1,0008 смертей на 100 тыс. жителей). Для России эта величина еще меньше (примерно равна 0,0005), так как плотность населения в России немного ниже средней плотности населения на земном шаре.

Для оценки риска погибнуть в результате глобальной катастрофы примем, что практически все человечество погибнет, то есть вероятность гибели для всех 6 миллиардов жителей Земли равна единице. Умножение вероятности падения тела, вызывающего пороговый эффект ( $1/100000$ ), на вероятность гибели индивидуума, равную единице, дает вероятность гибели индивидуума в течение года, равную  $1/100000$ , что соответствует примерно 1 смерти на 100 тыс. жителей в год.

Из этих расчетов следует, что риск, связанный с глобальной катастрофой, доминирует, так как при глобальной катастрофе основной причиной смертности являются нарушения климата (так называемая «ядерная зима») и другие не прямые эффекты, охватывающие всю Землю. На рис. 4.17а приведены результаты расчетов числа жертв при падении на Землю небесных тел различного размера.

Частота падения небесных тел большого размера сравнительно невелика. Но при каждом падении астероида на Землю разрушений и жертв может быть существенно больше, чем при других природных и техногенных катастрофах. В расчете на год, потенциальное количество жертв в такой катастрофе составляет от 10 до 10000, в зависимости от размера небесного тела, упавшего на Землю (рис. 4.17б). На этих рисунках заштрихованные области показывают пределы неопределенности в оценках порогового значения для глобальной катастрофы. Введены обозначения: А и С нижние и верхние оценки величины порогового значения, В – средняя оценка. Пунктирной линией на обоих рисунках показано возможное возрастание смертности из-за цунами.

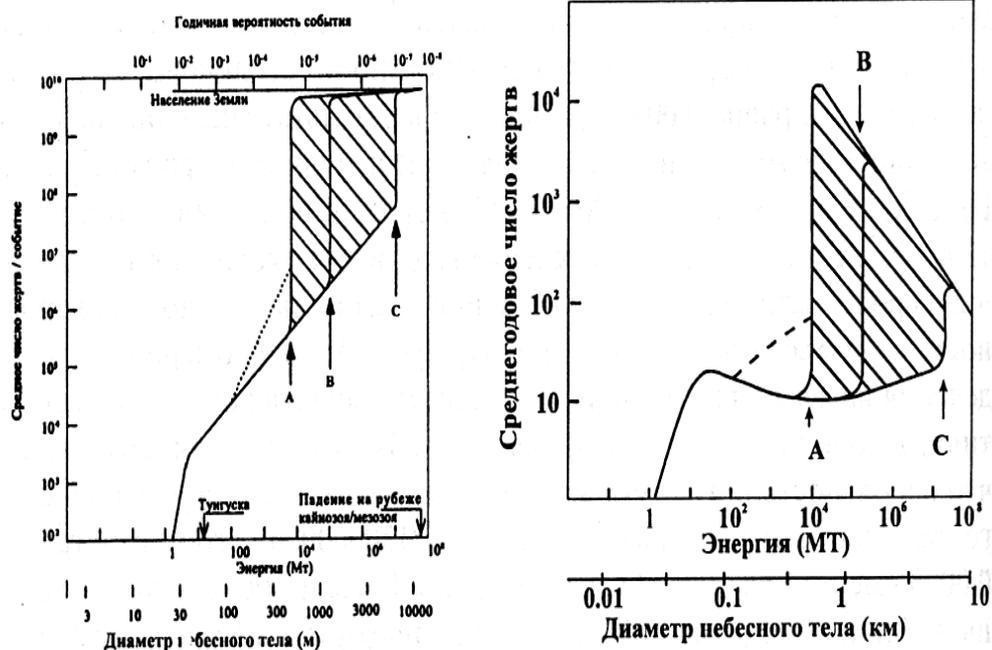


Рис. 4.17. а) среднее число жертв при падении небесных тел разных размеров; б) среднегодовое число жертв при падении небесных тел разных размеров

В качестве номинального порога, при котором наступает глобальный эффект, принимают значение энергии  $2 \cdot 10^5$  Мт, соответствующее диаметру падающего каменного тела в 1.5 км. Ошибка в оценке номинальной пороговой энергии может составить целый порядок или быть даже большей. Можно принять, что пороговое значение лежит в интервале  $1.5 \cdot 10^4 - 10^7$  Мт, что соответствует диаметрам падающего тела 0.6—5 км при скорости 20 км/с и соответственно 0.4—3 км при скорости 42 км/с. Отметим, что средняя частота падения тел, соответствующих нижней и верхней границе интервала неопределенности, составляет  $7 \cdot 10^4$  лет и  $6 \cdot 10^6$  лет соответственно. Номинальное значение частоты падения тела, способного вызывать глобальную катастрофу, соответствует одному падению в 100 тыс. лет.

Как показывает рис. 4.17.б, наибольшее значение среднегодового числа жертв вызывается падением тел, близких по размеру к номинальному пороговому значению (1.5 км). Оказывается, возможность погибнуть в результате падения на Землю небесного тела не столь уж мала — она практически в точности совпадает с возможностью погибнуть в результате авиакатастрофы и несколько ниже, чем стать жертвой убийцы. Но если снизить личную опасность от авиакатастрофы и убийства человек в состоянии с помощью личных мер безопасности (не летать на самолетах и не общаться с бандитами, криминальными бизнесменами и

политиками), то перед астероидной опасностью все человечество в настоящее время одинаково незащищено.

В ряде отношений астероидная опасность превосходит все другие естественные или техногенные опасности, за исключением, быть может, только глобального ядерного конфликта. У всех естественных катастроф (извержений, землетрясений, тайфунов и т.п.) имеется верхний предел освобождаемой энергии, все они имеют сугубо локальный характер. Падение крупного тела на Землю способно вызвать гибель значительной части населения Земли в течение нескольких месяцев или лет. Глобальная катастрофа особенно страшна тем, что ни одна нация или правительство не будут способны оказать помощь другим странам, поскольку бедствие охватит всю планету.

#### **4.4. Метеорное загрязнение околоземного пространства как экологический фактор**

В последние годы стало очевидно, что метеорное вещество, попадающее в околоземное космическое пространство, может воздействовать на космическую технику и космонавтов, оказывать влияние на его состояние и объекты биосферы (*Ивлев, 2001; Муртазов, 2004*).

Это стало одной из причин внимания к проблемам экологии, связанным с процессами, которые создает естественный мусор в околоземном пространстве.

По различным данным в среднем в атмосферу Земли попадает 10-12 т/с метеорного вещества. При средней скорости метеоров относительно Земли 50 км/с их кинетическая энергия составляет до  $1,5 \cdot 10^{10}$  Дж/с. Эта энергия распределяется между тремя процессами: нагреванием, свечением и ионизацией в соотношении  $10^4:10^2:1$ . Она расходуется главным образом, а может быть и полностью, на нагревание, являясь одной из второстепенных составляющих теплового баланса атмосферы.

Плотность потока малых тел Солнечной системы, проходящих через ОКП, представлена на рис.4.18 (*Багров и др., 2003*). Наиболее мелкие из них создают явление метеоров в атмосфере и наблюдаются оптическими и радиолокационными методами.

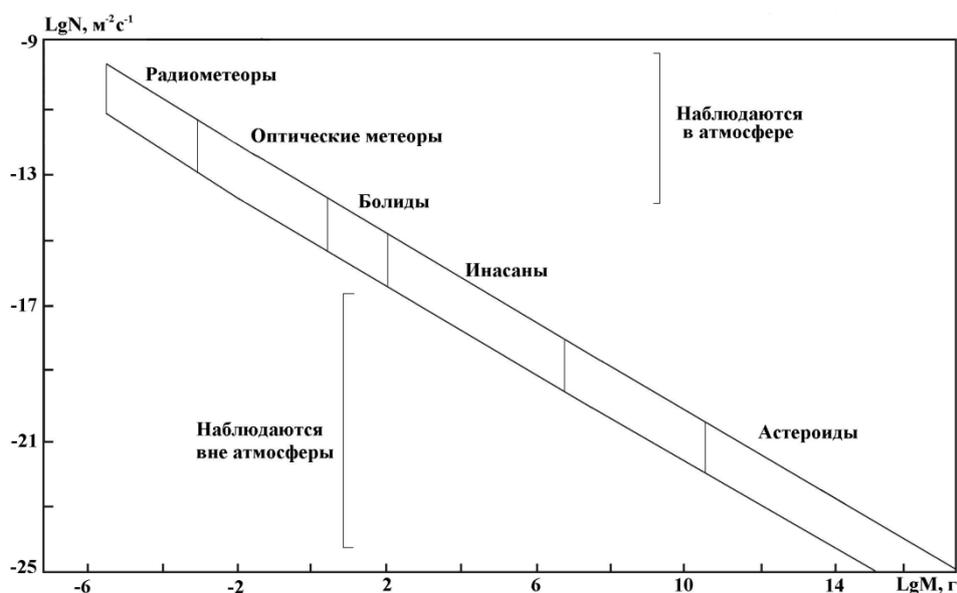


Рис. 4.18. Поток тел естественного происхождения в ОКП

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

Радианты спорадических метеоров имеют неравномерное распределение на небесной сфере. Здесь различаются шесть основных областей направлений прихода метеорных тел на Землю (Боярчук, 1999). Плотность потока спорадических метеороидов колеблется в весьма широких пределах, появление их практически непредсказуемо.

Для представления распределения метеорного вещества в ОКП разработан целый ряд моделей: ГОСТ 25645.128-85 «Вещество метеорное», модель пространственного распределения; Engineering meteoroid models for ESA (Grün et al., 1993); NASA90 model (Anderson, 1991); NASA93 model (Divine, 1993); METEM (Garrett, 1999); ORDEM2000, или модель NASA96 (Kessler et al., 1996); MASTER (Sdunnus, 1995), а также множество их обновлений после 2000 года.

Стандарт ГОСТ 25645.128-85 (Андреев, Бабаджанов и др., 1985), действующий с 1987 г., устанавливает модель пространственного распределения метеорных тел массой  $10^{-6}$  -  $10^2$  г в плоскости эклиптики до расстояний  $\sim 10^6$  км и тел массой  $10^{-9}$  -  $10^{-6}$  г в пределах 200 - 1000 км от Земли.

Плотность потока спорадических метеорных тел в геоцентрической и гелиоцентрической системе координат  $N(m, v, \varepsilon, \psi)$  определяется как

$$N = N(m) * P_{\varepsilon}(v) * P(\varepsilon, \psi) \quad (4.29)$$

где  $N(m)$  – усредненная за год плотность потока спорадических метеорных тел массой большей  $m$ ,  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;  $P_{\varepsilon}(v)$  – условное распределение скоростей спорадических метеорных тел при фиксированном значении  $\varepsilon$ ,  $\text{с}\cdot\text{км}^{-1}$ ;  $P(\varepsilon, \psi)$  – двумерное распределение плотности радиантов спорадических потоков,  $\text{град}^{-2}$  (плотность вероятности появления метеорных тел в направлении  $\varepsilon, \psi$  во всем интервале скоростей и масс);  $v$  – скорость спорадического метеорного тела,  $\text{км}\cdot\text{с}^{-1}$ .

В геоцентрической системе координат  $v=v_{\infty}$  – внеатмосферная скорость метеорного тела.

В гелиоцентрической системе координат  $v=v_h$  – гелиоцентрическая скорость метеорного тела;  $\varepsilon$  – угол между вектором скорости спорадического метеорного тела  $v$  и вектором, противоположным вектору орбитальной скорости Земли  $v_3$  (град);  $\psi$  – измеряется от плоскости эклиптики в направлении от Солнца к северному полюсу эклиптики,  $-180 \leq \psi \leq +180$ .

Средняя за год плотность потока спорадических метеорных тел в ОКП  $N(m)$  массой больше  $m$  вычисляется как

$$N(m) = N(m_0) * \left(\frac{m}{m_0}\right)^{1-S}, \quad (4.30)$$

где  $N(m_0)$  – плотность потока метеорных тел массой больше  $m_0$ ,  $[\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}\cdot(4\pi_{\text{ср}})^{-1}]$ ;  $S$  – показатель распределения тел по массе.

Для спорадических метеорных тел  $S=2,2$ . Для тел, принадлежащих метеорным потокам,  $S=1,8$  и  $m_0=10^{-3}$  г.

Первоначально стандарт использовался для расчетов при определении условий функционирования технических устройств в околоземном пространстве.

В табл. 4.8 приведены данные об основных метеорных потоках, орбиту которых Земля пересекает в течение года.

Данные о содержании метеороидов в потоках являются усредненными. Это обусловлено большой неравномерностью распределения частиц в роях, тогда как в моделях частицы считаются распределенными равномерно. В реальности неравномерность потока метеороидов растет с их размерами. Существуют некоторые несистематизированные данные о содержании в ряде потоков метровых и декаметровых тел.

Основные метеорные потоки в районе земной орбиты

Поток	Период активности	Скорость $v/v_h$ км/с	Плотность потока, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	Пространственная плотность, $\text{км}^{-3}$
Квадрантиды	1-4.01	41/38	$24 \cdot 10^{-12}$	$44 \cdot 10^{-9}$
Лириды	19-24.04	48/41	$6 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-9}$
$\eta$ -Аквариды	1-8.05	66/39	$8 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-9}$
Ариэтиды дневной	22.05-02.07	39/	$16 \cdot 10^{-12}$	$30 \cdot 10^{-9}$
дзета-Персеиды (дневной)	20.05-05.07	27/	$10 \cdot 10^{-12}$	$18 \cdot 10^{-9}$
Персеиды	15.07-25.08	60/42	$8 \cdot 10^{-12}$	$15 \cdot 10^{-9}$
Тауриды	15.09-1.12	30		$28 \cdot 10^{-9}$
Дракониды 1933 1946	8-10.10	50		$1,8 \cdot 10^{-4}$ $3,6 \cdot 10^{-4}$
Ориониды	18-26.10	66/42	$14 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$
Леониды 1866	14-20.11	72/41	$2 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-7}$
Геминиды	7-15.12	36/34	$13 \cdot 10^{-12}$	$132 \cdot 10^{-9}$
Спорадические метеоры		11,2-72		$1,1 \cdot 10^{-6}$ - $1,2 \cdot 10^{-5}$

Считая потоки метеороидов вблизи Земли и Луны одинаковыми, можно оценить его значения по данным исследований лунной поверхности (Бусарев и др., 2007).

На рис. 4.19 кривая 1 и точки 2 представляют обобщения различных серий наземных и космических наблюдений и характеризуют поток микрометеороидов с массами приблизительно от  $10^{-17}$  до  $10^2$  г. Распределение 3 представляет собой обобщенный анализ данных, полученных по степени метеоритной эрозии доставленных на Землю образцов лунных поверхностных пород. Результаты пассивного сейсмического эксперимента, проведенного на лунной поверхности по программе КК «Аполлон», позволили оценить поток метеоритного вещества, реально выпадающего на Луну. Полученная по этим данным зависимость представлена на рис. 4.19 распределением 4. Зарегистрированный поток оказался в 10 – 1000 раз меньшим, чем прогнозируемый по наземным наблюдениям. Более поздние по времени данные, полученные с помощью пассивного сейсмического эксперимента, относящиеся к потоку с интервалом масс частиц от  $10^3$  до  $10^5$  г показаны распределением 5.

Эти данные иллюстрируют реальные и достаточно большие отклонения в значениях плотности потоков метеороидов от модельных расчетов (1), (2).

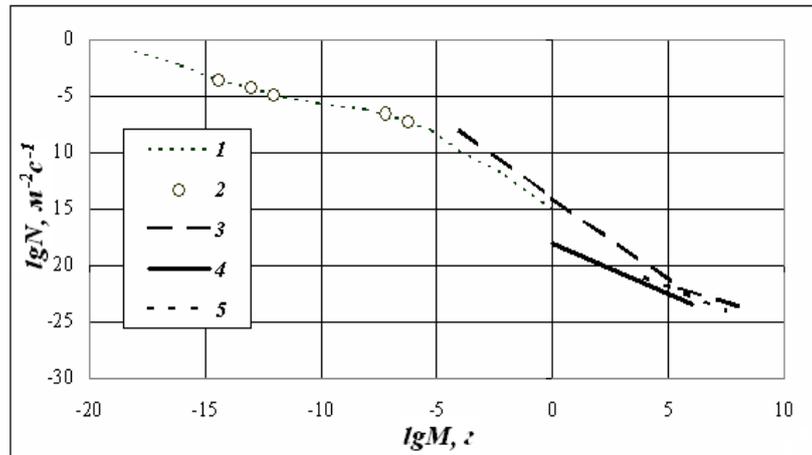


Рис. 4.19. Распределение по массам выпадающих на лунную поверхность частиц. По вертикальной оси отложен логарифм числа частиц, выпадающих на площади в  $1 \text{ м}^2$  за секунду (Бусарев и др., 2007)

В дополнение к этой, в других моделях рассматривается целый ряд дополнений и уточнений, например, эффект затенения метеорного потока Землей и эффект ее гравитационной фокусировки (*Grun et al., 1985*), временной профиль метеорного потока (*Cour-Palais, 1969*), есть ряд особенностей в моделях потоков (*Jenniskens, 1994*).

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

Метеороиды представляют заметную опасность для ИСЗ и пилотируемых космических кораблей и станций. Опасными уже являются тела, имеющие диаметр выше 1 мм. Для сравнения, кинетическая энергия 1-мм частицы потока Персеиды, имеющей скорость относительно Земли 60 км/с, более чем на порядок превосходит кинетическую энергию 9-мм пули.

Присутствие пылевых частиц в ОКП, особенно в верхней атмосфере, ведет к появлению слоев с оптической плотностью, большей плотности фона. Однако, для пылевых частиц естественного происхождения с их современной концентрацией в верхней атмосфере оптические эффекты исчезающе малы (исключение может составить падение крупного тела, в результате которого в верхнюю атмосферу поднимается большое количество пыли).

В мезопаузе (80-85 км) образуются серебристые облака, где пылевые частицы, по одной из гипотез, являются центрами конденсации капель воды и кристаллов льда (*Сурдин, 2006*).

Чаще всего пылевые частицы могут быть ответственны за каталитические реакции в атмосфере и появление различных продуктов, способствующих развитию конденсационных процессов и образованию облачных систем (Ивлев, 2001). В некоторых случаях говорят о взаимосвязи микрометеороидов с парниковым эффектом.

В последнее время отстаивается гипотеза о наличии некоторой корреляции между возрастанием плотности потока частиц в ОКП и количеством дождей через некоторое время после его начала (Борисевич, Границкий, 2000). Аномальное выпадение осадков после прохождения мощного метеорного потока может объясняться тем, что метеорная пыль, составляющая ~20%; всех пылевых частиц в верхней атмосфере, играет роль ядер конденсации паров воды. То есть, в случаях мощных метеорных потоков может обнаруживаться понижение прозрачности атмосферы ввиду образования тумана. Эта проблема была поставлена в 50-гг XX века при рассмотрении механизма образования серебристых облаков (Сурдин, 2006).

Несмотря даже на значительное число падающих метеоров во время метеорных дождей, это практически не влияет на изменение температуры Земли. Нами (Муртазов, 2007) рассчитано уменьшение температуры Земли во время действия основных метеорных потоков считая, что все метеоры этих потоков имеют радиус 1 мм (то есть являются опасными для космических аппаратов) и что планета перекрывается от солнечного излучения всем потоком.

Они наглядно показывают, что ни один метеорный поток не перекрывает солнечное излучение настолько, чтобы хоть как-то заметно изменить глобальную температуру Земли. К примеру, для частиц радиусом 1 мм и времени действия потока 1 месяц ( $h \approx 8 \cdot 10^{10}$  м) полное перекрытие ими потока солнечного света достигается при объемной плотности потока  $n \approx 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ км}^{-3}$ . В этом случае небо для наблюдателя на Земле станет практически черным, а часовое число падающих метеоров на нем составит  $\sim 10^{12}$ .

Вдоль траектории пролета метеороида образуется электронно-ионный след в виде цилиндрической трубки, которая постепенно расширяется. Метеор с начальной скоростью 40 км/с создает на высоте 95 км след с начальным радиусом 1 м. Такой ионизированный хвост образуется вдоль всей траектории и постепенно расширяется.

Плазма метеорного следа при температуре свыше 2000 К излучает энергию не только в оптическом, но и большей частью в радиодиапазоне с частотами в десятки кГц, соответствующими ленгмюровским частотам электронов

$$\omega_e = \frac{\sqrt{4\pi N e^2}}{m_e}.$$

При пролете метеора в зоне ионосферного слоя  $E$  образуется полоса повышенной ионизации.

Хорошее отражение радиоизлучения от плазмы метеорных следов дает возможность организации дальней MS (Meteor Scatter) связи в УКВ-диапазоне в периоды действий основных метеорных потоков.

Если метеоров достаточно много, например, в июле-августе, когда действует сразу несколько потоков, говорят о появлении спорадического ионосферного слоя  $E_S$ . Ночью, когда Земля экранирует это излучение и общая ионизация в слое  $E$  снижается на два порядка, спорадический слой  $E_S$  уверенно выявляется.

Ввиду неравномерности пролета метеороидов через земную атмосферу в слое  $E_S$  создаются квазипериодические пульсации электромагнитного поля, преимущественно с инфразвуковыми частотами. В связи с этим напомним, что современная биология указывает на важность исследований воздействий электромагнитных полей инфразвуковых частот на живые организмы.

Напомним, что частоты биоритмов человеческого организма лежат, главным образом, в инфразвуковой и суперинфразвуковой области (Мазур, Иванов, 2004). Биотоки мозга имеют выделенные резонансные частоты: альфа-ритм – 8–13 Гц; бета-ритм – 14–30 Гц; гамма-ритм – более 30 Гц; тэта-ритм 4-7 Гц; дельта-ритм - 1,5-3 Гц. Период глотательных движений составляет ~4 с, цикл сердечной деятельности – 0,8 с, период вдоха-выдоха – около 6 с, период, соответствующий частоте распространения нервных импульсов – около 0,02 с, средний период изменения биотоков в мышцах – 0,03 с.

Возникновение наблюдаемых в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды низкочастотных спектральных линий с характерными частотами, составляющими несколько десятков Гц, обусловлено модуляционным возбуждением электромагнитными волнами пылевых звуковых возмущений на высотах 80 – 120 км (Копнин и др. 2007).

Возбуждение пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков 1) приводит к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников; 2) приводит к формированию на высотах 110 – 120 км акустико-гравитационных вихревых структур. В результате, во время интенсивных метеорных потоков оказывается возможным усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба.

На рис. 4.20 представлено распределение давления инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников. Здесь (1) - малые взрывы; (2) - большие взрывы; (3) - инфразвуковые колебания от волн Рэлея при землетрясениях, магнитных бурь, ураганов, смерчей, волн, ассоциируемых с горами; (4) - сверхзвуковая авиация, грозы; (5) микробаромы; (6) - область, ограничивающая зону существования локального турбулентного шума.

Кривая 7 характеризует инфразвуковые колебания, происхождение которых связано с существованием пылевых звуковых волн в нижней ионосфере Земли во время метеорных потоков. Для частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц генерация инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями во время метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды может быть наиболее важным источником инфразвука у поверхности Земли.

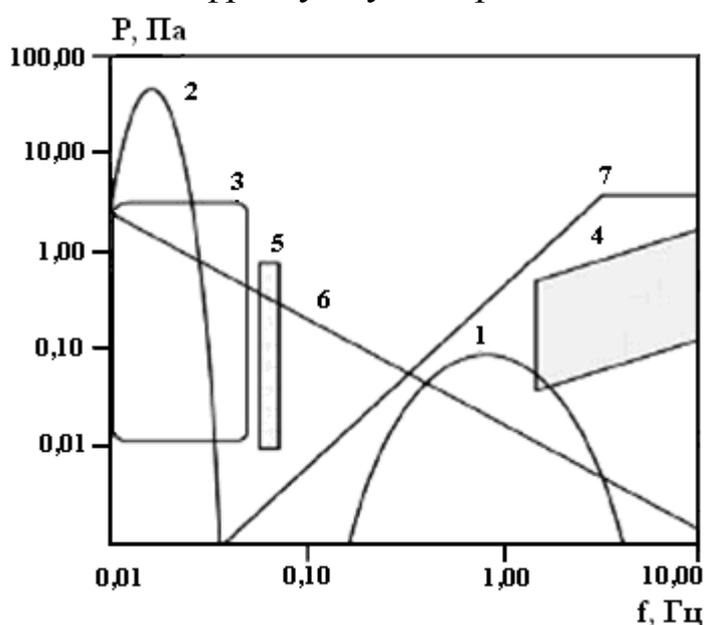


Рис. 4.20 Распределение инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников

Таким образом, поступление в околоземное пространство метеороидов оказывает достаточно заметное влияние на его состояние и, как показывают современные исследования, является одним из достаточно значимых экологических факторов.

#### Вопросы к главе 4

1. Является ли астероидно-кометная опасность единственной для земной биосферы?
2. Дать определение числу Маха.
3. Как можно связать последствия столкновений с Землей опасных космических объектов со шкалой МЧС опасных природных явлений?
4. Какова минимальная скорость соударения с Луной опасного для нее космического тела?
5. Рассчитать максимальную скорость соударения с Землей опасного космического тела.
6. Как сказывается на массе Земли падение на нее метеорного вещества ( $10^7$  т/год)?
7. Являются ли астероиды Главного пояса опасными для Земли? Какова для них оценка опасности по Туринской и Палермской шкале?
8. Сопоставить плотность потока техногенных отходов в ОКП на разных высотах с плотностью потока естественных метеорных частиц в разные сезоны.
9. Чем различаются воздействия на биосферу взрыва при падении опасного космического тела и взрыва ядерной бомбы?

## Литература

1. Аллен К.У. Астрофизические величины. - М.: Мир, 1977. - 446 с.
2. Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. - М.: Физматлит, 2003. - 384 с.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.И., Рыхловой. - М.: Физматлит, 2010. - 384 с.
4. Бруцек А., Дюран Ш. (Ред.). Солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. - М.: Мир, 1980. - 254 с.
5. Бреус Т.К. Космическая и земная погода и их влияние на здоровье и самочувствие людей // Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии: Физические подходы и клиническая практика. Вып. 2 / Под ред. Р.Р. Назирова. - М.: КДУ, 2010. С. 100-110.
6. Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас (введение в исследования околоземного космического пространства). - Троицк: Изд. ТРОВАНТ, 2005. - 231 с.
7. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. - М.: Рольф, 2002. - 576 с.
8. Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного космического пространства. Учебное пособие. - М.: Университетская книга, 2010. - 112 с.
9. Владимирский Б.М., Кисловский Л.Д. Солнечная активность и биосфера. - М.: Знание, 1982. № 4.
10. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С. Космическая погода и наша жизнь. - Фрязино. «Век-2», 2004. - 224 с.
11. Владимирский Б.М. Солнечно-биосферные связи. Полвека спустя после А. Л. Чижевского // История и современность. - 2009. Вып. №2(10).
12. Гнедин Ю.Н. Комета Шумейкеров-Леви 9 // Соросовская Энциклопедия по естественным наукам. Астрономия. - 2005.
13. Головкин В.А., Пахомов Л.А., Успенский А.Б. Исследование поля уходящего излучения Земли с помощью сканирующего радиометра радиационного баланса на российских спутниках «Метеор» и «Ресурс» // Электронный журнал «Исследовано в России» - 2006.
14. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. - М: ВИНТИ, 1995. - 470 с.
15. Дергачев В.А., Васильев С.С., Распопов О.М., Юнгнер Х. Геомагнитное поле, космические лучи и климат: связь изменений. Репринт. - М.: 9.07.2010.
16. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. - 2009. Т. 8, № 1. - С. 5-35.

17. *Еселевич В.Г.* Физические основы прогнозирования возмущений в околоземной среде по характеристикам Солнца: Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. – Иркутск: 2005.
18. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. - 416 с.
19. *Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М.* Солнечные магнитные облака атакуют Землю // [www.roskosmos.ru](http://www.roskosmos.ru).
20. *Иванов-Холодный Г.С.* Солнечная активность и геофизические процессы // *Земля и Вселенная*. – 2000. №2. - С. 30-36.
21. *Касименко Т.В., Микиша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А.* Взрывы на околоземных орбитах и их связь с солнечной активностью и потоком метеороидов // *Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы*. – М.: Космосинформ, 2000. - С. 247-257.
22. *Касименко Т.В., Шематович В.И.* Современные полуэмпирические модели атмосферы. // *Научные информации Астрономического совета*. – 1990. № 66. – С. 69-85.
23. *Климов С.И., Родин В.Г., Григорян О.Р.* Изучение и контроль «космической погоды» // *Земля и Вселенная*. – 2000. №4. - С. 9-18.
24. *Ковалевский И.В.* Энергетические аспекты солнечно-земных связей. – М.: Наука, 1976. - 52с.
25. *Кокоуров В.Д.* Солнечно-земная физика // [www.nature.ru](http://www.nature.ru). - 10.05.2003.
26. *Кононович Э.В., Мороз В.И.* Общий курс астрономии. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 544с.
27. *Кочаров Г.Е.* Солнечная активность и термоядерная история Солнца за последние миллионы лет // *Соросовский образовательный журнал*. – 2000. №1. - С. 91-95.
28. *Кочаров Г.Е.* Естественные архивы солнечной активности и термоядерной истории Солнца за последние миллионы лет // *Соросовский образовательный журнал*. – 2002.
29. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. — М.: ГЕОС, 2009. — 384 с.
30. *Крымский Г. Ф.* Космические лучи и погода: Лекции БШФФ-2003. – Иркутск: 2003.
31. *Курт В.Г.* Солнце и межзвездная среда // *Соросовский образовательный журнал*. – 1999. №1. - С. 61-66.
32. *Ларин И.К.* Химия и алхимия озонового слоя // *Наука и жизнь*. - 2001. - № 1.
33. *Лосев К.С.* Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. – М.: Космосинформ, 2001. - 400 с.

34. *Мазур И.И., Иванов О.П.* Опасные природные процессы. – М.: Экономика, 2004.- 702 с.
35. *Мартынов Д.Я.* Курс общей астрофизики. - М.: Наука, 1971. - 616 с.
36. *Мелош Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. – М.: Мир, 1994. – 336 с.
37. Модель космоса. Т. 1, 2. Физические условия в космическом пространстве / Под ред. М.И. Панасюка. - М.: КДУ, 2007.
38. *Муртазов А.К.* Экология околоземного космического пространства. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
39. *Муртазов А.К.* Физические основы экологии околоземного пространства. Учебное пособие. – Рязань: РГУ имени С.А. Есенина, 2008. – 272 с.
40. *Наговицын Ю.А.* Глобальная солнечная активность на длительных временах // Астрофизический бюллетень. – 2008. Т. 63, №1. - С. 45–58.
41. *Негода А.А., Сорока С.А.* Акустический канал космического влияния на биосферу Земли // Космічна наука і технологія. – 2001. Т. 7, №5/6. - С. 85-93.
42. *Новиков Л.С.* Основы экологии околоземного космического пространства. Учебное пособие. – М.: МГУ. Университетская книга, 2006. – 84 с.
43. *Новиков Л.С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. Учебное пособие. – М.: МГУ. Университетская книга, 2009. – 104 с.
44. *Обридко В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Храмова Е.Г., Кацова М.М., Лившиц М.А.* Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований // Проблемы эволюции биосферы. Серия «Гео-биологические системы в прошлом». - М.: ПИН РАН, 2013. - С. 66–94.
45. *Обридко В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Храмова Е.Г., Кацова М.М., Лившиц М.А.* Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований // Проблемы эволюции биосферы. Серия «Гео-биологические системы в прошлом». - М.: ПИН РАН, 2013. - С. 66–94.
46. *Ожередов В.А., Бреус Т.К., Гурфинкель Ю.И., Ревич Б.А., Митрофанова Т.А.* Линейное и нелинейное распознавание признаков неблагоприятных метео- и геомагнитных условий в отношении заболеваний инфарктом миокарда и гипертонической болезнью // Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии: Физические подходы и клиническая практика. Вып. 2 / Под ред. Р.Р. Назирова. М.: КДУ, 2010. С. 123-140.
47. Озон в картах и диаграммах. Связь с климатом. - ЮНЕП, 2009.-48 с.
48. *Ораевский В.Н., Кузнецов В.Д.* Солнечно-земная физика и фунда-

- ментальные космические исследования // [www.rosaviakosmos.ru](http://www.rosaviakosmos.ru). – 2002.
49. *Орленок В.В.* Основы геофизики. – Калининград, 2000. - 446 с.
  50. *Панасюк М.И.* Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. – Фрязино: Век-2, 2005. – 272 с.
  51. *Петрукович А., Зеленый Л.* У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь. – 2001. № 10. - С. 57-62.
  52. *Петрукович А.А.* Солнечно-земные связи и космическая погода // Плазменная гелиогеофизика. В 2т. / Под ред. *Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского*. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2008. С. 177-257.
  53. *Пилипенко В.А.* Волновые геомагнитные поля в космосе и на Земле // Современные математические и геологические модели природной среды. - М.: ОИФЗ РАН, 2002. - С. 187–199.
  54. Плазменная гелиогеофизика. В 2т. / Под ред. *Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского*. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2008.
  55. *Прохоров А.М.* (Ред.). Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. - 928 с.
  56. *Пудовкин М.И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Соросовский образовательный журнал. – 1996. № 10. – С. 106-113.
  57. *Пудовкин М.И.* Солнечный ветер // Соросовский образовательный журнал. – 2000.
  58. *Пудовкин М.И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы // Соросовская Энциклопедия по естественным наукам. Астрономия. – 2005.
  59. *Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Эволюция климатов Земли. – М.: МГУ, 1998.
  60. *Старков В.Н.* Экология ближнего космоса (терминология). - Справочное пособие.– СПб: СОЛО, 2009, 120 с.
  61. *Стожков Ю.И.* Космические лучи в атмосфере Земли // Интернет-журнал «Ломоносов». – 2001. Ноябрь. - 4 с.
  62. *Сюняев Р.А.* (Ред.). Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1986. - 783 с.
  63. *Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. – М.: Физматлит, 2005. – 576 с.
  64. Угроза с неба: рок или случайность / Под ред. *А.А. Боярчука*. – М.: Космосинформ, 1999. - 220 с.
  65. *Федоров В.Д., Гильманов Т.Г.* Экология. – М.: МГУ, 1980. - 464 с.
  66. *Хабарова О.В.* Влияние космофизических факторов на биосферу // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. №2. С. 25-39.
  67. *Хабарова О.В.* Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов // Биомедицинские технологии и радио-

электроника. – 2002. №5. - С. 56- 66.

68. Шкловский И.С. Сверхновые звезды. - М.: Наука, 1976. – 440 с.

69. Эбелинг В., Файстель Р. Хаос и космос: синергетика эволюции. – Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 336 с

70. Benitez N., Maiz-Apellaniz J., Canelles M. Evidence for Nearby Supernova Explosions // Physical Review Letters. – 2002. 88-081101.

71. Chapman C.R. Meteoroids, Meteors, and the Near-Earth Object Impact Hazard // Earth, Moon, and Planets. – 2008.V. 102, - pp. 417- 424.

72. Hambaryan V. V., and Neuhauser R. A. Galactic short gamma-ray burst as cause for the 14C peak in AD 774/5 // MNRAS. – 2013, January 20.

73. Murtazov A.K. Ecology and Circumterrestrial Space // Astronomical&Astrophysical Transactions. - 2003. V. 22. – pp. 651-656.

74. Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Koudriavtsev I.V., Eronen M., Jungner H., Lindholm M. On the Relationship between Cosmic Ray Intensity and Terrestrial Climate Over Centennial Time Scale: Workshop «Astrobiology in Russia». - St. Petersburg, 2002. - pp. 217-228.

75. Melott A. et al. «Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?» // International Journal of Astrobiology. – 2004. V. 3 (2) – PP. 55–61.

76. Smith D. S., Scalo J., Wheeler J. C. Importance of Biologically Active Aurora-like Ultraviolet Emission: Stochastic Irradiation of Earth and Mars by Flares and Explosions. - astro-ph/0307543. – 2003. – 21 p.

77. Svensmark H. Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate // Phys. Rev. Lett. - 1998. V. 81, Issue 22. - pp. 5027–5030.

78. Thomas, B. C., et al. Terrestrial Ozone Depletion Due to a Milky Way Gamma-Ray Burst. - astro-ph/0411284. V1. – 10, Nov., 2004.

79. Thomas B. C., et al. Gamma-Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic and Biogeochemical Effects // astro-ph/0505472. – 2005. - 68 p.

80. Usoskin I. G., Solanki S. K., Schuessler Manfred et al. A Millennium Scale Sunspot Number Reconstruction: Evidence For an Unusually Active Sun Since the 1940's // Phys. Rev. Lett. – 2003. V.91 (211101). - 4 p.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ЭКОЛОГИЯ КОСМОСА ТЕМАТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

#### А

**абляция** - разрушение поверхности тела (обычно метеорита) из-за сопротивления среды, возникающее при прохождении тела через земную (или любой другой планеты) атмосферу.

**авторегуляция (в природе)** – система взаимодействий в природе, основанная на прямых и обратных связях и ведущая в соответствии с принципом Ле Шателье к динамическому равновесию или самоорганизации и саморазвитию всей системы.

**аккреция** – (лат. *accretio* – приращение, увеличение). Падение вещества из окружающего пространства на небесное тело.

**активность солнечная** - совокупность нестационарных процессов в атмосфере Солнца: пятна, факелы, вспышки, корональные конденсации, флоккулы и др.

**альбедо** - в общем случае отношение полного потока излучения, отраженного телом во всех направлениях, к полному падающему потоку.

#### **Альвена**

~ **волны** - поперечные волны плотности в плазме, возникающие вследствие смещения магнитных силовых линий вместе с плазмой. Распространяются вдоль магнитных силовых линий. Плотность газа не изменяется. Весь слой колеблется поперек поля как целое.

~ **теорема** – в идеально проводящей жидкости (коэффициент электропроводности равен  $\infty$ ) магнитные силовые линии скреплены с веществом, и при движении жидкости вместе с ней перемещаются и силовые линии магнитного поля, не проскальзывая относительно вещества. Таким образом, например, силовые линии магнитного поля Солнца оказываются «вмороженными» в солнечный ветер.

**аномалия гравитационная** - изменение однородных эквипотенциальных поверхностей гравитационного поля в случае неоднородного распределения масс, создающих это поле.

**антропоцентризм** – воззрение, согласно которому человек является центром Вселенной и целью всех совершающихся в ней событий.

**апогей** - наиболее удаленная от Земли точка орбиты небесного тела, обращающегося вокруг нее.

**артебиосфера** – (лат. *arte* – искусственный). Слой биосферной колонизации в околоземном космическом пространстве, в котором находятся обитаемые космические станции и корабли.

**астеносфера** - слой повышенной текучести, на котором плавают у Земли жесткие литосферные плиты. Расположена на глубинах 70-250 км. В этом слое находятся первичные магматические очаги вулканов и образуются базальтовые магмы.

**астероидов пояс** - область между орбитами Марса и Юпитера от 1.5 до 5.2 а.е., где расположены орбиты большинства астероидов. В главном поясе идентифицировано 30 тысяч малых планет, из них 7 тысяч пронумеровано и у 700 известны орбиты. Основные классы: С-астероиды (альбедо менее 0.05 - углистые); S-астероиды (альбедо до 0.40 - каменные); М-астероиды - металлические. Минералогический состав определен у нескольких сотен астероидов. К 1999 г. получены прямые фотографии (АМС "Galileo") астероидов 951 Гаспра, 253 Ида со спутником Дактиль, Матильда и Эрос (АМС NEAR).

**астероиды** (малые планеты) - небольшие планетоподобные тела неправильной формы, орбиты наибольшего числа которых находятся между орбитами Марса и Юпитера. Известны группы астероидов, движущиеся в лагранжевых точках: (Греки, Троянцы), груп-

пы астероидов (Амура, Аполлона, Атона), тесно сближающихся с Землей (*см. опасность астероидная*), астероиды внешних областей Солнечной системы.

**астроблема** - сильно разрушенный древний ударный кратер.

**астроботаника** - наука, занимающаяся исследованием характеристик земных растений с целью определения возможности существования подобных на других планетах. Основана Г.А. Тиховым, проводившим такие исследования в отношении Марса.

**атмосфера** - газовый слой, окружающий поверхности некоторых планет.

~ **захваченная** - атмосфера планеты, появившаяся при ее образовании в результате аккреции и сохранившаяся в последующем.

~ **Земли** – масса составляет величину порядка  $5.9 \cdot 10^{18}$  кг. Состав: азот – 78.08%, кислород – 20.29%, аргон - -0.93%, водяной пар – 0.2-2.6%, углекислый газ – 0.035.

~ **однородная** - модель атмосферы, плотность и температура которой по всей толщине соответствуют параметрам вблизи поверхности планеты. Масса однородной атмосферы соответствует массе реальной атмосферы, поэтому ее высота используется во многих расчетах.

~ **солнечная** - внешняя газовая оболочка Солнца, включающая в себя фотосферу, хромосферу и корону.

**атмосферики свистящие** - поперечные радиоволны (вистлеры), возникающие при вспышке молнии, и распространяющиеся вдоль земного магнитного поля за пределы ионосферы и обратно.

**афелий** - наиболее удаленная от Солнца точка орбиты небесного тела в Солнечной системе.

## Б

**баланс биосферы энергетический** – алгебраическая сумма поглощаемой и излучаемой энергии в биосфере.

**биоастрономия** - наука, занимающаяся проблемами поиска планет в других звездных системах, исследованием эволюции планет и возможности зарождения на них жизни, поиском органических молекул во Вселенной, примитивной биологической активности, а также организацией поиска сигналов от внеземных цивилизаций и проявления их деятельности на Земле.

**биосфера** – область существования и функционирования всей совокупности живущих ныне организмов. Охватывает нижнюю часть атмосферы до озонового слоя, гидросферу до дна самых глубоких впадин, верхнюю часть литосферы до глубины около 4 км. По В.И. Вернадскому является активной оболочкой Земли, где совокупная деятельность земных организмов и человека проявляется как геохимический фактор планетарного значения. Близка к понятию «географическая оболочка».

**болид** – очень яркий метеор с дымным следом.

**бура геомагнитная** - резкое уменьшение на несколько часов горизонтальной компоненты магнитного поля Земли вследствие попадания в магнитосферу частиц солнечного ветра при солнечных вспышках. В этот период активизируются полярные сияния, наблюдаются нарушения коротковолновой радиосвязи.

## В

**Ван Аллена пояса** – *см. пояса радиационные*.

**весна** – время года, переходный период между зимой и летом. В астрономическом понимании – промежуток времени от момента весеннего равноденствия до летнего солнцестояния.

**ветер солнечный** - поток заряженных частиц, вылетающих радиально из солнечной короны со скоростями порядка 400 км/с вблизи Земли. Вместе с «вмороженным» в него

магнитным полем деформирует магнитосферы планет, формирует газовые хвосты комет.

**вистлер** - поперечная волна, распространяющаяся вдоль внешнего магнитного поля. Частота ее меньше частоты, с которой происходит вращение электрона вокруг магнитной силовой линии. В частности, вистлерами являются свистящие атмосферерики.

#### **воздействие**

~ **антропогенное** – сумма прямых и опосредованных влияний человечества на что-либо.

~ **антропогенное на природу** – прямое осознанное или косвенное и неосознанное воздействие человеческой деятельности, вызывающее изменение природной среды.

~ **глобальное** – воздействие естественных или антропогенных факторов на биосферу Земли в целом.

~ **на климат** – изменение глобальной энергетике Земли вследствие антропогенных воздействий: накопление углекислого газа, изменения плотности озонового слоя, загрязнение атмосферы, прямые выбросы энергии и т.д.

**воздух атмосферный** – эволюционно сложившийся состав нижнего слоя атмосферы.

#### **волны**

~ **акустические** - волны давления в жидких и газообразных средах, распространяющиеся и в веществе звезд.

~ **гравитационные** - согласно общей теории относительности, массивные объекты, испытывающие ускорение или изменение формы, излучают гравитационные волны. В настоящее время их существование экспериментами и наблюдениями не подтверждено.

~ **жизни** – 1.присущие всем видам периодические и непериодические изменения численности популяций 2.по мнению некоторых исследователей, зоны периодического возникновения жизни в Галактике.

~ **звуковые** - продольные колебания плотности атмосферы, улавливаемые человеческим ухом (20 Гц-20 кГц).

~ **ионизационные** - образующиеся как ударные при столкновении облаков нагретого ионизированного газа.

~ **ионно-звуковые** - состоящие из разрежений и сгущений ионов.

~ **магнитогидродинамические** - волны Альвена. Поперечные волны плотности, движущиеся вдоль направления магнитного поля.

~ **плотности** - см. **Альвена волны**.

~ **сейсмические** - возникающие в результате землетрясения при сдвиге литосферных плит. Разделяются на продольные (тип Р), поперечные (S), поверхностные (L). В твердом веществе распространяются Р и S волны, в жидком - только Р волны.

~ **приливные** – волны в земной коре и водной среде, вызванные приливообразующим действием Луны и Солнца

~ **ударные** - образующиеся в результате деформации фронта звуковой волны в среде, когда области с большим сжатием (температурой) догоняют области с меньшим сжатием.

**Вольфа число** - величина, показывающая число солнечных пятен и групп пятен. Является одной из основных характеристик солнечной активности.

**время экологическое эволюционное** – время перехода в новую область локального равновесия в результате неравновесного процесса смены видов (миллионы лет).

#### **вспышка**

~ **солнечная** - выброс вещества с поверхности Солнца со скоростями порядка  $10^3$  км/с и энергиями до  $10^{32}$  эрг.

~ **хромосферная** - см. **вспышка солнечная**.

#### **вспышки**

~ **балл** - характеристика мощности солнечной вспышки в линии водорода  $H_{\alpha}(\lambda=656 \text{ нм})$ . Цифры пропорциональны площади в миллионных долях площади солнечной

полусферы: 1 - от 100 до 250; 2 - от 250 до 600; 3 - от 600 до 1200; 4 - более 1200. Буква после цифры обозначает яркость: F - слабая, N - нормальная, B - яркая.  
~ ~ **рентгеновский** - поток рентгеновского излучения от Солнца во время вспышки в диапазоне 12.5-1 кэВ. Обозначается Mf, если поток равен  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>, и XXf, если он превышает эти значения.

## Г

**гелиобиология** - наука о солнечно-биологических связях, основы которой заложены в начале XX в. А.Л. Чижевским.

**гелиопауза** - зона на расстоянии 50-100 а.е. от Солнца, в которой солнечный ветер сливается с межзвездной средой.

**гелиосфера** - область околосолнечного пространства, в которой плазма солнечного ветра движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью. Возникает из-за взаимодействия солнечного ветра с межзвездной плазмой и межзвездным магнитным полем. Внешней ее границей является гелиопауза.

**геоид** - эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли. В каждой ее точке сила тяжести направлена по нормали к ней, и совпадает со средним уровнем Мирового океана. Отклонение от эллипсоида Красовского  $\approx \pm 100$  м.

**геокорона** - внешняя часть земной атмосферы, водородное гало. Расстояние от поверхности до 15 земных радиусов. При освещении Солнцем излучает в линии  $L_{\alpha}$ .

**геомагнетизм** - 1. магнитное поле Земли 2. раздел геофизики, изучающий распределение в пространстве и изменение во времени магнитного поля Земли, а также связанные с ним процессы на Земле и в магнитосфере.

**геосистема** – природная система, состоящая из взаимообусловленных компонентов, принадлежащих литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере, функционирующая и развивающаяся во времени как единое целое. Является понятием территориально неопределенным, отражающим системные свойства (целостность, взаимосвязь) разнородных элементов.

**геосфера** – концентрические, сплошные или прерывистые оболочки Земли, различающиеся между собой по химическому составу, агрегатному состоянию и физическим свойствам. Выделяют магнитосферу, атмосферу, гидросферу, литосферу, мантию и ядро. Эти основные геосферы иногда подразделяются на геосферы второго порядка или на геосферы, обусловленные их взаимодействием (например, биосферу).

**геофизика** – комплекс наук о Земле, изучающих внутреннее строение, физические свойства и процессы, происходящие в геосферах.

**геоэкология** – практический раздел экологии, наука о взаимодействии геосистем, биосистем и социально-производственных систем. Особое внимание обращает на антропогенные воздействия, разработку рекомендаций по рациональному природопользованию и охране природы.

~ **космическая** – изучение экосистем аппаратурой, установленной на искусственных спутниках Земли.

**гетеросфера** - часть атмосферы, располагающаяся выше гомопаузы (с высот около 120 км для Земли), состав которой определяется диффузией.

**гомеостаз** – (греч. *homoios* – подобный, *stasis* – неподвижность). Состояние подвижного равновесия гео- или экосистемы, поддерживаемое сложными приспособительными реакциями, постоянной функциональной саморегуляцией природных систем в соответствии с принципом Ле Шателье.

**гомопауза** - зона в атмосфере, над которой диффузия начинает преобладать над конвекцией при концентрациях молекул  $\sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Для Земли начинается на высотах около 120 км.

**гомосфера** - область атмосферы, где составляющие перемешаны. Расположена ниже гомопаузы.

#### **граница**

~ **биосферы** – фактическая граница биосферы проходит от 6-7 км над поверхностью Земли до глубинной изотермы 100° на суше и максимальной глубины в 11034 м в океане.

~(ы) **жизни биологические** – область параметров природной среды, внутри которой возможно существование и самовоспроизводство известной нам белковой жизни, которая весьма чувствительна к условиям существования

~ **кислородная** – переходная область между подземными водами, содержащими свободный кислород и водами, лежащими ниже, в которых свободный кислород отсутствует (глубины в несколько сотен, редко тысяча метров).

~ **экосистемы** – переходная полоса, в пределах которой меняется баланс экологических компонентов, а следовательно меняются факторы среды и видовой состав биоты. Эта граница обычно бывает нечеткой в связи с тем, что это понятие не столько морфологическое, сколько функционально-системное.

## Д

**Дальтона минимум** - снижение солнечной активности в период с 1800 г. по 1825 г., когда на Солнце отсутствовали пятна.

**дегазация** - выделение недрами планеты газов, могущих оказывать существенное влияние на процессы в ее атмосфере (например, на состояние озонового слоя в атмосфере Земли).

**день полярный** – промежуток времени, когда Солнце как минимум сутки не заходит за горизонт. Продолжительность полярного дня на полюсах Земли составляет 189 суток.

#### **динамика**

~ **экосистемы сезонная** – одна из форм циклических изменений в биотическом сообществе, связанная со сменой времен (сезонов) года.

~ **экосистемы циклическая** – обратимые изменения экосистем, вызванные постоянными внешними факторами, с постепенным возвратом к практически исходному состоянию.

**диссипация** - явление ускользания газов из атмосфер небесных тел, вызванное тепловым движением молекул. В частности, водород, образующий корону Земли, является продуктом диссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, и дальнейшей диссипации атомов из атмосферы.

**диссоциация** - распад молекулы, радикала, иона на несколько частей. Имеет место в атмосферах молодых звезд, межзвездной среде, атмосферах планет.

**Добсона шкала** – шкала, используемая для оценки общего содержания озона в атмосфере. Единица шкалы соответствует одной тысячной количества озона в вертикальном столбе атмосферы, численно равного толщине слоя и выражающегося в атм\*см.

**дождь метеорный** - метеорный поток весьма большой интенсивности. Один из наиболее интенсивных метеорных потоков - Леониды, встреча с которым давала в 1799, 1833, 1866 и 1966 гг. рекордные числа метеоров.

**дыра озоновая** – обширные области в озоновом слое с заметно (до 50%) пониженным его содержанием. Темпы ее расширения составляют в последнее десятилетие около 4% в год над Антарктикой и несколько меньше в арктических областях. Появление озоновых дыр связывают в основном с техногенной деятельностью.

## Е

### **единица**

~ **астрономическая (а.е.)** - среднее расстояние между Землей и Солнцем. Определяется как величина радиуса невозмущенной круговой орбиты тела пренебрежимо малой массы, обращающегося вокруг Солнца с угловой скоростью относительно звезд  $0,017202098950$  радиан в сутки.  $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м} = 500$  световых секунд.

## Ж

**жизненность** – степень стойкости живых организмов к нарушениям и резким изменениям окружающей среды. Ее критериями служат: интенсивность размножения и выживания потомства, конкурентоспособность при межвидовых и внутривидовых отношениях, оптимальная численность особей, приспособленность к условиям абиотической среды. Весьма важны исследования жизненности при проведении экспериментов на околоземных орбитах и в открытом космосе.

## З

### **загрязнение**

~ **околоземного пространства естественное** – осколки небесных тел (метеороидов, комет), космическая пыль, газ, заполняющие околоземное космическое пространство.

~ **околоземного пространства искусственное** – техногенные отходы: осколки космических аппаратов и ракет-носителей, различных составляющих их конструкций (в том числе ядерных реакторов), отходы топлива, собственной атмосферы ИСЗ на околоземных орбитах. Кроме того, загрязнение околоземного пространства электромагнитными полями (излучениями, в т.ч. радиоактивными) техногенного происхождения.

~ **радиоактивное** – форма физического загрязнения, связанная с попаданием в окружающую среду радиоактивных элементов.

### **закон**

~ **минимума** (Ю. Либиха) – жизненность организма определяется самым слабым звеном в цепи его экологических потребностей.

~ **необратимости эволюции** (Л. Полло) – эволюция необратима: организм (популяция, вид) не может вернуться к состоянию, уже ранее осуществленному в ряду его предков.

~ **сохранения** – в применении к экологии закон сохранения имеет в своей основе биотический круговорот веществ.

~ **толерантности** (В. Шелфолда) – процветание организма ограничено зонами минимума и максимума определенных экологических факторов; между ними располагается зона экологического оптимума. Каждый вид характеризуется способностью переносить отклонения экологических факторов от оптимальных – толерантностью.

~ **(ы) общей экологии** (Б. Коммонера) – 1. все связано со всем 2. все должно куда-то деваться 3. природа знает лучше 4. ничто не дается даром.

~ **постоянства количества живого вещества** – по В.И. Вернадскому количество живого вещества биосферы для данной геологической эпохи постоянно.

~ **преломления космических воздействий** – космические факторы, оказывая воздействие на биосферу, подвергаются изменениям со стороны экосферы планеты.

~ **(ы) экодинамики** (Ю. Голдсмита) – 1. закон сохранения информационной и соматической структуры биосферы 2. закон стремления к климаксу 3. закон экологического порядка 4. закон самоконтроля и саморегуляции живого.

**землеведение космическое** – совокупность исследований Земли из космоса с помощью аэрокосмических методов и визуальных наблюдений.

**Земли фигура** - форма геометрического тела, лучше всего удовлетворяющая форме Земли. Трехосный эллипсоид Красовского:  $a=6378,2$  км,  $b=6356,9$  км,  $f=1/298,3$ ,  $e=0,08$ . Его максимальное отклонение от геоида составляет  $\pm 100$  м.

**Земля** - третья планета Солнечной системы с большой полуосью орбиты около 150 млн. км и периодом обращения 365,26 сут. Ее масса составляет  $5,98 \cdot 10^{24}$  кг, диаметр 12756 км, период осевого вращения 23 час. 56 мин. Окружена плотной атмосферой с плавающими в ней облаками из водяного пара, состоящей на 78,1% из азота, 20,9% кислорода, 0,9% аргона, 0,03% углекислого газа. Поверхность на две трети покрыта водой. Глубины до 11 км, высоты на суше до 9 км. Имеет металлическое ядро, состоящее из расплавленного железа и никеля, возможно с твердым центром. Температура в центре Земли - около  $4000^\circ\text{C}$ . Ядро окружено силикатной мантией. Кора имеет толщину около 10 км под океанами и примерно 30 км там, где расположены континенты. Магнитное поле имеет напряженность 0,31 Гс в зоне магнитного экватора и 0,62 Гс у геомагнитных полюсов. Магнитосфера радиусом  $70 \cdot 10^3$  км с солнечной и  $120 \cdot 10^3$  км с противоположной стороны, состоит, в основном, из электронов. Радиоизлучение Земли в дециметровом диапазоне является одним из мощнейших в Солнечной системе в результате техногенной деятельности человечества. Имеет один естественный спутник - Луну.

**зима ядерная** – резкое длительное общепланетное похолодание, вызванное экранированием солнечного излучения массами пыли и пепла, возникшими в результате ядерной войны или падения астероида.

**зона** – географическая территория, в пределах которой наблюдается однозначность показателей интенсивности какого-либо явления или их совокупности, либо эта интенсивность варьируется в пределах определенного интервала.

~ **авроральная** - область на Земле, в которой наблюдается максимальное количество ночных полярных сияний.

~(ы) **географические** – природные зоны, относительно крупные подразделения географической оболочки, части географических поясов, обладающие общностью термических условий и увлажнения. Образуют одну из высших ступеней физико-географического деления земной поверхности.

## И

### **излучение**

~ **ионизирующее** – поток частиц и жестких квантов электромагнитного излучения, ведущее к ионизации атомов и молекул среды. В дозах, превышающих естественные, наносит вред живым организмам.

~ **солнечных пятен** - интенсивное радиоизлучение в шумовой солнечной буре, обладающее высокой степенью переменности и поляризованное по кругу.

~ **эффективное** – разность между излучением с земной поверхности и встречным излучением атмосферы. Один из элементов радиационного баланса земной поверхности.

**изолинии** – линии на картах, графиках и разрезах, проходящие по точкам с одинаковыми значениями какого-либо количественного показателя, характеризующего изображаемое явление.

**изоповерхности** – поверхности равного значения величин каких-либо характеристик, дающих представление об их пространственном распределении.

**изотропия** – сохранение свойств объекта или процесса независимо от направления (например, изотропное реликтовое излучение).

**импакт** – удар о планету космического тела, который может сопровождаться значительными разрушениями на ее поверхности и резкими изменениями параметров атмосферы и околоземного пространства.

**индекс**

~ **активности солнечной** - числовой параметр, характеризующий количество и мощность активных образований на Солнце.

~ **вспышечный** - индекс активности Солнца, основанный на частоте вспышек.

~ **F10.7** - поток солнечного излучения на волне 10.7 см, выраженный в солнечных единицах потока.

~ **кальциевый** - выражаемый по суммарной площади кальциевых флоккулов, наблюдаемых в линии 393 нм.

~ **(ы) геомагнитные** - параметры амплитуды флуктуаций магнитного поля Земли: локальный 3-часовой *K*-индекс, трехчасовой планетарный *K<sub>p</sub>*-индекс, среднесуточный *A<sub>p</sub>*-индекс.

~ **загрязнения** – термин, включающий понятия объема вещества-загрязнителя (энергии процесса загрязнения) и степени его воздействия на экосистему, соотношенные со временем и интенсивностью процессов.

**инсоляция** - количество энергии Солнца, падающее на единицу площади земной поверхности в единицу времени. Определяет величину солнечной постоянной.

**ионизация (атмосферы)** – процесс образования положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в атмосфере под действием главным образом коротковолнового солнечного излучения. К концу XX в. этот процесс частично определяется техногенным воздействием на атмосферу.

**ионосфера** - ионизированный газ (плазма) в верхней атмосфере Земли. Состоит из слоев: D (H~70 км), E (H~90-120 км), F (выше H~130 км и вплоть до 400-1000 км).

## К

**касп полярный** - воронкообразная структура в геомагнитном поле, через которую вдоль силовых линий возможно проникновение плазмы солнечного ветра в верхнюю атмосферу.

**климат** – (греч. *klimatos* – наклон, имеется в виду наклон земной оси к плоскости эклиптики). Многолетний режим погоды в той или иной местности как результат процессов, непрерывно происходящих в атмосфере и деятельном слое.

**климата изменения** – длительные (свыше 10 лет) направленные, или ритмические изменения климатических условий на Земле в целом или ее крупных регионах.

**коадаптация** – взаимное приспособление в ходе эволюции.

**колебания солнечные** - мощные турбулентные движения возбуждают волновые колебания в атмосфере Солнца: 1) 5-минутные колебания в фотосфере и хромосфере - резонансные колебания верхних слоев конвективной зоны; 2) колебания в солнечных пятнах с периодом около 3 мин.; 3) пульсация Солнца как звезды (А.Б.Северный, В.А.Котов, Т.Т.Цап, 1976) с периодом 2 час. 40 мин. и амплитудой 20 км. Также наблюдаются пульсации Солнца с периодами 20-40 мин. и 5 мин.

**комета** - тело малой плотности, состоящее из газа и пыли (в том числе радикалов CN, C<sub>2</sub>, NH, OH), обращающееся вокруг Солнца по эллиптической орбите (иногда сильно вытянутой). Массы комет в среднем 10<sup>15</sup> кг, время жизни около 100 оборотов вокруг Солнца. Периодические составляют около 4% от всех комет. Всего известно около 100 короткопериодических комет, имеющих периоды от нескольких лет до нескольких десятков лет. Кометы являются одним из источников пыли в Солнечной системе и околоземном пространстве, загрязняя его.

~ **долгопериодическая** - комета с вытянутой орбитой и периодом, большим 200 лет. Источником являются облака Оорта и Хиллса.

~ **искусственная** – облако паров натрия или другого вещества, выпускаемого с космического аппарата для определения его положения и различных научных экспериментов. Первый такой эксперимент проведен АМС «Луна-1» в 1959 г.

~ **короткопериодическая** - комета с периодом обращения в несколько или несколько десятков лет, сопоставимым с периодами обращения планет. Основная масса их перешла на свои орбиты под влиянием приливного действия Юпитера. Есть предположение, что многие из них возникли не дальше 1 а.е. от Юпитера в поясе Койпера.

жидкости или газа в поле тяжести под действием потока теплоты, идущего снизу. Происходит: 1.в тропосфере Земли 2.в океане Земли 3.во внешних слоях Солнца (20-30% его радиуса) 4.в центральных частях массивных звезд.

**конденсации корональные** - области активной короны Солнца, в которых плотность плазмы примерно в три раза больше, чем в окружающих.

#### **координаты**

~ **географические** – определяющие положение объекта на земной поверхности. Долгота отсчитывается от Гринвичского меридиана к востоку, широта – от плоскости земного экватора.

~ **геодезические** - определяемые положением точки на земном эллипсоиде. Геодезическая широта - угол между нормалью к эллипсоиду в этой точке и плоскостью земного экватора. Геодезическая долгота - угол между меридианом места и гринвичским меридианом.

~ **геомагнитные** – широта и долгота, определяющие положение точки на земной поверхности при рассмотрении явления земного магнетизма. Широта – угол между геомагнитным экватором и точкой в плоскости геомагнитного меридиана; долгота – двугранный угол между плоскостью геомагнитного меридиана точки на поверхности Земли и геомагнитного меридиана, проходящего через географический полюс.

~ **геоцентрические** - приведенные к центру Земли. Геоцентрическая широта - угол между земным экватором и направлением из места наблюдения к центру Земли.

~ **топоцентрические** - отнесенные к поверхности Земли.

**Кордылевского облака** - облака естественного космического мусора (межпланетной пыли), располагающиеся в точках либрации  $L_4$ ,  $L_5$  системы Земля-Луна на расстоянии  $60^\circ$  впереди и позади Луны на ее орбите.

**корона солнечная** - внешняя часть атмосферы Солнца, расположенная над хромосферой. Температура порядка  $10^6$  К, плотность около  $10^{-16}$  г/см<sup>3</sup>. Наблюдается во время полных солнечных затмений и при помощи коронографа. Роль проводника тепла из фотосферы в корону берет на себя магнитное поле. Ток, протекающий по магнитным силовым линиям, разогревает корону.

**космос ближний** - включающий в себя верхние слои ионосферы и магнитосферу.

## Л

**лаккомиты** – поднятия на поверхностях планет, возникающие в результате вулканической деятельности последних. На Земле это, например, горы Машук и Бештау на Северном Кавказе.

#### **Ламберта**

~ **закон** - закон рассеяния света идеальной поверхностью, когда во всех направлениях рассеивается одинаковая доля падающего потока.

~ **поверхность** - поверхность, рассеяние света которой удовлетворяет закону Ламберта. Иногда встречается у астрономических тел.

**лед** – вода в твердом состоянии. Известны: аморфный лед и 10 видов его кристаллических модификаций. На Земле имеется в виде атмосферного, подземного и морского льда, ледников, айсбергов, снежного покрова.

~ **межзвездный** - смесь застывших воды, формальдегида и аммиака, осевших на поверхность межзвездных пылинок.

**ливень атмосферный** - резкое усиление потока вторичных космических лучей, порожденных первичными космическими лучами или гамма-излучением.

## лучи

~ **корональные** - яркие и прямые лучи, наблюдающиеся над солнечными пятнами и факелами. В их основании яркость хромосферы возрастает.

~ **космические** - потоки заряженных частиц, попадающих на Землю из Космоса. Протонов 85%,  $\alpha$ -частиц - 1%, электронов и тяжелых ядер - менее 1%. Скорости релятивистские. Космические лучи средней энергии имеют изотропное распределение по небесной сфере. Открыты в 1912г.

~ **солнечные** - потоки заряженных частиц (протонов, альфа-частиц, электронов) с энергиями 1 Мэв-1 Гэв, движущихся от Солнца вдоль его магнитных силовых линий.

## М

### магнетизм

~ **земной** – магнитное поле Земли, существование которого обусловлено действием постоянных источников, расположенных внутри планеты (гидромагнитное динамо), создающих основной компонент поля (99%), а также электрических токов в магнитосфере и ионосфере (~1%). Напряженность убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 55,7 до 33,4 А/м.

~ **солнечный** – магнитные поля на Солнце, упорядочивающие движение солнечной плазмы, обуславливающие солнечные вспышки, существование протуберанцев и т.д. Средняя напряженность магнитного поля в фотосфере 1 Э (79,6 А/м), в области солнечных пятен она может достигать нескольких тысяч Э. Периодические колебания солнечного магнитного поля определяют периодичность его активности. Источник магнитного поля Солнца – сложные движения плазмы в его недрах.

**магнитопауза** - граница между магнитным полем Земли и солнечным ветром на расстоянии 13-17 земных радиусов от планеты с подсолнечной стороны. На ней отклоняется прямой поток солнечных заряженных частиц.

**магнитосфера** - внешняя оболочка ионосферы планеты, образуемая взаимодействием сверхзвукового потока горячей замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитным полем планеты. У Земли простирается на высотах  $10^3$ - $6 \cdot 10^4$  км на солнечной стороне и до  $10^6$  км - на ночной стороне. Мощность диссипации энергии - до  $3 \cdot 10^{11}$  Вт.

**материя межпланетная** - корпускулярное и электромагнитное излучение Солнца, газопылевое облако, в которое погружена Солнечная система.

**мезопауза** - температурный минимум, разделяющий мезосферу и термосферу на высотах 80-90 км.

**мезопик** - температурный пик на высотах 20-25 км, разделяющий стратосферу и мезосферу. Обусловлен поглощением солнечной радиации озоном.

**мезосфера** - область земной атмосферы, расположенная непосредственно над стратосферой с температурой 210-270 К на высотах 20-100 км.

### меридиан

~ **географический** - большой полукруг, проходящий через полюсы Земли и точку на ее поверхности.

~ **главный** - см. нулевой.

~ **магнитный** – проекция силовой линии геомагнитного поля на земную поверхность. Сложные по форме геомагнитные меридианы сходятся в магнитных полюсах.

~ **небесный** - большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и зенит наблюдателя.

~ **нулевой (начальный, Гринвичский)** - проходящий через Гринвичскую обсерваторию и считающийся началом отсчета долгот.

~ **основной** - центральный меридиан часового пояса.

~ **Парижский** - меридиан Парижской обсерватории. В XVII - XVIII вв. считался нулевым.

~ **центральный** – линия север-юг, разделяющая пополам видимый диск планеты или Солнца.

**метеор** - световое явление в атмосфере на высоте 130-80 км, возникающее при попадании и сгорании в ней метеорного тела. Воспринимается как «падающая звезда».

**метеорит** - остаток упавшего на Землю метеорного тела. В среднем в год выпадает около 2000 метеоритов, составляющих вместе с метеоритной пылью массу около 100 т. Метеориты делятся на три больших класса: железные, каменные и железо-каменные.

~ **Анихито** - самый большой из метеоритов, находящихся в музеях мира. Этот железо-каменный метеорит найден Р. Пири в 1897 г. в Гренландии.

~ **Гоба** – самый большой (9 м<sup>3</sup>, 60 т) из железных метеоритов. Найден в Намибии в 1920 г.

~ **«марсианский»** - метеорит ALH 4001, найденный в Антарктиде. Попал на Землю с Марса в результате, как полагают, столкновения Марса с небольшим астероидом. Предположительно, в нем обнаружены окаменевшие остатки органических молекул.

~ **Сихотэ-Алинский** - крупнейший в XX в. 12 февраля 1947 г. в Уссурийскую тайгу упало около 100 т вещества железо-никелевого метеорита, распавшегося на куски. Они образовали более 100 кратеров.

~ **Тунгусский** - метеорит, упавший утром 30.06.1908 г. в районе реки Подкаменная Тунгуска, по поводу природы которого идут споры. Одной из вероятных считается гипотеза о том, что этот метеорит был ледяным ядром кометы, возможно, осколком ядра кометы Энке.

**метеороид** – в общем случае любое метеорное тело в Солнечной системе.

**микrokлимат** – климат приземного слоя воздуха на небольшой территории.

**Миланковича цикл** – период глобальных оледенений (~10<sup>5</sup> лет), связанный с изменением эксцентриситета орбиты Земли.

**миникометы** - рыхлые ледяные тела, покрытые слоем пыли, размерами порядка 10 м, массой около 100 т. При попадании в атмосферу Земли с частотой около 10 в год взрываются, загрязняя ее верхние слои. Энергия взрыва оценивается от нескольких до сотен килотонн.

**Млечный Путь** – 1.светящаяся полоса на небесной сфере, состоящая из неразрешимых глазом звезд и туманностей 2.название нашей Галактики.

**мониторинг** – (лат. *monitor* – надзирающий). Наблюдение и оценка состояния природной среды под влиянием антропогенных воздействий с целью рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Основным принципом мониторинга является его непрерывность.

~ **глобальный** – слежение за общемировыми процессами и явлениями в биосфере Земли и ее экосфере, включая все их экологические компоненты и предупреждение о возникающих экстремальных ситуациях.

~ **околоземного пространства** - наблюдения и контроль естественного и антропогенного загрязнения; выработка методов оценки состояния околоземного пространства как части природной среды; разработка прогноза возможных последствий возрастающей антропогенной нагрузки на околоземное пространство.

**Мохоровичича граница** - резкая сейсмическая граница между корой и мантией Земли, на которой скачкообразно увеличивается скорость сейсмических волн с 6.7-7.6 до 7.9-8.2 м/с.

**мусор космический** – осколки тел естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве. Источниками естественной составляющей являются астероиды, кометы и метеорные потоки, искусственной – обломки космических аппаратов, их ракет-носителей, элементов конструкций, остатки топлива и т.д.Н

## Н

**нагрузка антропогенная** – степень прямого или косвенного воздействия людей и их хозяйственной деятельности на природу в целом или на ее отдельные экологические компоненты и элементы.

**наклонение магнитное** – угол между вектором напряженности геомагнитного поля и горизонтальной плоскостью в рассматриваемой точке земной поверхности.

**нарушение экологическое** – отклонение от обычного состояния экосистемы любого иерархического уровня организации (от биогеоценоза до биосферы). Если оно недостаточно для необратимого разрушения экосистемы, то последняя способна самовосстанавливаться до относительно прежнего состояния в соответствии с принципом Ле Шателье.

**ниша экологическая** – место вида в природе, включающее как его положение в пространстве, так и функциональную роль в сообществе и положение относительно абиотических условий существования. Вся биосферу можно рассматривать как экологическую нишу человека.

**ноосфера** – «сфера разума», высшая стадия развития биосферы, когда разумная человеческая деятельность становится главным определяющим фактором ее устойчивого глобального развития. Учение о ноосфере разработано В.И. Вернадским.

## О

### облако

~ **Оорта** - сферическая область на расстоянии порядка  $2 \cdot 10^4$ - $10^5$  а.е. от Солнца, считающаяся местом рождения комет.

~(а) **серебристые** - облака серебристого цвета на высоте 80-85 км над Землей. Наблюдаются летом на широтах  $50^\circ$ - $75^\circ$  с.ш. и зимой на  $40^\circ$ - $60^\circ$  ю.ш. в период астрономических сумерек, когда Солнце погружено под горизонт на  $6^\circ$ - $18^\circ$ . Природа окончательно не выяснена.

~ **Хиллса** – облако кометных ядер, типа облака Оорта, располагающееся на расстоянии  $10^3$ - $20 \cdot 10^3$  а.е. от Солнца. Имеются предположения, что оно содержит значительно больше кометных ядер (до  $10^{14}$ ), нежели облако Оорта.

### оболочка

~ **биогеоценотическая** – совокупность биогеоценозов поверхности Земли толщиной 200-300 м на суше.

~ **географическая** – природный комплекс, возникший в слое взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы и сформировавшийся под действием солнечной энергии и органической жизни. Включает в себя нижние слои атмосферы, верхние слои литосферы, почти всю гидросферу и всю биосферу.

**овал авроральный** - области в двух полярных зонах над Землей, в которых наблюдаются полярные сияния. Расположены ассиметрично относительно геомагнитных полюсов.

**Одума законы** – 1.организмы могут иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного экологического фактора и узкий в отношении другого 2.организмы с широким диапазоном толерантности в отношении всех экологических факторов наиболее распространены 3.если условия по какому-либо экологическому фактору не оптимальны, то диапазон толерантности может сузиться и в отношении других факторов 4.многие факторы среды могут стать лимитирующими в критические периоды жизни организмов, особенно в период размножения.

**озоносфера** – слой повышенной концентрации озона в земной атмосфере, выполняющий роль защитного экрана от жесткого космического (преимущественно УФ) излучения. Располагается между 7-8 (на полюсах), 17-18 (на экваторе) и 50 км с наибольшей плотностью на высоте 20-22 км над поверхностью Земли.

**океан мировой** – глобальная совокупность всех земных океанов и морей объемом  $1.4 \cdot 10^9$  км<sup>3</sup>. Занимает 70.8% земной поверхности.

**окно**

~ **оптическое** - область в спектре поглощения в земной атмосфере (290-760 нм), через которую видимый свет попадает на поверхность Земли.

~**(а) прозрачности** – интервалы длин волн, в которых излучение не поглощается или поглощается незначительно при прохождении через земную атмосферу. В видимом диапазоне это оптическое окно, в радиодиапазоне 1 мм÷30 м.

**опасность астероидно-кометная** - опасность того, что астероиды и кометы, имеющие вытянутые орбиты с перигелием, близким к Солнцу, могут столкнуться с Землей. Из астероидов к таким принадлежат малые планеты групп Амура, Аполлона, Атона.

**осень** – время года, переходный климатический сезон между летом и зимой. В астрономическом понимании промежуток времени между моментом осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния.

**отходы техногенные в космосе** – совокупность обломков космических аппаратов (космический мусор), остатки топлива ракет-носителей и собственных атмосфер спутников.

**охрана**

~ **биосферы** – система мероприятий по устранению нежелательного антропогенного или стихийного влияния на функционально взаимосвязанные блоки биосферы (атмосферу, гидросферу, почвенный покров, литосферу, сферу органической жизни), по поддержанию выработавшейся эволюционно ее организованности и поддержание нормального функционирования.

~ **природы** – 1.совокупность международных, государственных, региональных и т.д. мероприятий направленных на рациональное использование, воспроизводство и сохранение природных ресурсов Земли 2.комплексная дисциплина, разрабатывающая общие принципы и методы сохранения и восстановления природных ресурсов.

~ **околоземного пространства** - система международных мероприятий (научно-технологических, правовых, экономических, просветительных) по предотвращению попадания в околоземное космическое пространство техногенных загрязнений как в виде различных излучений, так и в виде мусора, изменяющих свойства околоземного пространства таким образом, что его воздействие на биосферу после этого наносит последней необратимый вред.

~ **среды (жизни)** – совокупность мероприятий, направленных на сохранение природы Земли в состоянии, соответствующем эволюционным потребностям современной биосферы и ее живого вещества.

## II

**панспермия** – гипотеза, согласно которой жизнь в виде спор переносится в космосе с одной планеты на другую.

**параллель**

~ **географическая** - малый круг, плоскость которого параллельна плоскости земного экватора.

~ **суточная (небесная)** - малый круг небесной сферы с плоскостью, параллельной плоскости небесного экватора, по которому совершается суточное движение светила.

**Персеиды** – наиболее заметный и известный метеорный поток с радиантом в созвездии Персея. Действует в июле-августе, максимум 12 августа. Связан с кометой Свифта-Туттля.

**петли корональные** - вид корональных конденсаций, наблюдаемый в свете зеленой корональной линии и рентгеновских лучах.

**пиргелиометр** - прибор для измерения в энергетических величинах полного количества солнечной энергии, падающего за определенное время на площадку на поверхности Земли.

**плазма космическая** - плазма в космическом пространстве и космических объектах. Выделяют: плазму ионосферы Земли ( $n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ ); плазму радиационных поясов Земли ( $n \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ ); планет; плазмосферу (см. ниже); плазму солнечного ветра ( $n \sim 1-10 \text{ см}^{-3}$ ); плазму межзвездного и межгалактического пространства ( $n \sim 10^{-3}-10^{-4} \text{ см}^{-3}$ ); плазму в звездах; вырожденную плазму в белых карликах и нейтронных звездах.

**плазмопауза** - область резкого спада концентрации плазмы в магнитосфере планеты.

**плазмосфера** - область на расстоянии от Земли, в 4-5 раз превышающее ее радиус, из силовых линий дипольного магнитного поля и находящейся на них холодной плазмы ионосферного происхождения. Плотность частиц порядка  $10^2 \text{ см}^{-3}$ .

**погода космическая** – состояние околоземного космического пространства, обусловленное активностью Солнца, условиями в солнечном ветре, магнитосфере, ионосфере и термосфере Земли. Это понятие введено в 1994 г. В настоящее время космическая погода определяется и публикуется каждый день различными организациями, такими как ИЗМИРАН в России или NOAA Space Environment Center Boulder (Colorado) в США.

**поле**

~ **геомагнитное** - магнитное поле Земли, которое в первом приближении можно считать имеющим дипольный характер. Смещение северного геомагнитного полюса относительно географического составляет в настоящее время  $11^\circ 5'$  в сторону Тихого океана.

~ **межпланетное магнитное** - унесенное солнечным ветром магнитное поле Солнца. Магнитные силовые линии вследствие вращения Солнца имеют спиралевидную форму. Напряженность обратно пропорциональна расстоянию от Солнца и в районе Земли составляет в среднем  $10^{-5}$  Э. Поле имеет секторное строение, в соседних секторах напряженности поля противоположны. В течение солнечного цикла в пространство выделяются 2-4 (иногда 6) сектора.

**полюсов движение** - движение географических полюсов Земли относительно ее поверхности. Вызвано несовпадением оси симметрии и оси вращения Земли, неоднородностью ее строения и сезонностью метеорологических явлений. Носит периодический характер: с периодом 427-433 сут., связанным с периодом собственных колебаний земного шара и 1 год, связанным с сезонными изменениями, с максимальной амплитудой 0,3 км. Не изменяет небесных координат светил.

**постоянная солнечная** - количество энергии, попадающее на  $1 \text{ см}^2$  поверхности на расстоянии 1 а.е. от Солнца за единицу времени. Составляет  $1.4 \text{ кВт/м}^2$  или приблизительно  $1,95 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$ .

**поток метеорный** – 1. явление множественного падения метеоров в течение нескольких часов из одного радианта. 2. рой метеорных тел, движущихся по одной орбите вокруг Солнца. Обычно состоит из тел низкой плотности и является продуктом распада комет (например, в 1845 г. распалась комета Биелы, по ее орбите движется метеорный поток Андромедиды).

**пояс**

~ **Койпера** - пояс астероидов и кометных ядер за орбитой Нептуна. Пока в нем известно около полусотни объектов размерами в несколько сотен км, а ориентировочно их количество оценивается в  $7 \cdot 10^4$ .

~ **Казимирчак-Полонской** – один из резервуаров кометных тел, расположенный между орбитами планет-гигантов (между Ураном и Нептуном, к примеру, сохранилось до 0,5% пленетезималей).

**пояса радиационные** - зоны магнитосферы планеты, в которых движутся частицы солнечного ветра, захваченные магнитным полем. Земной внутренний радиационный пояс (преимущественно протонный) находится на высоте в среднем 3000 км, внешний электронный – 20000-22000 км в районе экватора. Поскольку магнитная ось Земли наклоне-

на к оси вращения, в районе Бразилии внутренний радиационный пояс спускается к поверхности планеты, образуя Южноатлантическую магнитную аномалию. На Западе носят название земных радиационных поясов Ван Аллена по имени их первооткрывателя. Наиболее мощные радиационные пояса в Солнечной системе у Юпитера и Сатурна.

#### **правило**

~ **десяти процентов** – среднемаксимальный переход с одного трофического уровня экологической пирамиды на другой 10% энергии (или вещества в энергетическом выражении), как правило, не ведет к неблагоприятным для экосистемы (и теряющего энергию трофического уровня) последствиям.

~ **одного процента** – изменение энергетики природной системы в пределах 1% выводит систему из равновесного (квазистационарного) состояния.

#### **прецессия**

~ **геодезическая** - релятивистское прямое движение точек равноденствия по эклиптике со скоростью 1,9" в год.

~ **лунно-солнечная** - явление конусообразного движения оси Земли вокруг оси эклиптики так, что ось Земли всегда остается наклоненной к плоскости эклиптики под углом 66° 33'.

~ **общая** - суммарная лунно-солнечная и планетная прецессия, в результате которой точка весеннего равноденствия движется к западу со скоростью 50",27 в год, и тропический год оказывается на 20 мин. короче звездного. Период общей прецессии 25800 лет.

~ **планетная** - планеты в основном действуют не на положение оси Земли, а на ее орбиту, изменяя положение плоскости эклиптики. Эта прецессия смещает точку весеннего равноденствия к востоку на 0,114" в год.

**приливы и отливы** - явления изменения взаимного расположения масс внутри и на поверхности Земли под действием притяжения, в основном, Луны и Солнца. Наиболее заметны водные приливы и отливы. За солнечные сутки в данной местности происходят два прилива и два отлива. За лунные (24 часа 52 мин.) также два прилива и два отлива. Наибольший прилив во время полнолуний и новолуний, наименьший - во время первой и последней четверти.

#### **принцип**

~ **антропный** - разумная жизнь во Вселенной является необходимым следствием ее фундаментальных свойств.

~ **Гюйгенса** – жизнь есть космическое явление, в чем-то резко отличное от космической материи.

~ **Ле Шателье-Брауна** – изменение любых переменных в системе в ответ на внешние воздействия идет в направлении компенсации этих воздействий (отрицательная обратная связь).

~ **Онсагера** – наиболее вероятен тот тренд эволюции, на котором обеспечивается минимальная диссипация энергии, то есть эволюция всегда направлена на снижение рассеяния энергии и минимальный рост энтропии.

**природопользование рациональное** – система деятельности, призванная обеспечить наиболее эффективный режим воспроизводства и экономной эксплуатации природных ресурсов с учетом перспективных интересов развивающегося хозяйства и здоровья людей. В настоящее время человечество оказалось перед проблемой выработки экономического механизма природопользования, который обеспечил бы выполнение условия  $(\alpha + \beta) * N < P$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - расход природных ресурсов на одного человека для его личных и производственных нужд,  $N$  - численность населения,  $P$  - воспроизводимый объем природных ресурсов.

**прозрачность атмосферы** – способность атмосферы пропускать электромагнитное излучение, зависящая от величины воздушной массы и содержания в воздухе молекул водяного пара и аэрозолей.

### **пространство**

~ **межпланетное** – область космического пространства, состоящая из вещества, движущегося вокруг Солнца под действием его тяготения внутри его плазмы, пронизанная корпускулярным и электромагнитным излучением.

~ **околоземное космическое** - область от слоев нейтральной земной атмосферы (точнее, нижних орбит зоны пилотируемой космонавтики ~ 160-200 км) вплоть до лунной орбиты или, по некоторым представлениям - до границы сферы действия Земли (930 тыс. км) общим объемом порядка  $10^{15}$ – $10^{18}$  км<sup>3</sup>

**противоизлучение** – инфракрасное излучение атмосферы, направленное в сторону поверхности планеты.

**протуберанцы** – (от лат. *protubero* – вздуваюсь). Потоки солнечной плазмы, выбрасываемые с большими скоростями из Солнца. Более плотные и холодные, чем окружающее их вещество короны. Длина несколько сотен тысяч км при ширине не более 10000 км. Возникновение, развитие и движение тесно связаны с эволюцией групп солнечных пятен.

### **процессы**

~ **географические** – процессы формирования, функционирования и развития геосистем. Сопровождаются изменением свойств и состава геосистем, их границ и взаимосвязей. Подразделяются на вещественные, энергетические или информационные, а также процессы взаимодействия природы и общества.

~ **экзогенные** – процессы, происходящие на поверхности Земли, обусловленные, главным образом, энергией солнечного излучения, силой тяжести и жизнедеятельностью организмов.

~ **эндогенные** – процессы, происходящие за счет энергии, выделяемой внутри Земли при магматических, тектонических и метаморфических процессах.

**пыль** – совокупность мелких взвешенных в атмосфере планеты частиц размерами  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  м способных в отличие от дыма оседать при безветрии.

~ **межзвездная** - мелкие твердые силикатные и графитовые частицы в межзвездном пространстве, расположенные вместе с межзвездным газом в плоскости Галактики. Форма несферическая. Внутреннее строение достаточно сложно: тугоплавкое ядро, оболочка из органических соединений, ледяная мантия. Размеры сравнимы с длиной волны излучения в видимой области. Вызывают покраснение проходящего света. Играют важную роль в формировании межзвездных молекул.

~ **межпланетная** – смесь межзвездной пыли с пылью, образованной кометами и остатками метеорной материи.

**пятно солнечное** - область пониженной примерно до 4500К температуры в фотосфере Солнца, концентрирующая силовые линии магнитного поля (до 1000 Гс). Средний диаметр - до 10000 км. Первые упоминания о солнечных пятнах имеются в Китайских хрониках (П в. до н.э.). В Европе с 1610 по 1612 г. их наблюдали Д. Фабриций, Т. Гарриот, Х. Шейнер и Г. Галилей. Только последний понял, что открытие солнечных пятен опровергает устаревшие идеи Аристотеля о том, что небо неизменно ввиду его совершенства.

**пятен солнечных число относительное** - см. **Вольфа число**.

## **Р**

### **равновесие**

~ **природно-антропогенное** – вторичное экологическое равновесие, образующееся на основе баланса измененных в процессе хозяйственной деятельности человека средообразующих компонентов и природных процессов.

~ **экологическое** – баланс естественных или измененных человеком средообразующих компонентов и природных процессов, приводящий к длительному существова-

нию данной экосистемы. Компонентное равновесие основано на балансе экологических компонентов внутри одной экосистемы. Территориальное равновесие возникает при некотором соотношении интенсивно и экстенсивно эксплуатируемых или неэксплуатируемых (заповедники) участков. Оно обеспечивает отсутствие сдвигов в экологическом балансе крупных территорий в целом.

~ **экологическое целесообразное** – природно-антропогенное равновесие, поддерживаемое на уровне, который дает максимальный эколого-социально-экономический эффект в течение условно бесконечного времени. Его индикатором служит способность экосистем достигать в ходе сукцессии узловых сообществ.

#### **радиация**

~ **длинноволновая в атмосфере** – инфракрасное излучение земной поверхности, атмосферы и облаков в диапазоне 4-120 мкм.

~ **коротковолновая в атмосфере** – условное название прямой и рассеянной солнечной радиации в диапазоне 0,17-4 мкм, включая ближнее УФ, видимое и ближнее ИК-излучение.

~ **отраженная** – часть суммарной солнечной радиации, теряемая земной поверхностью в результате отражения.

~ **прямая** – доходящая до пункта наблюдения в виде пучка параллельных лучей, исходящих от Солнца. Меняется в зависимости от высоты Солнца над горизонтом и прозрачности атмосферы. Максимальна на уровне моря при нормальных условиях – 1,10 кВт/м<sup>2</sup>.

~ **рассеянная** – составная часть суммарной солнечной радиации, претерпевшая изменения при прохождении атмосферы. Играет существенную роль в энергетическом балансе Земли, являясь при сплошной облачности единственным источником энергии приземных слоев атмосферы.

~ **солнечная** – совокупность электромагнитного и корпускулярного излучения Солнца.

~ **суммарная** – совокупность прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность.

**радионуклиды** – изотопы элементов, испускающие радиоактивные излучения.

**радиоокно** - диапазон длин радиоволн (1 см-30 м), в котором земная атмосфера прозрачна для радиоизлучения.

**развитие устойчивое** – развитие общества, которое удовлетворяет потребности настоящего времени и не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности.

**размер экосистемы** – пространство, при наличии которого возможно осуществление процессов саморегуляции и самовосстановления совокупности составляющих экосистему средообразующих элементов и компонентов.

**рассеяние** - явление неполного поглощения света средой, когда вторичное излучение выходит из среды под другими углами.

~ **атмосферное** - явление рассеяния света атмосферой планеты, обусловленное как истинным релеевским рассеянием, так и рассеянием на частицах пыли и аэрозолях.

~ **релеевское** - рассеяние света микронеоднородностями атмосферы, обратно пропорциональное четвертой степени длины волны. Обуславливает голубой цвет земной атмосферы.

## **С**

**саморегуляция** – способность экологической системы к восстановлению баланса внутренних свойств после какого-либо природного или антропогенного воздействия. Основана на принципе обратных связей (Ле Шателье).

**связи солнечно-земные** – зависимость геофизических и биологических процессов от состояния солнечной активности: основного 22-летнего и 11-летнего циклов.

**синэкология** – раздел экологии, исследующий взаимоотношения сообществ (биоценозов) со средой обитания.

**сияние полярное** - явление свечения неба в полярных областях Земли, вызванное излучением ионов атмосферы после воздействия на них частиц солнечного ветра (главным образом, после солнечной вспышки) и самих заряженных частиц при ускорении их геомагнитным полем в зонах магнитных полюсов.

**слой**

~ **Голицына** – нижняя часть верхней мантии Земли (Б.Б. Голицын, 1916 г.) на глубинах 400-900 км. Характеризуется резким ростом скоростей сейсмических волн.

~ **озоновый** - слой в земной атмосфере на высотах от 18 до 80 км, в котором повышена концентрация озона  $O_3$  и, соответственно, происходит поглощение ультрафиолетового излучения, его создающего. С конца 80-х гг. XX в. заметно утоньшается в полярных областях в результате, как считается, воздействия фреонов.

~ **пограничный** – слой атмосферы планеты, тепловые и динамические свойства которого определяются воздействием ее поверхности.

~ **приземный** – пограничный слой воздуха земной тропосферы на высотах до 30-50 м от поверхности.

~ **D** - самая нижняя часть ионосферы Земли (около 60 км), ответственная за отражение радиоволн.

**Солнца**

~ **радиоизлучение** – электромагнитное излучение Солнца в диапазоне от миллиметровых до метровых волн, возникающее в области от нижней хромосферы до солнечной короны. Различают тепловое излучение «спокойного» Солнца, излучение активных областей в атмосфере над солнечными пятнами, спорадическое излучение солнечных вспышек.

~ **служба** – всемирная сеть солнечных станций и обсерваторий, осуществляющих непрерывные наблюдения Солнца и его активных образований.

~ **спектр** - непрерывный спектр излучения в оптическом диапазоне близок к спектру абсолютно черного тела с температурой около 5800 К и максимумом излучения вблизи 575 нм. На него наложено более 20 тысяч линий поглощения различных химических элементов.

**Солнце** - ближайшая к Земле звезда, центр нашей планетной системы. Является звездой главной последовательности класса G2V. Диаметр 1 392 000 км, масса  $2 \cdot 10^{30}$  кг, средняя плотность  $1,4 \text{ г/см}^3$ . Внеатмосферная звездная величина в системе  $V = -26,77^m$ . Светимость  $3,9 \cdot 10^{26}$  Дж/с, мощность общего излучения Солнца  $3,74 \cdot 10^{22}$  кВт. Эффективная температура поверхности порядка 5800 К. Солнце расположено на расстоянии 10 000 пк от центра Галактики в 15 пк к северу от ее плоскости. Скорость движения Солнца относительно ближайших звезд направлена в созвездие Геркулеса и составляет 19,5 км/с. Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики около 250 км/с, так что период его обращения составляет величину около 200 млн. лет.

~ **динамическое среднее** - воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по эклиптике и совпадающее с истинным в момент прохождения перигелия.

~ **ложное** – в результате преломления света на кристалликах льда в атмосфере по обе стороны Солнца на расстоянии  $22^\circ$  от него на круглом гало возникают яркие пятна, весьма похожие на настоящее светило. Обычно возникают парами, отсюда название **паргелий**.

~ **спокойное** – Солнце в период минимума активности, когда на нем не наблюдается пятен.

~ **среднее** - воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по экватору. Его прямое восхождение совпадает с прямым восхождением истинного Солнца 4 раза в год.

**социосфера** – часть географической оболочки, входящая в нее наряду со сферой природных ландшафтов; включает в свой состав человеческое общество.

**среда** – 1.природные тела или явления, окружающие рассматриваемую экосистему и взаимодействующие с ней 2.совокупность физических (природных) природно-антропогенных (культурных ландшафтов и населенных мест) и социальных факторов жизни человека.

~ **межпланетная** - вещество и поля, заполняющие Солнечную систему. Основными компонентами являются солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, частицы высокой энергии, пыль и нейтральный газ. Средняя плотность в районе земной орбиты  $10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>.

**стратопауза** - граница стратосферы и мезосферы на высотах около 60 км. После нее температура начинает уменьшаться с высотой.

**стратосфера** - зона атмосферы Земли, расположенная над тропосферой на высотах 15-60 км, характеризующаяся возрастанием температуры с высотой.

**структура секторная** - явление в закрученных в архимедову спираль линиях межпланетного магнитного поля, состоящее в наличии в нем разнополярных секторов, разделенных токовым слоем. Токовый слой имеет волнообразную поверхность. При вращении Солнца Земля несколько дней находится то выше, то ниже токового слоя и попадает в межпланетное магнитное поле, направленное то к Солнцу, то от него.

## Т

**тектит** - небольшое тело метеорного происхождения с аморфной стеклообразной структурой. По одной из гипотез, образовались при ударе крупного метеора или астероида о земную поверхность с выделением большого количества теплоты.

**тектоносфера** - обобщающее название наружной оболочки Земли, включающее литосферу и астеносферу.

**тело**

~ **метеорное** - частица, обращающаяся вокруг Солнца.

~ **родительское** – астероид, комета или другое тело, фрагментом которого является метеорное тело.

**термопауза** - верхняя граница термосферы (около 300 км для Земли), на которой прекращается рост температуры.

**термосфера** - слой атмосферы планеты, располагающийся выше мезопаузы, в котором происходит рост температуры с высотой.

**техносфера** – часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком.

**транзитность** – прохождение вещества, энергии и информации через какую-либо систему без существенного накопления в ней (но с использованием части потока в системообразующих целях). Околосферное пространство транзитно по отношению к проходящей через него энергии, однако, эта энергия служит основой функционирования биосферы.

**тропопауза** - верхняя граница тропосферы (около 15 км), где градиент температуры равен нулю.

**тропосфера** - самый нижний (до 15 км) и плотный слой атмосферы Земли. Температура падает с высотой от 290 К до 240 К.

**турбопауза** - граница (110-120 км) турбулентной атмосферы (перемешивание обеспечивает постоянство молекулярной массы атмосферы) и слоев, где нейтральные молекулы и атомы распределяются независимо в соответствии с барометрической формулой.

## У

**удар звуковой** – звуковая ударная волна, возникающая при превышении летящим телом скорости звука в атмосфере.

**восстановление окружающей среды** – переход окружающей среды на более высокий энергетический уровень в результате автохтонного развития или деятельности человека.

**ущерб экологический** – эколого-социально-экономически значимое искусственное изменение среды в пределах обусловленного времени.

## Ф

**факелы** – 1.яркие области в фотосфере Солнца, наблюдаемые вблизи его лимба 2.яркие пятна на поверхностях планет и их спутников.

**ФАР** – фотосинтетическая активность радиации Солнца.

**фитосфера** – поверхностный слой над Землей (до 150 м), где условия среды в значительной мере определяются зеленой растительностью.

**флоккулы** – 1.волоконистые образования в хромосферном слое вокруг центров активности - пятен. Наблюдаются только в свете фраунгоферовых линий в проекции на диск Солнца 2.яркие эмиссионные области в хромосфере Солнца, расположенные над факелами хромосферы.

**фон излучения естественный** – суммарный природный поток ионизирующего излучения космического происхождения и за счет земных радиоактивных элементов в окружающей среде. В период до начала ядерных испытаний составлял 0,05 Рентген/год.

**фотосинтез** – синтез органических веществ продуцентами с помощью световой энергии.

**фотосфера** - внешняя область звезды, спектр которой является спектром непрерывного излучения черного тела. Визуально воспринимается как поверхность звезды.

## Х

### хвост

~ **кометный** - хвост кометы, направленный из головы кометы от Солнца. Его длина достигает в некоторых случаях  $10^7$  км, средняя плотность  $10^{-18}$  г/см<sup>3</sup>. Классификация кометных хвостов по форме впервые разработана Ф. Бредихиным.

~ **ионный** - хвост кометы (называемый еще газовым или плазменным), состоящий из ионизированных атомов и молекул, которые излучают в результате резонансной флуоресценции. Под действием ветра и магнитного поля уносится от кометы, имея почти прямолинейную форму.

~ **магнитный** – часть магнитосферы планеты с ее ночной стороны вытягивается под действием солнечного ветра в длинный хвост. У Земли его длина составляет величину до 1000 ее радиусов.

~ **пылевой** – хвост кометы, состоящий из возгоняемых из ядра пылевых частиц диаметром около микрона. Длина до  $10^6$  км. Под влиянием светового давления отклоняется в сторону, противоположную Солнцу, но не имеет такой прямолинейной формы, как газовый.

**Хевисайда слой** - устаревшее название слоя E в земной ионосфере на высоте около 150 км, где градиент температуры меняет знак и начинает расти.

**Хейла цикл** – см. **цикл солнечный магнитный**.

**хионосфера** – слой атмосферы, в котором создается постоянный положительный баланс твердых осадков. Его нижняя граница при пересечении с горными вершинами образует снеговую линию.

**Хирон** - астероид с орбитой между орбитами Сатурна и Урана, открытый в 1977 г. как первый объект пояса Койпера. Имеется предположение, что эти объекты частично являются замерзшими ядрами комет. В частности, Хирон имеет аномально большое (до 200 км), рыхлое ядро.

**хромосфера** - часть солнечной атмосферы между фотосферой и короной: нижняя до высоты 4000 км с температурой около 7500 К из нейтрального водорода, верхняя - до 12000 км с температурой около  $10^6$  К и состоящая из ионизированного водорода. Спектр хромосферы является эмиссионным.

## Ц

### цикл

~ **солнечный** - 11-летняя периодичность солнечной активности. Его нарушения (полное отсутствие пятен) случались за эпоху телескопических наблюдений три раза. Последний - с 1900 г. по 1920 г.

~ **солнечный магнитный** - основной период колебаний магнитного поля Солнца, равный удвоенному циклу числа солнечных пятен ~ 22 года, поскольку пятна реагируют только на напряженность, а не знак магнитного поля.

### циркуляция атмосферы

~ **общая** - перемешивание слоев атмосферы, обусловленное различным их нагревом солнечным излучением.

~ **локальная** - перенос воздушных масс над сравнительно небольшой территорией или акваторией размером от сотен м до десятков км.

**цунами** – гигантские волны на поверхности океана, возникающих в результате подводных извержений вулканов, землетрясений, падений крупных астероидов. Могут приводить к глобальным бедствиям катастрофического характера.

## Ч

**Чандлера период** - период колебания полюсов мира, около 430 суток. Колебания вызваны сезонными изменениями в распределении масс и движением вещества в недрах Земли. Ось вращения Земли ориентации в пространстве не меняет.

## Ш

**шапка полярная** – зона, расположенная вокруг полюсов планеты. Земля и Марс имеют полярные шапки, состоящие из льда и инея и подверженные сезонным изменениям.

### широты

~ **служба** – сеть обсерваторий (более 40 по всему миру), осуществляющих измерения географической широты, происходящие вследствие движения полюсов. Руководство осуществляется Международной службой движения полюсов.

### шкала

~ **Добсона** – см. **Добсона шкала**

~ **оценочная** – ряд непрерывно усиливающихся или ослабляющихся групп (баллов), с целью придания процессу или явлению количественной оценки (например, шкала Бофорта для скорости ветра, Рихтера для землетрясений, Добсона для плотности озонового слоя и т.д.).

~ **палермская** – определяет количественно уровень значимости возможности потенциального столкновения с Землей космического тела.

~ **туринская** – десятибалльная качественная шкала космической опасности со стороны астероидов и комет для Земли, принятая в Турине в 1999 г.

### **Шперера**

~ **закон** - зоны пятнообразования на Солнце в течение цикла активности смещаются к экватору.

~ **минимум** - снижение солнечной активности в период 1400-1510 гг.

## **Э**

**эволюция экосистемы (биогеоценоза)** – процесс непрерывного, одновременного и взаимосвязанного изменения видов и их взаимоотношений, внедрения новых видов в экосистему и выпадения из нее некоторых видов, ранее в нее входивших, совокупного воздействия на абиотические экологические компоненты и обратного влияния этих измененных компонентов на живые составляющие экосистемы.

### **экватор**

~ **геомагнитный** – большой круг на поверхности Земли, плоскость которого перпендикулярна геомагнитной оси.

~ **небесный** - большой круг небесной сферы, по которому ее пересекает плоскость земного экватора.

~ **планеты** – условная линия разреза планеты на две равные полусферы.

~ **тепловой** – линия, соединяющая точки с наиболее высокими у земной поверхности средними температурами воздуха.

~ **эклиптический** – большой круг небесной сферы, проходящий по эклиптике, являющийся отражением годичного движения Земли вокруг Солнца.

**экзобиология** – комплекс наук об организмах, живущих вне Земли.

**экзосфера** - внешняя часть верхней атмосферы, где для атомов высока вероятность покидания планеты. Самая наружная часть экзосферы Земли - геокорона - состоит из несударяющихся атомов водорода и простирается до  $10^5$  км.

**экология** – (греч. *oikos* – дом, жилище, местопребывание, + *logos* – слово, учение). Наука о взаимоотношении организмов и образуемых ими сообществ с абиотическими и биотическими экологическими факторами.

~ **глобальная** – изучает воздействие различных факторов на биосферу Земли в целом, в частности взаимодействие биосферы Земли и околоземного космического пространства, которое является для нее окружающей средой.

~ **инженерная** – часть промышленной экологии, связанная с разработкой и применением технологических методов регулирования воздействия на окружающую среду.

~ **космическая** – изучает малые пространственно замкнутые системы длительного поддержания жизнедеятельности человека в космических аппаратах.

~ **космоса** – подразумевает у большинства авторов прежде всего изучение антропогенных воздействий на космическое пространство.

~ **физическая** – исследующая взаимосвязь биосферы с окружающей ее средой методами физических наук.

**экосистема** – 1. комплекс, в котором между биотическими и абиотическими компонентами происходит обмен веществом, энергией, информацией. Является безразмерным понятием. В данных терминах глобальной системой является биосфера 2. информационно саморазвивающаяся, термодинамически открытая совокупность вещества и энергии, единство и функциональная связь которых в пределах характерного для определенного участка биосферы времени и пространства обеспечивают превышение на этом участке внутренних закономерных перемещений вещества, энергии и информации над внешним обменом и на основе этого неопределенно долгую саморегуля-

цию и развитие целого под управляющим воздействием биотических и биогенных составляющих.

**экосфера** – совокупность абиотических объектов и характеристик Земли, создающая на ней условия для возникновения жизни. Пространственно включает в себя тропосферу, всю гидросферу, верхнюю часть литосферы, свойства которых обусловлены остальными сферами планеты (включая ядро), а также солнечными и космическими факторами.

**экран озоновый** – см. **озоносфера**.

**экстинкция** - ослабление света при его прохождении через какую-либо среду.

~ **атмосферная** - эффект поглощения и рассеяния света земной атмосферой. Возрастает от зенита к горизонту и вызывает покраснение небесных светил.

**энергетика**

~ **биосферы** – тепловой, энергетический баланс между биосферой и космическим пространством, энергетические процессы в экосистемах, антиэнтропийные процессы (направленные на упорядоченность потоков энергии) в живом веществе и энергетика отдельных живых организмов.

~ **космическая** – перспективное получение солнечной энергии на искусственных спутниках Земли с узконаправленной ее передачей на земные приемники.

~ **экологическая** – основанная на биологических источниках энергии.

**энергия**

~ **солнечная** – электромагнитная и корпускулярная энергия, приходящая от Солнца и падающая на поверхность Земли. Величина ее определяется **постоянной солнечной**.

~ **«чистая»** - любой вид энергии, получение и использование которого не приводит к химическому и радиоактивному загрязнению окружающей среды. Такой является солнечная энергия.

**энергосистема** – совокупность энергетических ресурсов всех видов, методов их получения, преобразования, распределения и использования.

**Эпплтона слои** - два слоя земной атмосферы на высоте 200 км ( $F_1$ ) и 300 км ( $F_2$ ).

**этика экологическая** – имеет предметом ценностные, этические проблемы взаимоотношения человека и природы. В частности, весьма актуальными являются в настоящее время этические проблемы освоения космоса.

**эффект-парниковый** - эффект поглощения инфракрасного излучения водяными парами и молекулами углекислого газа, за счет которого поднимается температура атмосферы (на 40 К в земной атмосфере и на 300 К в атмосфере Венеры).

## Я

**ядро** - центральная часть какого-либо образования.

~ **земное** - центральная часть Земли радиусом около 3400 км со средней плотностью порядка  $10 \text{ г/см}^3$ , состоящая из расплавленного железа с примесью легких элементов.

~ **кометное** - звездообразное тело в голове кометы, состоящее из замороженных газов и пыли.