

Министерство образования Российской Федерации

—  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

А. В. БЛИНОВ

# ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Часть 1

Учебное пособие

Издательство СПбГПУ  
2003

Санкт-Петербург

УДК 574 (075.8)

*Блинов А.В.* Глобальная экология: Учеб. пособие / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. Ч. 1. 87 с.

Пособие соответствует государственному стандарту дисциплины ЕН.Ф.07 «Экология» направления бакалаврской подготовки 553100 «Техническая физика».

Рассмотрены разделы дисциплины, связанные с физическим описанием Земли как глобальной экологической системы. Главное внимание уделено происхождению и эволюции окружающей среды.

Предназначено для студентов, обучающихся на бакалаврском уровне по направлению «Техническая физика», а также для студентов и аспирантов, изучающих другие физические специальности.

Табл. 16. Ил. 23. Библиогр.: 16 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского политехнического университета.

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2003

## Оглавление

Введение .....	5
1. Эволюция природной среды .....	8
1.1. Происхождение химических элементов .....	8
1.2. Формирование состава планет Солнечной системы .....	10
1.3. Формирование состава Земли .....	14
1.4. Состав природной среды .....	16
1.4.1. Атмосфера .....	16
1.4.2. Гидросфера и гляциосфера .....	17
1.4.3. Кора .....	17
1.5. Эволюция окружающей среды .....	18
1.5.1. Атмосфера .....	19
1.5.2. Современный состав атмосферы Земли и его связь с органической эволюцией .....	21
1.5.3. Круговорот углерода и кислорода .....	24
1.6. Энергия в окружающей среде .....	28
1.6.1. Солнечная радиация как основной источник энергии окружающей среды .....	28
1.6.2. Прохождение солнечного излучения через атмосферу .....	30
1.6.3. Глобальный энергетический баланс .....	31
1.6.4. CO <sub>2</sub> термостат .....	35
1.6.5. Вариации солнечной постоянной .....	36
1.6.6. Поток внутреннего тепла через поверхность Земли .....	38
1.6.7. Энергия и человеческая цивилизация .....	39
2. Ядерная геофизика и геохронология .....	42
2.1. Основы дозиметрии .....	44
2.2. Радиоактивность в окружающей среде .....	47
2.2.1. Долгоживущие первичные нуклиды .....	48
2.2.2. Космические лучи и космогенная радиоактивность .....	48
2.2.3. Природная радиоактивность атмосферы .....	50
2.2.4. Перенос радона в атмосфере .....	50

2.2.5. Природный ядерный реактор в Окло (Габон) .....	55
2.3. Искусственная радиоактивность .....	58
2.3.1. Испытание и производство ядерного оружия .....	59
2.3.2. Атомная энергетика .....	62
2.3.3. Против радиофобии .....	67
2.4. Методы датирования, основанные на радиоактивности .....	69
2.4.1. Определение возраста нуклеосинтеза .....	69
2.4.2. Рубидий-стронциевый метод .....	71
2.4.3. Уран – свинцовый метод .....	72
2.4.4. Калий – аргоновый метод .....	73
2.4.5. Неравновесные методы (на примере иониевого) .....	75
2.4.6. Радиоуглеродный метод .....	77
2.4.7. Трековый метод .....	78
2.4.8. Геохронология .....	79
<i>Приложение.</i> Геохронологическая шкала .....	81
Словарь терминов .....	84
Библиографический список .....	87

## Введение.

**Экология** (от греч. ойкос – дом, логос – знание) – это термин, введенный в 1866 г. немецким естествоиспытателем Эрнстом Геккелем. В классическом понимании экология определяет науку, изучающую взаимодействие надорганизменных (популяция, сообщество и т.д.) биологических систем с *природной средой*. Идеи космизма в науку об *окружающей среде* привнесены трудами выдающегося русского ученого В.И. Вернадского (1863–1945), разработавшего учение о *биосфере* как о «планетном явлении космического характера». Этот подход расширил возможное понимание *экосистемы*, т.е. природного комплекса, образованного живыми организмами и средой их обитания, до планетарного масштаба. В учебном пособии рассмотрены явления, воздействующие на всю планету Земля, т.е. экологии глобальной. Общественное признание, как раздел современных естественных наук, имеющий важнейшее прикладное и политическое значение, глобальная экология получила после создания в 1968 г. Римского клуба. Важный поворотный момент для общественного сознания – 1972 г., выход в свет книги Д. Медоуза (Dennis Meadows) с соавторами “Пределы роста” и начало финансирования в США министерством энергетики научной программы «Global Change» («Глобальные сдвиги»). Начальный пафос экологических взглядов хорошо выразили четыре закона экологии, сформулированные американским биологом Б. Коммонером (Barry Commoner, 1971) и отразившие новый подход к пониманию процессов в окружающей среде:

1. Все связано со всем.
2. Все должно куда-то деваться.
3. Природа знает лучше.
4. Ничто не дается даром.

Дальнейшее развитие и специализация исследований позволили к настоящему времени перейти от языка эмоций и образов к языку научных законов и математических моделей.

По применяемым методам экологические исследования принято подразделять на физические, химические, биологические и математические (математическое моделирование). Существуют и пограничные подразделы, например химико-физическая экология, физико-химическая экология и т.д. В пособии автор, не пытаясь объять необъятное, ограничился по возможности физическими и в значительной мере – ядерно-физическими и изотопными методами в приложении к исследованиям окружающей среды. Именно это направление особенно бурно развивается в последние десятилетия, но, к сожалению, недостаточно отражено в научной литературе на русском языке. В соответствии с принятой классификацией любое изменение существующего равновесия в среде обитания, неважно, под влиянием какой причины оно произошло, должно входить в компетенцию экологии. Естественно причислить к экологическим факторам и те изменения, которые, будучи существенными для живых организмов, так или иначе зависят от космических причин. Эти глобальные факторы, ставшие в ряде случаев источником слишком вольных фантазий, будут анализироваться на основании современного багажа научных знаний.

Пособие написано на основе лекционного курса, который автор читает для студентов физико-технического факультета СПбГПУ. Его структура включает следующие основные разделы:

Часть 1 (настоящее издание):

- Эволюция природной среды.
- Ядерная геофизика и геохронология.

Часть 2 (планируется в 2003 г.):

- Восстановление физических условий окружающей среды прошлого.
- Антропогенные факторы изменения природной среды.
- Нелинейная динамика в геофизических процессах.

Наряду с последовательным изложением материала в тексте будут встречаться отступления справочного характера, а также полезные численные оценки, выделенные в отдельные абзацы. Постарайтесь не оставлять их без внимания. Все выделенные курсивом термины снабжены определениями, собранными в краткий словарь в конце пособия.

К сожалению, на русском языке нет современного учебника или книги, которую можно порекомендовать в качестве всеобъемлющего пособия для

изучающих эту область знаний. Приведем несколько монографий, доступных читателям научных библиотек.

Основная литература

Б у д ы к о М.И. Глобальная экология. М.: Мысль, 1977.

О з и м а М. Глобальная эволюция Земли. М.: Мир, 1990.

Дополнительная литература

К и с е л е в В.Н. Основы экологии. Минск: Университет, 2000.

Парниковый эффект, изменения климата и экосистемы/ Под ред. Б. Болина. М.: Мир, 1989.

Из многочисленных англоязычных книг назовем одну базовую, хотя наш выбор достаточно субъективен. Это учебник Т.Е. Graedel, Р. Crutzen “Atmospheric Change. An Earth System Perspective”. (New York: W.H. Freeman and C<sup>o</sup>, 1992). Хотя, с точки зрения студента старшего курса технического университета, она может показаться недостаточной в теоретическом отношении, это легко может быть восполнено самостоятельной работой. Для любознательных читателей в конце книги представлен расширенный список дополнительной литературы по главам.

В заключение, поясним разнообразие используемых в тексте единиц размерности. Это «больной» вопрос для пограничных областей знаний. Хотелось бы, с учетом строгих метрологических требований, ограничиться системой СИ, однако физики, особенно теоретики, по-прежнему предпочитают работать в СГС, и было бы даже вредно привычные для учащихся константы переводить в непривычные единицы. Кроме этого, в нескольких параграфах будут использованы абсолютно внесистемные единицы, которые, на взгляд автора, наиболее наглядно отражают масштабы обсуждаемых величин или процессов. Если кому-то будет удобнее перевести все величины, например, в СИ, прошу воспринять необходимые вычисления как легкое арифметическое упражнение.

## 1. Эволюция природной среды

Рассмотрим процессы, приведшие к формированию природной среды в том виде, в котором ее «получила» человеческая цивилизация.

### 1.1. Происхождение химических элементов

Планета Земля, и в частности ее поверхность, которую охватывает биосфера, ни в коей мере не является типичной для Вселенной областью «природной среды». Откуда взялась эта аномалия? Начнем рассуждения с хронологической схемы событий (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Космогоническая хронология окружающей среды

В однородной модели расширяющейся Вселенной продолжительность фазы расширения, т.е. возраст Вселенной от момента Большого взрыва,

$$t = |t_0 - t_\infty| = \frac{1}{H_0} f(\Omega), \quad (1.1)$$

где индекс 0 – современное значение;  $H_0$  – постоянная Хаббла,

$$\Omega = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{крит}}}, \quad \rho_{\text{крит}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G},$$



$\rho_0$  и  $\rho_{\text{крит}}$  – соответственно современная и критическая плотности вещества во Вселенной;  $G$  – гравитационная постоянная ( $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ ).

Вид функции  $f(\Omega)$  зависит от конкретных деталей используемой модели, однако известно, что  $f(\Omega) \leq 1$ , а для  $\rho_0 \approx \rho_{\text{крит}}$  справедливо  $f(\Omega) \approx 2/3$ . Современное значение постоянной Хаббла, по последним экспериментальным данным, лежит в интервале  $(60-70) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$  (Мпк – сокращенное обозначение единицы длины мегапарсек, т.е.  $10^6 \cdot 3,09 \cdot 10^{18} \text{ см} \approx 3 \cdot 10^{24} \text{ см}$ ). При современном значении постоянной Хаббла критическая плотность вещества приблизительно равна  $10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Итак, если исходить из теории Большого Взрыва, то в один прекрасный момент в течение примерно 100 секунд в результате рождения *адронов* и их синтеза образовались изотопы водорода и гелия с массовым отношением  $\text{He}/(\text{H} + \text{He}) \sim 28 \%$ , а также небольшое количество изотопа лития  ${}^6\text{Li}$ . Синтез более тяжелых элементов на этой стадии блокировался отсутствием в природе стабильного нуклида с массовым числом  $A$ , равным 5. Из (1.1) следует, что возраст нашей Вселенной не превышает **15 млрд. лет**. Это вывод, опирающийся на совокупность современных астрофизических представлений и экспериментальных данных.

В течение интервала времени не более **10 млрд. лет**, последовавшего за первичным нуклеосинтезом, вначале происходило звездообразование, а затем в недрах звезд первого поколения в результате термоядерного синтеза образовывались и накапливались элементы до Fe (заряд ядра  $Z = 26$ ). Часть этого вещества сбрасывалась угасающими звездами в межзвездное пространство. Образование ядер тяжелее железа затруднено двумя обстоятельствами. Во-первых, в этих реакциях не выделяется энергия, которая могла бы сделать их самоподдерживающимися; напротив, они сами потребляют энергию. Во-вторых, в таких ядрах настолько много протонов, что им трудно преодолеть кулоновский барьер, не разрушив друг друга. Поэтому синтез элементов от меди до урана возможен только путем добавления нейтронов (и энергии) к железу. При медленном относительно возможного радиоактивного распада последовательном захвате нейтронов в так называемом *s*-процессе (от англ. slow – медленный) образование элементов доходило до последнего из известных стабильных изотопов висмута –  ${}^{209}\text{Bi}$  ( $Z = 83$ ). Подходящие условия для *s*-процесса появлялись на поздних стадиях жизни звезд. Эволюция наиболее массивных звезд приводила к вспышкам сверхновых, которые

кратковременно генерируют огромные потоки нейтронов. На этой взрывной фазе создавались условия для звездного нуклеосинтеза в *r*- процессе (от англ. rapid – быстрый) захвата нейтронов. За секунды исходное ядро успевало, избежав распада, захватить несколько нейтронов, и таким образом в *r*-процессе создавалось многообразие нейтронизбыточных ядер вплоть до трансурановых элементов. Оставались еще богатые протонами элементы с большим *Z*, такие как  $^{111}\text{Sn}$ . Их наблюдаемое содержание предположительно обеспечивалось протонным захватом.

Все продукты ядерного синтеза в звездах, смешиваясь с исходным межзвездным веществом, обеспечивали и обеспечивают строительный материал для звезд последующих поколений. Кроме того, несколько известных на Земле изотопов легких элементов, таких как  $^7\text{Li}$ ,  $^8\text{Be}$  и  $^{10}\text{B}$ , являются продуктами ядерных реакций *космических лучей* в межзвездной среде.

Предполагаемые области звездообразования – это газопылевые туманности, переходящие из-за внешних или внутренних причин в стадию гравитационной неустойчивости. Фрагментация и сжатие разреженного вещества приводит к образованию компактных объектов – протозвезд. Материальный результат последующей звездной эволюции – это выброс в межзвездную среду вещества в газопылевой форме, характеризующегося тем разнообразием химических элементов, которое считается среднегалактическим. Итак, запомним, что потребовалось около десяти миллиардов лет, чтобы изменить исходный состав вещества Вселенной до разнообразия строительного материала Солнечной системы.

## **1.2. Формирование состава планет Солнечной системы**

Фундаментальным предположением планетной космогонии является существование на начальной стадии хорошо перемешанного, однородного по составу газопылевого облака, из которого развивались все наблюдаемые в Солнечной системе объекты. Для этого состава используется термин «primordial» («первичный»). В рамках такого подхода мы можем предполагать лишь четыре механизма возникновения наблюдаемых впоследствии в телах Солнечной системы *изотопных вариаций*:

- 1) изотопное фракционирование;
- 2) распад радиоактивных изотопов;

- 3) ядерные реакции;
- 4) первичные статистические неоднородности.

Одним из экспериментальных подтверждений высокой степени перемешивания первичного вещества на стадии туманности является близость значений изотопного отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в доступных для измерения объектах Солнечной системы (рис. 1.2). Здесь  $\delta^{18}\text{O}$  – относительное отклонение изотопного отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в образце от значения, признанного стандартным; измеряется в промилле (‰), т.е. в тысячных долях. Земные породы: ультраосновные ( $\text{SiO}_2 < 45\%$ ) породы, базальты – эффузивные, т.е. застывавшие на поверхности основные ( $\text{SiO}_2 \sim 50\%$ ) породы. Межпланетные породы: ахондриты – бесструктурные каменные метеориты, хондриты – структурированные метеориты, предположительно – остатки исходного протопланетного вещества. В качестве стандартного отношения использовано значение для океанической воды ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )<sub>smow</sub> (SMOW – аббревиатура Standard Mean Ocean Water).

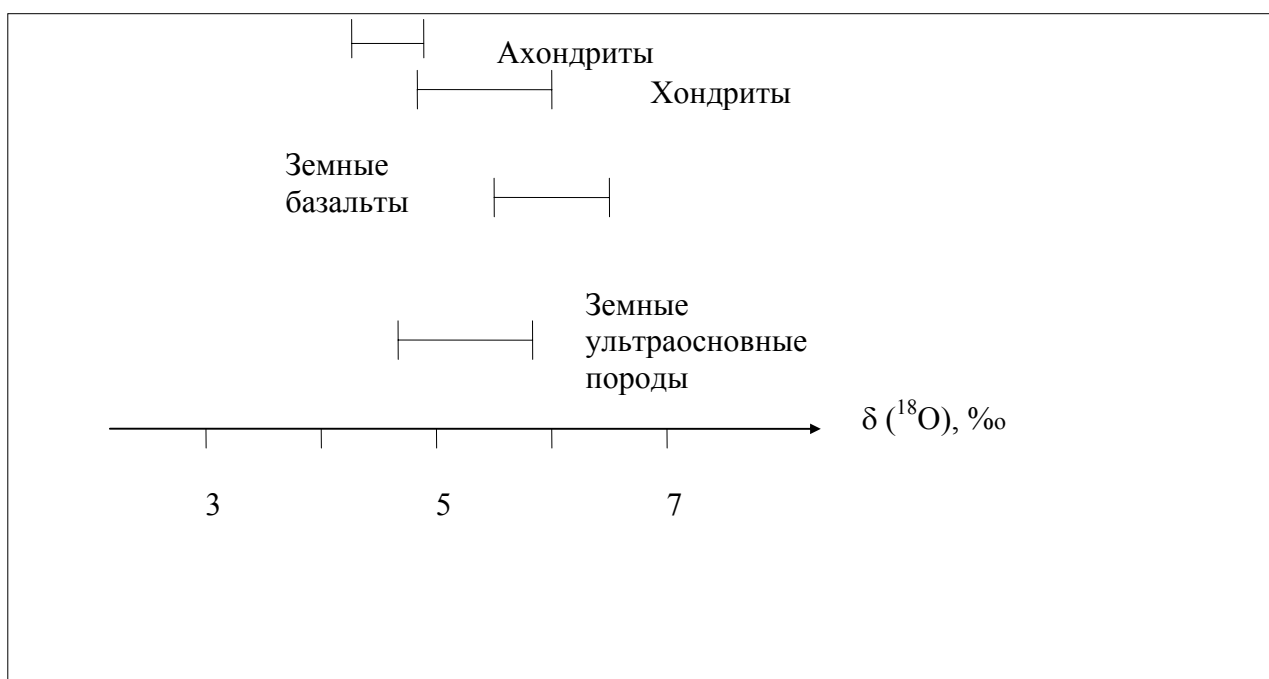


Рис. 1.2. Относительное изотопное отклонение кислорода в различных объектах Солнечной системы

Стабильные изотопы кислорода с атомной массой 16 и 18 образуются на разных стадиях звездного нуклеосинтеза, и, кроме того, в соединениях с кремнием (силикатах) кислород не летуч. Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о формировании Солнечной системы из гомогенного по составу исходного вещества.

По современным взглядам Солнца и его планеты, подобно другим компактным объектам, образовались в результате развития гравитационной неустойчивости в газопылевом облаке. Обнаруженные в нескольких метеоритах особенности изотопного состава свидетельствуют, что толчком к образованию Солнечной системы могла послужить вспышка близкой сверхновой звезды, передавшей облаку долю своих энергии и вещества.

Качественная космогоническая теория, объясняющая процесс роста центрального тела за счет *аккреции* твердых частиц с одновременным образованием вокруг него вращающегося плоского диска повышенной плотности и дальнейшим превращением его в протосолнце и разделенные по орбитам *планетезимали*, была разработана нашим соотечественником Отто Юльевичем Шмидтом в конце 40-х прошлого века. До настоящего времени многие этапы этого процесса остаются неясными и не поддаются однозначному количественному объяснению. Тем не менее можно считать достаточно надежно установленным тот факт, что примерно 4,7 млрд. лет назад в Галактике загорелась еще одна звезда, а через 100 млн. лет у нее сформировалась планетная система.

---

**Внимание!** Проверьте, помните ли вы порядок этих величин.

Солнце: радиус 700 тыс. км, масса  $2 \cdot 10^{33}$  г, плотность  $1,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

Земля: радиус 6370 км, масса  $6 \cdot 10^{27}$  г, плотность  $5,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

---

Приведем содержание (%) нелетучих составляющих протосолнечной туманности (в скобках представлен состав земной литосферы):

SiO <sub>2</sub>	–	33	(59)	MgO	–	23	(3,3)
TiO <sub>2</sub>	–	0,11	(0,8)	CaO	–	2,32	(3,1)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	2,53	(15)	Na <sub>2</sub> O	–	0,72	(3,1)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	0,49		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	0,38	(0,22)
FeO	–	22	(3,6)	FeNi	–	8,9	

MnO – 0,24 (0,11) FeS – 6,17

В протопланетном диске за счет исключительно сильного *звездного ветра* молодого Солнца и связанного с ним разогрева и ионизации газа во внутренней части Солнечной системы происходила радиальная дифференциация вещества. Как следствие, на периферию облака оказались выметены газовые, летучие и легкоплавкие компоненты исходного вещества, а тугоплавкие преобладали во внутренней области, там, где формировались планеты земной группы. Зависимость состава планеты от температуры, определяемой близостью к Солнцу, иллюстрируется в табл. 1.1. Сведения о первичном составе протопланетного облака получены благодаря детальному изучению вещества метеоритов и лунного грунта. На поверхности Земли было обнаружено более двух тысяч метеоритных тел, вес самого крупного из которых превысил 60 т. Шесть экспедиций по программе посещения Луны «Аполлон» и три возвращаемых космических аппарата «Луна» доставили на Землю примерно 386 кг лунного базальта.

Т а б л и ц а 1.1

Последовательность конденсации вещества

Температура Т, К	Конденсат	Планета (оценочная температура образования, К)
1500	Окиси металлов	Меркурий (1400)
1300	Металлическое железо и никель	
1200	Силикаты	
1000	Полевой шпат	
680	Троилит (FeS)	
		Венера (900)
		Земля (600)
		Марс (450)
273	Лед (H <sub>2</sub> O)	
150	Аммиак–лед	Юпитер (175)
120	Метан–лед	
65	Аргон–неон–лед	Плутон (65)

Важно подчеркнуть, что дифференциация протопланетного вещества внутри Солнечной системы происходила достаточно быстро, всего за десяток миллионов лет. Аккреция планет на орбитах продолжалась гораздо дольше, порядка сотни миллионов лет, и поэтому происходила гомогенно, т.е. из вещества со сходным химическим составом. В результате образовались планеты, существенно отличающиеся по средней плотности ( $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ), отражающей отличие в химическом составе:

	Плотность	Плотность без сжатия
Меркурий	5,44	5,4
Венера	5,24	4,2
Земля	5,52	4,2
Марс	3,93	3,3
Юпитер	1,3	1,3
Сатурн	0,7	0,7
Уран	1,2	1,2
Нептун	1,7	1,7
Плутон	?	?

Итак, в результате не до конца ясного процесса эволюции протопланетного облака появилась центральная звезда – Солнце, и вокруг нее произошло формирование планетной системы. Солнечная система, занимающая менее  $10^{-23}$  объема Галактики, является космической частью нашей природной среды. Сколь угодно значимое энергетическое воздействие из-за ее пределов на человечество представляется маловероятным.

### **1.3. Формирование состава Земли**

Хотя качественная теория образования планетных систем имеет универсальный характер, она оставляет возможными несколько конкретных сценариев ранней эволюции Земли. Выбрать какой-то один на основе имеющихся экспериментальных данных пока невозможно. Неясно, проходила ли Протоземля в процессе *аккреции* через стадию полного плавления или сначала сформировалось холодное тело планеты, а лишь потом произошли

разогрев и гравитационная дифференциация ее вещества. Возникли ли Земля и Луна как тесная двойная система или происхождение Луны связано с ударом о Землю гигантского тела, выбившего из ее верхних слоев массу осколков, объединившихся затем на орбите в привычный спутник нашей планеты? Ответы на эти и другие вопросы принципиально важны для планетной космогонии и геологии. С экологической точки зрения важнее полученный результат. Имеется несколько надежных фактов. Возраст Земли не может превышать 4,55 млрд. лет (более подробно об этом см. в гл. 2), а древнейших пород Луны – 4,45 млрд. лет. Древнейшие из известных земных минералов, цирконы (ZrSiO<sub>4</sub>) Западной Австралии, образовались 4,4 млрд. лет назад, а древнейшие скальные породы – 3,9–4,0 млрд. К этому времени должно было сформироваться то твердое тело Земли, на поверхности которого мы живем. Основной химический состав Земли:

Элемент	Процентное содержание
Fe	36
O	29
Si	14
Mg	12
Ni	2
Ca	1,9
Al	1,8
S	1,8

В земной коре эти элементы присутствуют не в чистой химической форме и не в виде простых химических соединений, а в составе минералов. Пример такого минерального состояния – амфибол Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>(SiAl)<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>.

Основные группы геохимических минералов:

- литофильные – силикатные минералы;
- халькофильные – сернистые минералы;
- сидерофильные – минералы, растворяющиеся в металлическом железе и никеле.

## 1.4. Состав природной среды

Распределение вещества Земли по массе (в процентах): атмосфера –  $0,85 \cdot 10^{-6}$ ; океан –  $0,23 \cdot 10^{-3}$ ; кора –  $0,44 \cdot 10^{-2}$ ; мантия – 0,669; ядро – 0,326.

Очевидно, что границы биосферы - или среды обитания земной жизни – гораздо уже границы планеты и сосредоточены вблизи ее поверхности. Среда обитания человека еще более ограничена. Но через эти границы происходит обмен веществом и энергией, объединяющий живую и косную материю в единую экосистему.

### 1.4.1. Атмосфера

Деление атмосферы на слои (сферы), которые разделяются паузами, определяется характером изменения температуры воздуха с высотой:

тропосфера:  $dT/dh = - 6 \text{ К/км}$ ;

тропопауза: высота на полюсе 7 км, на экваторе 17 км;

стратосфера: 200 – 280 К;

мезосфера: 280 – 180 К, средняя высота 85 км;

термосфера:  $dT/dh = 20 \text{ К/км}$ .

Состав атмосферы (табл. 1.2) до высоты 100 км остается постоянным.

Т а б л и ц а 1.2

Химический состав атмосферы

Газ	Процент объема	Количество атомов на сантиметр площади
N <sub>2</sub>	78	$1,7 \cdot 10^{25}$
O <sub>2</sub>	21	$4,5 \cdot 10^{24}$
Ar	0.93	$2,0 \cdot 10^{23}$
CO <sub>2</sub>	0,03	
He	$5 \cdot 10^{-4}$	
Kr	$1,1 \cdot 10^{-4}$	
Xe	$9 \cdot 10^{-6}$	
Ne	$2 \cdot 10^{-6}$	



### 1.4.2. Гидросфера и гляциосфера

Масса воды в современной гидросфере близка к величине  $1,5 \cdot 10^9$  Гт (гигатонн), т.е.  $1,5 \cdot 10^{24}$  г. Большую часть гидросферы составляет Мировой океан –  $1,4 \cdot 10^9$  Гт, остальная доля приходится на подземные воды –  $0,7 \cdot 10^9$  Гт и материковые льды (гляциосферу) –  $0,23 \cdot 10^9$  Гт. Как это ни удивительно, происхождение Мирового океана до сих пор остается открытым вопросом. Помимо свободной воды на поверхности, существует ее скрытый резервуар в составе континентальной и океанической коры. Всего же в поверхностных сферах Земли сосредоточено около  $2,2 \cdot 10^9$  Гт воды.

Средняя соленость океанской воды около 3,5 %, что дает массу растворенных солей  $5 \cdot 10^{22}$  г. Океанская вода обладает слабой щелочной реакцией с  $\text{pH} \sim (7,5-8,5)$ . Это соответствует состоянию равновесия между растворенным в воде бикарбонатом  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и карбонатом кальция, переходящим в осадок. При избытке в воде  $\text{CO}_2$  карбонат растворяется и переходит в бикарбонат, и наоборот, при его недостатке бикарбонат превращается в карбонат и выпадает в осадок. Растворение карбонатов происходит и при повышении давления. В холодных горизонтах современного океана оно начинается с глубины 4,5 км, поэтому глубже этого уровня карбонатные донные осадки не наблюдаются.

Характерной особенностью Мирового океана является циркуляция и перемешивание вод.

### 1.4.3. Кора

Верхний слой жесткой оболочки Земли – литосферы носит название коры. Ее поверхность формировалась благодаря трем разнонаправленным геологическим процессам: тектоническим движениям, эрозии и осадконакоплению. Рельеф земной коры описывается гипсометрической кривой (рис. 1.3). Установлено, что существует два типа земной коры: гранитная кора под континентами ( $S = 1,4 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>,  $h = 35$  км) и более тонкая и плотная базальтовая кора под океанами ( $S = 3,7 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>,  $h = 6$  км).

## 1.5. Эволюция окружающей среды

Нам достаточно надежно известен возраст Земли как планетарного тела. Он составляет примерно 4.5 миллиарда лет. Расположив на этом временном отрезке процессы, протекавшие в окружающей среде в их хронологической последовательности, мы получим картину эволюции. Долгое время господствовал взгляд о смене эволюционных фаз (рис. 1.4).

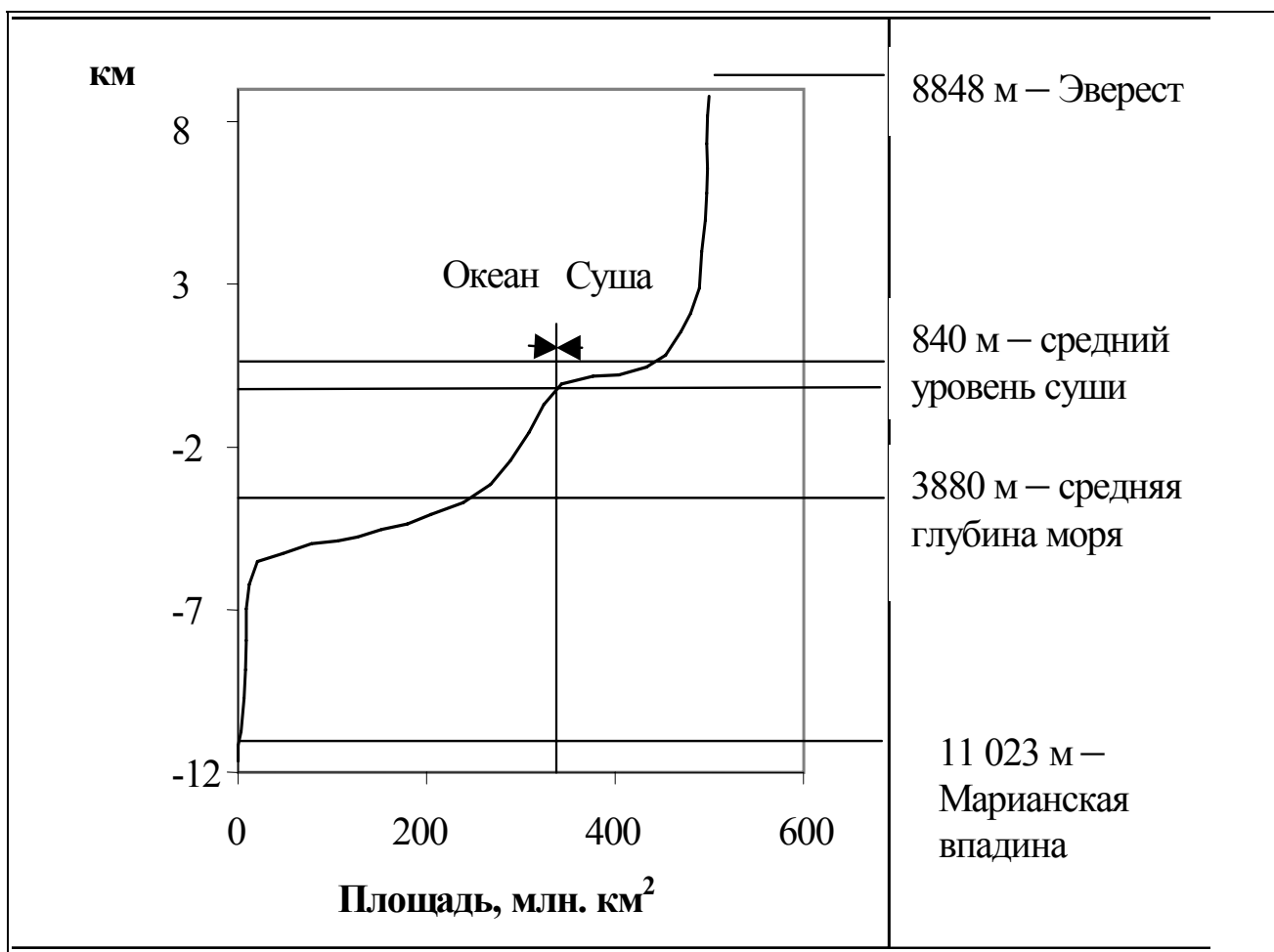


Рис. 1.3. Гипсографическая кривая поверхности земной коры

Биологическая  
эволюция

Геохимическая  
эволюция

Ядерная  
эволюция

Наше время ×-----> В прошлое

Рис. 1.4. Схема последовательности эволюционных фаз (устаревшая)

Известны пять геологических формаций, в которых присутствуют породы с возрастом (3,9–4,0) млрд. лет: юг Канады (система Ванкувер), юго-восток Гренландии, юго-восток Китая, восточное побережье Антарктиды и южная Австралия. Древнейшие остатки живых организмов, найденные в породах с возрастом 3.8 млрд. лет, то есть появившиеся вскоре после образования твердой литосферы, свидетельствуют об одновременности геохимической и биологической фаз. Ископаемые отложения из Южной Африки и Западной Австралии содержат строматолиты – карбонатные окаменелости, предположительно возникшие в результате жизнедеятельности цианобактерий.

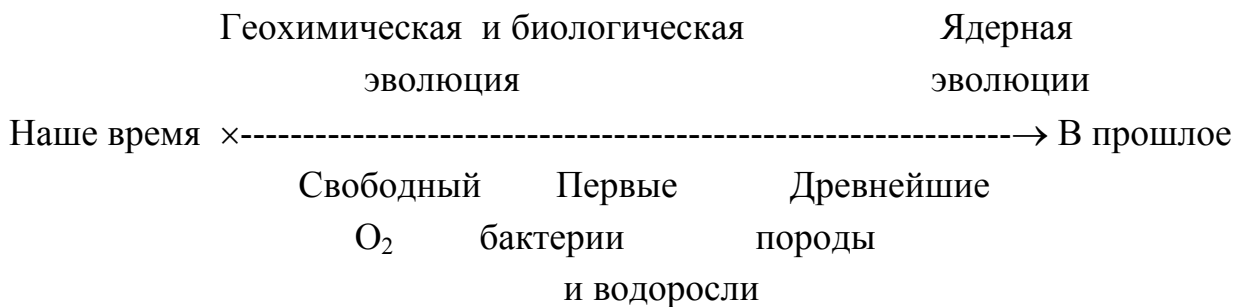


Рис. 1.5. Схема последовательности эволюционных фаз (современная)

Современный взгляд на то, каким образом биологическая эволюция связана с эволюцией геохимической, представлен на рис. 1.5.

### 1.5.1. Атмосфера

Известно, что «молодая» Земля была практически лишена и гидросферы, и заметной атмосферы. Потеря предполагаемой «первичной» атмосферы всеми близкими к Солнцу планетами земной группы следует из кардинального различия химического состава их современных атмосфер и атмосфер планет-гигантов, в частности Юпитера. Обсуждаются две альтернативные модели формирования вторичной атмосферы планет. Одна, ортодоксальная, связывает накопление воды и газов на поверхности с процессами гравитационного разделения (дифференциации) вещества планет при разделении на сферы разной плотности. Дегазация расплавленного вещества с обсуждавшимся ранее

химическим и минеральным составом приводила к атмосфере, состоящей из паров воды, углекислого газа и других газовых фракций. Другая модель предлагает в качестве источника вторичной атмосферы захваченное вещество комет, поток которых на ранних стадиях формирования Солнечной системы на порядки превышал современный. Следует отметить, что в любом варианте эта начальная атмосфера по химическим свойствам была восстановительной. Во многих древних геологических отложениях с возрастом 2.5–3 млрд. лет широко распространены «кислородофобные» минералы, а первые красноцветные индикаторы присутствия в атмосфере кислорода и вызванного им процесса окисления появились около 1.9–1.8 млрд. лет назад.

Известно, что общие планетарные характеристики Марса, Земли и Венеры близки, близок и их химический состав. При этом в сравнительной планетологии отмечается кардинальное различие в физических характеристиках и составе современных атмосфер планет земной группы (табл. 1.3).

Т а б л и ц а 1.3

Атмосфера планет земной группы

Физическая характеристика	Венера	Марс	Земля
Масса атмосферы, г	$5 \cdot 10^{23}$	$3 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{21}$
Средняя молярная масса	43,4	43,5	29
Давление, бар	92	$7 \cdot 10^{-3}$	1
Температура, К	700	230	288

Состав атмосферы (объемные %)

CO <sub>2</sub>	96	95	0.033
N <sub>2</sub>	3,5	3.5	78
O <sub>2</sub>	–	0,13	21
Ar	0,01	1,6	0,9
H <sub>2</sub> O	0,01	0,03	0,1

Исходя из единого механизма формирования атмосфер, этот факт требует специального обсуждения. На сегодняшний день, имеется два решающих фактора: 1) положение Земли (она находится на таком расстоянии от Солнца, которое допускает присутствие на поверхности жидкой воды; если бы поверхностная температура Земли была больше  $100^{\circ}\text{C}$ , то Земля разделила бы судьбу Венеры, т.е. у нее была бы плотная углекисло-водопаровая атмосфера; при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$  Земля снаружи замерзла бы подобно Марсу); 2) воздействие биологической эволюции на состав окружающей среды.

Какие конкретные процессы привели к трансформации состава атмосферы Земли от состава, близкого к атмосферам соседних планет, к наблюдаемому сейчас?

### **1.5.2. Современный состав атмосферы Земли и его связь с органической эволюцией**

Для человека атмосфера – основная среда обитания, поэтому подробнее рассмотрим составляющие ее элементы и их происхождение.

Азот. В атмосфере содержится  $4 \cdot 10^6$  Гт (1 Гт, гигатонна =  $10^{15}$  г) азота, примерно столько же его связано в литосфере. Является ли азот коры продуктом атмосферного происхождения – вопрос, до сих пор ждущий своего ответа. Ни животные, ни основная масса растений не способны усваивать азот непосредственно из воздуха.

---

#### Производство удобрений

Известно, что кроме  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  для роста растений необходимы азот и фосфор, которые поглощаются из почвы в виде растворенных ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$ . Существуют природные циклы азота и фосфора. Проблема усвоения азота из воздуха определяется сильной связью молекулы  $\text{N}_2$  (энергия связи составляет 9,8 эВ). Разложить ее способны лишь некоторые виды микроорганизмов. Индустрии азотных удобрений – это одна из задач сельскохозяйственного производства. Природных запасов биологически доступного азота не существует (исключение – пустыня Атакама в Чили, где накоплены отложения гуано), так как эти соединения легко растворимы.

Стоимость продукции интенсивного земледелия постоянно увеличивается. В США в период с 1949 по 1968 г. производство азотных удобрений (рис. 1.6.) выросло на 650 %, а сельскохозяйственной продукции – всего на 11 %.

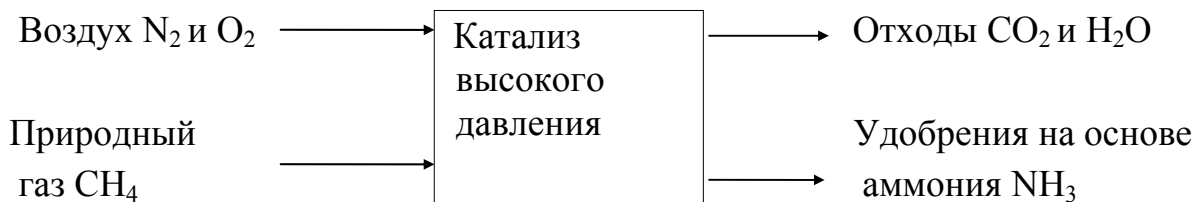


Рис. 1.6. Упрощенная схема производства азотных удобрений

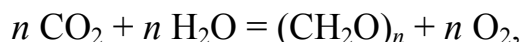
С фосфором ситуация более благоприятная – имеются богатейшие месторождения апатитов (крупнейшие из них – в Хибинах, Россия, и во Флориде, США). Поскольку среднее содержание фосфора в литосфере 0,1 %, остается загадкой, как сформировались его сравнительно молодые отложения.

**Кислород.** В атмосфере содержится  $10^6$  Гт ( $10^{21}$  г) свободного  $O_2$ , а в земной коре – более  $10^{10}$  Гт. Таким образом, увеличение коры менее чем на метр обеспечило бы поглощение всего кислорода атмосферы. Существует динамическое равновесие процессов окисления и восстановления на поверхности Земли. Средний поток кислорода –  $300$  Гт·год<sup>-1</sup>. Поступление кислорода происходит в основном в процессе усвоения  $CO_2$  растениями (фотосинтез) и разложения органики. Поглощение  $O_2$  – это окисление при дыхании животных и растений, рассеяние в земной коре, окисление углерода при горении (антропогенный фактор).

**Пример.** Оценим потребление кислорода человечеством на дыхание.

$F = 12$  м<sup>3</sup> воздуха в сутки на человека · 0,2 кислорода в воздухе · 365 суток ·  $6 \cdot 10^9$  жителей ·  $1,29$  кг·м<sup>-3</sup>  $\approx 6,8 \cdot 10^{12}$  кг·год<sup>-1</sup>,  
т.е. порядка 2,3 % полного годового потока. Общее потребление биосферы, включая техносферу, равняется  $2,1 \cdot 10^{17}$  г·год<sup>-1</sup>.

Упрощенная формула фотосинтеза выглядит так:



где  $n$  чаще всего равно 6, что соответствует синтезу гексозы ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ).

Для увеличения концентрации свободного кислорода в атмосфере нужно погребать целлюлозу быстрее, чем кислород расходуется на окисление.

Углерод. В атмосфере содержится 720 Гт углерода в составе  $\text{CO}_2$ , в океане –  $10^5$  Гт, в земной коре – более 75 млн. Гт, но из них горючих веществ органического происхождения – не более 10 тыс. Гт. Доступные запасы органического топлива составляют примерно 4 тыс. Гт, распределенных по убыванию между углем, нефтью и газом (рис. 1.7). Поучительно эти цифры сопоставить с количеством углерода в живой биомассе, равным приблизительно 800 Гт.

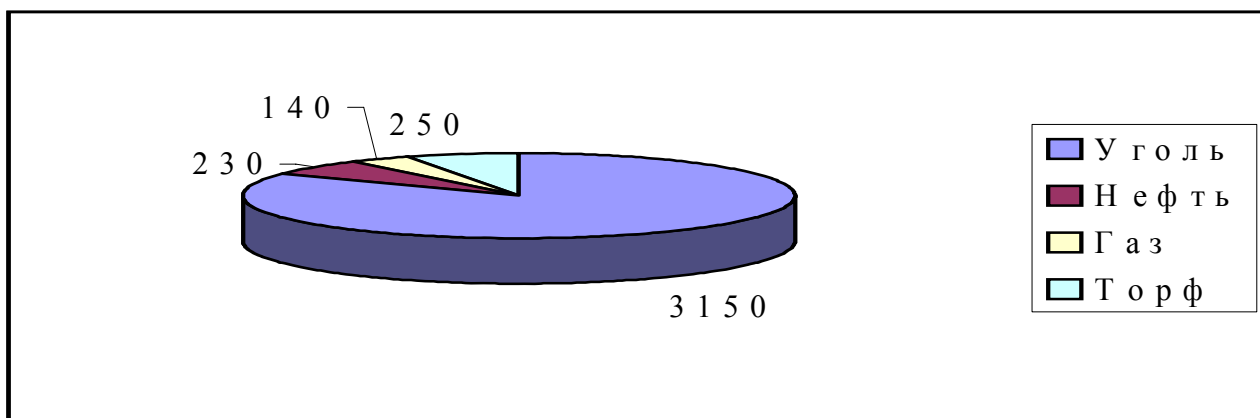


Рис. 1.7. Распределение массы углерода (Гт) в разведанных запасах ископаемого топлива

Первичные источники нефти и газа – органические породы с содержанием органического углерода 0,3 – 0,5 %. В процессе катогенеза (нагревание при высоком давлении) образуются жидкие гидрокарбонаты, которые покидают исходные породы и накапливаются в пористых резервуарах: доломитах, песчаниках или известняках. Формирование органического вещества началось примерно 2 млрд. лет назад. Однако большая его часть не накапливалась, а возвращалась в атмосферу за счет окисления до  $\text{CO}_2$  или переходила в осадки в форме  $\text{CaCO}_3$ . Верхний предел сохраненного в

ископаемом топливе органического углерода (керогена) – не более 4 % его биологической продукции.

Появление свободного кислорода в атмосфере, безусловно, должно было стимулировать эволюцию жизни и развитие ее новых форм с современным энергоемким метаболизмом. Первые находки *эукариот* (клеток с обособленным ядром) относятся к геологическим отложениям с возрастом  $1.4 \cdot 10^9$  лет. Для жизнедеятельности эукариотическому фитопланктону требуется небольшая концентрация растворенного в воде кислорода, поэтому этот возраст можно связать с достижением относительного содержания кислорода в атмосфере ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$ ) от современного. Известно критическое содержание кислорода порядка  $10^{-2}$  (так называемая точка Пастера), при котором анаэробное брожение сменяется кислородным – энергетически более выгодным. Дальнейшее увеличение концентрации кислорода могло обеспечить создание тонкого атмосферного озонового слоя и распространение наземной жизни.

### 1.5.3. Круговорот углерода и кислорода

Рассматриваемая ниже модель биогенного изменения состава атмосферы (модель Костицына, рис. 1.8) не может сегодня претендовать на адекватность описания природных процессов. Конечно, она упрощена и огрублена. Однако это одна из первых, если не первая, численная модель, иллюстрирующая циклический характер медленных процессов в окружающей среде. Заслуживает внимания и ее методология, элементы которой входят в современные математические модели экологических систем.

Итак, обозначим:

$X$  – масса свободного атмосферного кислорода;

$Y$  – суммарная масса  $\text{CO}_2$  в атмосфере и океане;

$v$  – общая масса кислорода и углерода в растениях;

$u$  – общая масса кислорода и углерода у животных;

$s$  – общая масса кислорода и углерода в останках растений и животных в земной коре.

---

См.: Костицын В.А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М: Наука, 1984.



Схема обмена выглядит так: 1 – 3 дыхание животных; 1 – 4 дыхание растений; 4 – 5 разложение растений; 4 – 2 дыхание и разложение растений; 4 – 3 поедание растений животными; 2 – 4 питание растений; 4 – 1 питание растений; 3 – 2 дыхание и разложение животных; 3 – 5 разложение животных.

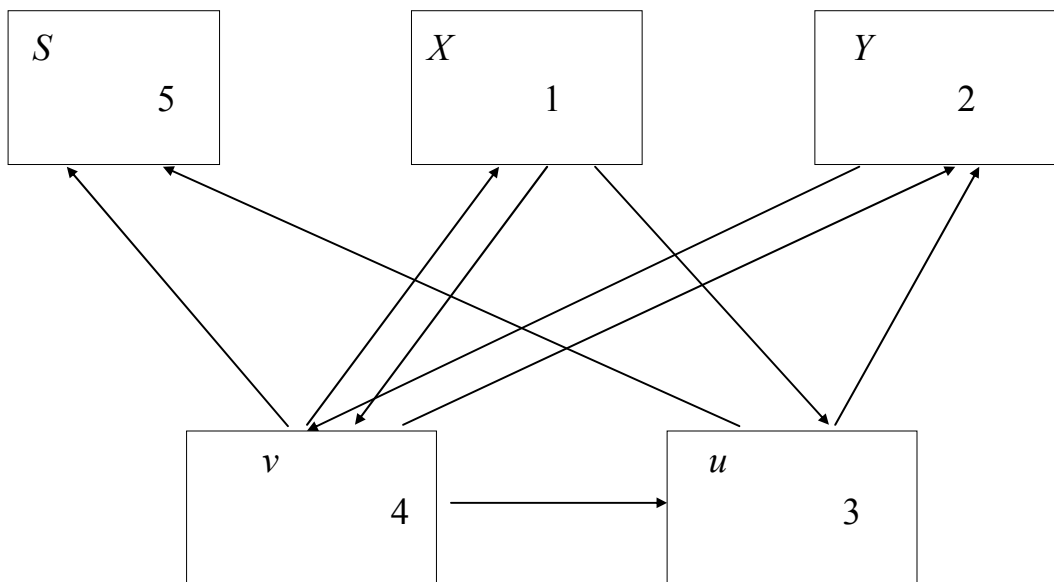


Рис. 1.8. Модель круговорота кислорода и углерода в окружающей среде

Модель описывается системой эволюционных потоковых уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= -\alpha_{13} \cdot u - \alpha_{14} v + \alpha_{41} \cdot v \\
 \frac{dy}{dt} &= \alpha_{32} \cdot u - \alpha_{24} \cdot v + \alpha_{42} \cdot v \\
 \frac{ds}{dt} &= \alpha_{35} \cdot u + \alpha_{45} \cdot v \\
 \frac{dv}{dt} &= \alpha_{14} \cdot v - \alpha_{41} \cdot v + \alpha_{24} \cdot v - \alpha_{42} \cdot v - \alpha_{45} \cdot v - \beta \cdot u \cdot v \\
 \frac{du}{dt} &= \alpha_{13} \cdot u - \alpha_{32} \cdot u - \alpha_{35} \cdot u + \beta \cdot u \cdot v
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Мы полагаем  $\alpha_{ij}$  не зависящими от времени, что неверно для различных геологических эпох, но справедливо для коротких интервалов времени. Слагаемое  $\beta uv$  отражает питание животных растениями по «принципу встреч». Видно, что последних два уравнения можно решить, а оставшиеся три выразить в квадратурах.

Отметим также, что

$$x + y + s + u + v = M \quad \text{и} \quad u + v < M$$

Запишем последних два уравнения из (1.2) в более компактной форме:

$$\begin{cases} u_t = u(-\lambda + \beta \cdot v) \\ v_t = v(\mu - \beta \cdot u) \end{cases}$$

Поскольку в отсутствие растений животных не существовало бы,  $\lambda > 0$ . Кроме того, в отсутствие животных растения ускоренно развивались бы и  $\mu > 0$ . Такая система в математике называется системой Ляпунова и имеет периодическое решение:

$$u^\mu \cdot v^\lambda = Lu \exp(\beta \cdot u + \beta \cdot v),$$

где  $Lu$  – константа, зависящая от начальных условий  $u_0$  и  $v_0$

$$Lu = u_0^\mu \cdot v_0^\lambda \exp[-(\beta \cdot u_0 + \beta \cdot v_0)].$$

Итак, получаем периодическое решение в окрестности точки покоя:

$$u^* = \mu/\beta, \quad v^* = \lambda/\beta$$

с периодом

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\lambda \cdot \mu}}$$

Наглядное графическое решение может быть получено методом фазовой плоскости:

$$F(u) = u^\mu \exp(-\beta \cdot u) = H \cdot v^{-\lambda} \exp(\beta \cdot v) = G(v)$$

В псевдофазовой плоскости  $(u, v)$  оно выглядит, как показано на рис. 1.9.

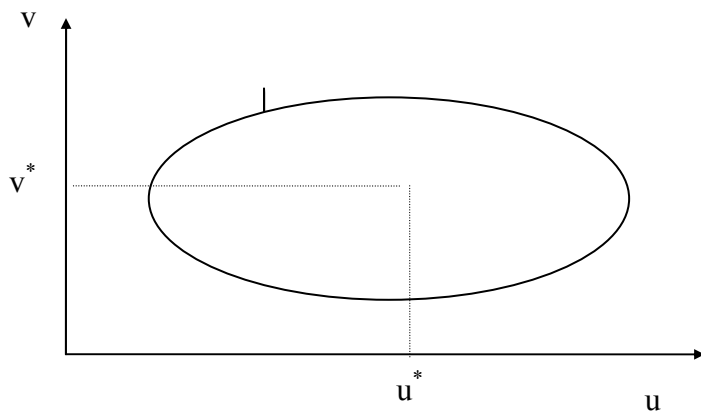


Рис. 1.9. Типичная фазовая траектория системы уравнений хищник – жертва.

Из замкнутости кривой делаем вывод о периодичности  $u$  и  $v$  по времени. Рассмотрим изменение массы свободного кислорода в атмосфере за период:

$$\frac{x(t+T) - x(t)}{T} = \frac{1}{\beta} [(\alpha_{32} + \alpha_{35})(\alpha_{41} - \alpha_{14}) + \alpha_{13}(\alpha_{45} - \alpha_{24} + \alpha_{42})] > 0$$

Если:

- 1)  $(\alpha_{14} - \alpha_{41}) < 0$ , растения выделяют кислорода больше, чем усваивают;
- 2)  $(\alpha_{42} - \alpha_{24}) < 0$ , растения больше усваивают углекислого газа, чем выделяют;
- 3)  $\alpha_{45} > (\alpha_{24} - \alpha_{42})$ , растения теряют больше углерода в гумус, чем приобретают, усваивая  $\text{CO}_2$  из атмосферы.

Аналогичным образом получается вывод об уменьшении общей массы  $\text{CO}_2$  за цикл.

Три замечания относительно рассмотренных уравнений.

1. Вообще говоря, гармоническое решение системы хищник – жертва возможно только при малых возмущениях относительно точки равновесия (фокуса). С удалением от нее из-за нелинейности уравнений начинает сказываться зависимость периода колебаний от амплитуды, а форма колебаний заметно отличается от синусоидальной зависимости.

2. В. Вольтерра обобщил уравнение хищник – жертва для случая  $n$  биологических видов, взаимодействующих между собой:

$$\frac{dN_r}{dt} = \varepsilon_r \cdot N_r + \frac{1}{\beta_r} \sum_{s=1}^n \alpha_{sr} \cdot N_s \cdot N_r$$

Коэффициенты  $\varepsilon_r$  определяют изменение численности организмов в отсутствие других видов, они могут быть положительными и отрицательными.

3. На начальной стадии заселения среды независимая популяция увеличивается по экспоненциальному закону:

$$\frac{dN}{dt} = (b - d)N,$$

где  $N$  – число особей,  $b$  – рождаемость,  $d$  – смертность.

При  $b > d$ , по достижении определенной численности, обостряется борьба за выживание. Если  $K$  – это максимальная численность, которую может достичь популяция в данной среде, то уравнение имеет вид:

$$\frac{dN}{dt} = (b - d)N(K - N)$$

Это логистическое уравнение, отображаемое S-образной кривой с насыщением. Подобное насыщение часто есть результат скрытого действия закона Либиха о лимитирующем факторе.

---

## **1.6. Энергия в окружающей среде**

Энергия, которую использует биосфера – это преимущественно энергия Солнца. Она переносится через атмосферу, захватывается в процессе фотосинтеза и удерживается в биосфере до тех пор, пока не рассеется в межпланетное пространство в виде теплового излучения. С развитием цивилизации все возрастающая доля этой энергии расходуется на поддержание одного биологического вида – человека.

### **1.6.1. Солнечная радиация как основной источник энергии окружающей среды**

Температура поверхности Солнца по порядку величины  $T_c \approx 6000$  К, Земли –  $T_3 \approx 300$  К. Коэффициент полезного действия передачи тепловой энергии в механическую в квазистатическом приближении (без изменения энтропии) для этой пары

$$\eta = \frac{T_{\dot{N}} - T_{\dot{C}}}{T_{\dot{N}}} \approx 95\%.$$

Земля – это пример диссипативной системы, имеющей приток очень чистой энергии. Поток солнечной радиации, падающей на горизонтальную площадку атмосферы,

$$F_{\dot{N}} = S \left( \frac{\bar{r}}{r_{\dot{C}}} \right)^2 \cos \nu,$$

где  $S$  – солнечная постоянная,

$$S = \frac{Q_c}{4\pi \cdot \bar{r}^2},$$

$Q_c$  – энергетическая светимость (мощность излучения) Солнца, равная  $4 \cdot 10^{26}$  Вт;  $\frac{\bar{r}}{r_3}$  – отношение среднего орбитального расстояния от Земли до Солнца к его мгновенному значению.

Солнечная постоянная составляет  $1367 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , или, во внесистемных тепловых единицах,  $20 \text{ ккал} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$  (1 г угля = 7 ккал, 1 г бензина = 11 ккал), и обеспечивается непрерывным спектром излучения. Функция

$$f(r_{\dot{C}}) = \left( \frac{\bar{r}}{r_{\dot{C}}} \right)^2$$

достигает своего максимума, равного 1,0344, в январе, а минимума (0,9646) – в июле. Зенитный угол  $\nu$  находится по формуле сферической геометрии через широту  $\lambda$ , солнечное склонение  $\delta$  и часовой угол  $h$ :

$$\cos \nu = \sin \lambda \cos \delta + \cos \lambda \cos \delta \cosh.$$

Полный поток излучения, приходящий за сутки

$$Q_{\dot{C}} = S \cdot f(r) \int_{t_{\text{данный}}^{t_{\text{сегодня}}}} \cos \nu \cdot dt = \frac{24}{\pi} S \cdot f(r) \cdot g(\lambda, \delta, Hr),$$

где  $Hr$  – значение часового угла на рассвете и закате, т.е.  $\nu(Hr) = \pi/2$ .

### 1.6.2. Прохождение солнечного излучения через атмосферу

Напомним основные соотношения для волновых процессов. Длина волны  $\lambda$  связана с частотой  $\nu$  следующим образом:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.3)$$

Из (1.3) следует, что максимум спектральной функции интенсивности  $J_\nu$  смещен в область больших длин волн по сравнению с  $J_\lambda$ :

$$J_\nu = \frac{\lambda^2}{c} J_\lambda$$

Для изотропного излучения справедливо соотношение между интенсивностью и потоком, называемое иногда законом Ламберта,  $F = \pi J$ , т.е. интегральный поток в  $\pi$  раз больше интенсивности.

Ослабление интенсивности диффузного излучения с глубиной атмосферы  $z$  выражается в форме закона Бугерса

$$J_\lambda = J_{0,\lambda} \exp(-k_\lambda \cdot z \cdot \sec \nu),$$

где  $\nu$  – зенитный угол, определяющий распространение излучения.

Тогда поток монохроматического излучения

$$F_\lambda = F_{0,\lambda} \cdot 2 \int_1^\infty e^{-k_\lambda z t} \cdot t^{-3} \cdot dt = F_{0,\lambda} \cdot 2E_3(k_\lambda z),$$

где  $F_{0,\lambda} = \pi J_{0,\lambda}$ , а  $E_3(x) = \int_1^\infty e^{-xt} \cdot t^{-3} \cdot dt$  – трансцендентная функция.

Таким образом, функция пропускания диффузного излучения

$$P_{F_\lambda} = \frac{F_\lambda}{F_{0,\lambda}} = 2E_3(k_\lambda z). \quad (1.4)$$

Представим в (1.4) функцию  $E_3(x)$ , как  $E_3(x) \approx \frac{1}{2} e^{-\beta x}$ , где  $\beta$  – некий коэффициент. Это равенство справедливо в диапазоне  $E_3(x)$  от 0 до 0,5 при  $\beta$  от 1,2 до 2,0 со средним значением  $\beta \approx 1,66$ , т.е. приблизительно

$$P_{F_\lambda} \approx e^{-1.66 k_\lambda \cdot z}.$$

Диффузное пропускание эквивалентно пропусканию направленной радиации при той же оптической толщине, но при  $\sec\theta \approx 1,66$ , что соответствует углу  $53^\circ$ .

По закону смещения Вина можно вычислить, что максимум излучения Солнца соответствует длине волны примерно 500 нм, причем на ультрафиолет ( $< 400$  нм) приходится 10 % мощности излучения, 45 % - на видимый свет и 45 % – на инфракрасный ( $> 750$  нм) диапазон длин волн.

### 1.6.3. Глобальный энергетический баланс

Средний энергетический баланс земной поверхности определяется с помощью равенства падающей и излучаемой энергии

$$S \cdot \pi \cdot R_c^2 (1 - A) = 4\pi \cdot R_c^2 \cdot \sigma \cdot T_e^4,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>;  $A$  - альбедо для солнечного коротковолнового излучения.

Тогда эффективная температура

$$T_e = \left[ \frac{S}{4 \cdot \sigma} (1 - A) \right]^{1/4} = K(1 - A)^{1/4}.$$

Приведем значения эффективных температур, вычисленные для планет земной группы (табл. 1.4, графа 6), а также значения действительных температур на их поверхности (табл. 1.4, графа 7). Разница между ними обеспечивается рассеивающим действием атмосфер и называется парниковым эффектом. Для Земли величина парникового эффекта составляет  $33^\circ$  С.

Положение линий поглощения атмосферных газов в диапазоне кривых излучения Солнца и Земли представлено на рис. 1.10. Обратите внимание на слабое поглощение солнечной радиации в интервале 8–12 мк. По оси абсцисс отложена длина волны (нижняя шкала) и волновое число (здесь – обратная длина волны, верхняя шкала).

Поглощенная в атмосфере энергия  $E$  может быть вычислена через сечения элементарных процессов:

$$E_{\text{погл}} = hc \sum_i C_i \int_0^\infty \sigma_i(\lambda) I(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda},$$

где  $C_i$  – концентрация газа;  $\sigma_i$  – сечение поглощения на данной длине волны, по порядку величины равное ( $10^{-17}$ – $10^{-18}$ )  $\text{см}^2$ ;  $I$  – интенсивность излучения.

Симметричные двухатомные газы поглощают в коротковолновой области, а трехатомные, такие как вода и углекислый газ, за счет колебательных и вращательных переходов экранируют длинноволновую область (для воды колебательные уровни соответствуют областям спектра около 2,7 и 6,3 мк, а вращательные – за 18 мк – см. рис. 1.10, б).

Т а б л и ц а 1.4

Эффективные и действительные температуры поверхности для планет земной группы

Планета	Расстояние до Солнца см	Солнечная постоянная, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$	Альбедо $A$	Толщина атмосферы, $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$	Эффективная температура поверхности, К ( $^{\circ}\text{C}$ )	Температура поверхности, К ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	2	3	4	5	6	7
Земля	$1,5\cdot 10^{13}$	1367	0,3	1033	255 (-18)	288 (15)
Венера	$1,1\cdot 10^{13}$	2613	0,75	$\approx 100\ 000$	234 (-39)	703 (430)
Марс	$2,3\cdot 10^{13}$	589	0,17	16	215 (-58)	228 (-45)

Т а б л и ц а 1.5

Парниковые газы и результат поглощения ими длинноволнового излучения

Газ	Концентрация, $10^{-6}$	Основная линия поглощения, мк	Нагрев атмосферы, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$	Доля парникового эффекта, %
$\text{H}_2\text{O}$	$\approx 3000$	Много	100	65,4
$\text{CO}_2$	345	15	50	32,7
$\text{CH}_4$	1,7	7	1,7	1,1
$\text{O}_3$	$(10-100) 10^{-3}$	8	1,3	0,8





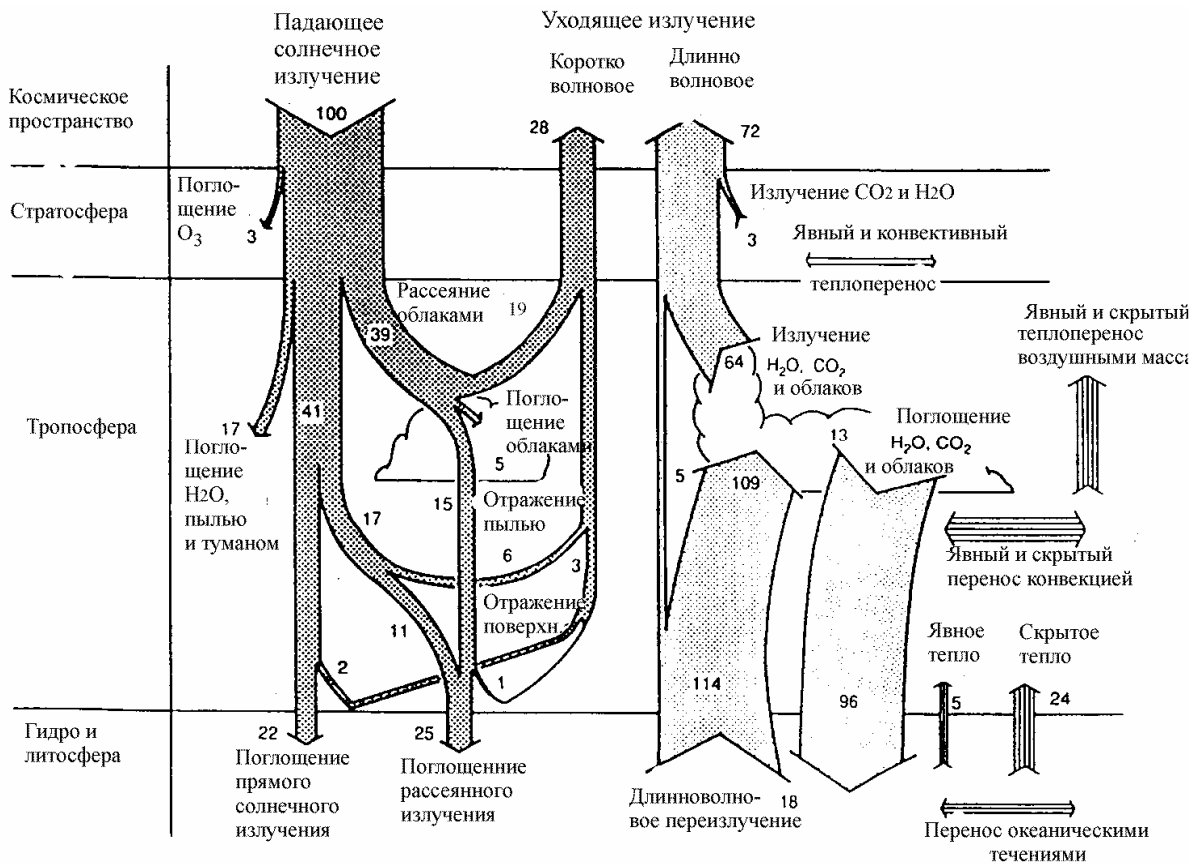


Рис. 1.11. Схема глобального энергетического баланса, определяющего среднюю температуру поверхности земного шара: справа горизонтальные и вертикальные стрелки – потоки тепла в атмосфере.

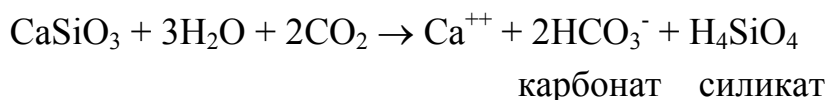
Из частей атмосферы наиболее близка к радиационному равновесию стратосфера. Как следствие, средний глобальный высотный градиент составляет в тропосфере  $6 \text{ K}\cdot\text{км}^{-1}$ , что гораздо меньше величины  $9,6 \text{ K}\cdot\text{км}^{-1}$ , соответствующей сухому воздуху. Средняя радиационная высота при таком градиенте составляет примерно  $33 \text{ K}/6 \text{ K}\cdot\text{км}^{-1} = 5.5 \text{ км}$ . Для поддержания радиационного баланса в системе поверхность Земли – атмосфера, их нагревание или охлаждение должно происходить одновременно, аналогичным образом будут меняться эффективная температура и радиационная высота.

Средний поток энергии на верхней границе атмосферы Земли составляет  $344 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , а с учетом альбедо его величина снижается до среднего потока, равного  $240 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  на поверхности. Эта средняя величина, как было показано ранее, имеет большой широтный градиент. В отсутствии широтного

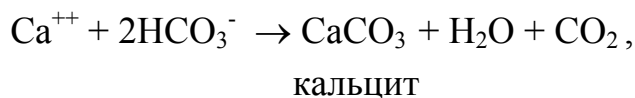
перераспределения энергии на поверхности Земли радиационное равновесие достигалось бы с градиентом экватор–полюс более 100 К.

#### 1.6.4. CO<sub>2</sub> термостат

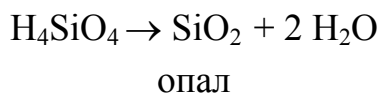
Стабилизация температуры атмосферы обеспечивается физическими процессами, играющими в глобальной тепловой машине роль отрицательных обратных связей. В качестве примера рассмотрим процесс, основанный на переносе углекислого газа в системе породы–океан–атмосфера. Пусть исходная литосфера содержит CaSiO<sub>3</sub>. Тогда CO<sub>2</sub>, растворенный в грунтовых водах, вызывает реакции вида



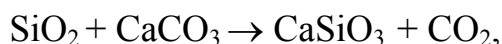
При попадании этих веществ в Мировой океан в нем в результате биохимических реакций происходит образование кальцита – одного из основных осадочных материалов:



а также разложение силиката



Отметим, что лимитирующим фактором процесса является содержание в воде ионов кальция. После захоронения кальцита и опала в океанических осадках через зоны *субдукции* они попадают в мантию, где при высокой температуре происходит синтез исходных соединений:



которые в составе магматических пород возвращаются в литосферу (CaSiO<sub>3</sub> – минерал) и атмосферу (CO<sub>2</sub> – газ). Температурная стабилизация атмосферы в этом цикле происходит следующим образом. При увеличении атмосферной температуры повышается растворение кальция из поверхностных пород. Увеличение его концентрации в океане приводит к росту связывания растворенного углекислого газа и соответственно к уменьшению его

концентрации в атмосфере. Снижение концентрации парникового газа обеспечивает охлаждение атмосферы. Очевидно, что это медленный механизм, характерное время которого определяется геологическими процессами и составляет десятки миллионов лет.

В заключение еще раз перечислим основные каналы трансформации солнечной энергии в окружающей среде (в процентах):

Отражение .....	30
Переход в тепло .....	46
Испарение, осадки .....	23
Ветер, волны, течения .....	0,2
Фотосинтез .....	0,8

### 1.6.5. Вариации солнечной постоянной

Вариации интегрального потока солнечного излучения на орбите Земли в течение года от перигелия к афелию составляют менее 7 %. Для нашей эпохи характерен максимум излучения, поступающего в северное полушарие в январе. Для локального потока гораздо большее влияние имеет зависимость от широты места. Орбитальный и широтный эффекты обеспечивают сезонную климатическую изменчивость. Ответ на вопрос о постоянстве глобальной мощности поступающего от Солнца излучения имеет фундаментальное значение для экологического прогноза. До спутниковых экспериментов интегральный годовой поток солнечной энергии, падающий на любую площадку границы атмосферы, предполагался величиной постоянной (отсюда и термин «солнечная постоянная»). В конце 80–90-х гг. XX века эксперименты ERB (Earth Radiation Budget) на искусственных спутниках Земли Nimbus-7, SMM (Solar Maximum Mission) и UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) продемонстрировали циклические вариации величины солнечной постоянной амплитудой порядка 0,1 % и их корреляцию с изменением солнечной активности, рис. 1.12. Расхождения в абсолютной величине мощности объясняются различием в калибровке приборов. Внизу и по правой шкале представлено изменение среднегодового числа солнечных пятен ( $W$ ), характеризующее уровень солнечной активности, за те же годы.

Увеличение солнечного излучения за счет таких процессов выделения энергии, как факелы и протуберанцы, преобладает над частичным затенением поверхности Солнца областями пятен.

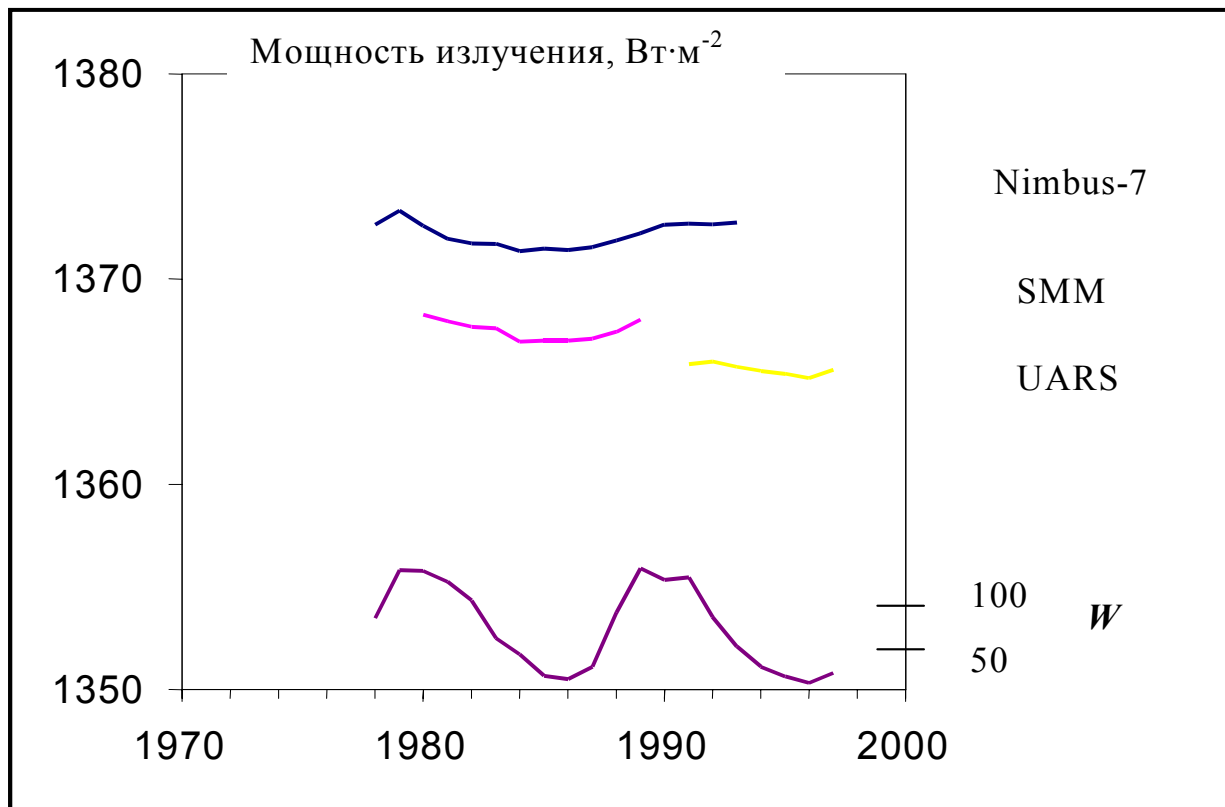


Рис. 1.12. Среднегодовые значения мощности солнечного излучения на орбите Земли по данным экспериментов на искусственных спутниках Земли

Существование и степень воздействия наблюдаемых вариаций солнечной постоянной на изменение климата остается предметом острых дискуссий: за говорят многочисленные совпадения, установленные в рядах чисел солнечных пятен и различных климатических величин (температура, количество осадков, градиент давления), против – непостоянство обнаруженных корреляций и, главное, отсутствие физического механизма, способного усилить ничтожное циклическое изменение солнечной постоянной до величины, необходимой, чтобы возмутить работу глобальной тепловой машины.

### 1.6.6. Поток внутреннего тепла через поверхность Земли

Средний поток тепла через поверхность литосферы  $F_{\text{тепл}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , причем пределы его изменений достаточно широки и составляют,  $10^{-6} \text{ Вт см}^{-2}$ : для континентов – (2–12), для океанов – (0,4–38). Вычислим полную тепловую мощность поверхности Земли: она составит  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ кВт}$ . К примеру, извержение вулкана Гекла в 1947 г. выбросило около  $6 \cdot 10^{17}$  кал тепла ( $\text{кал} \cdot \text{с}^{-1} = 4,2 \text{ Вт}$ ), что соответствует среднегодовой глобальной мощности  $8,3 \cdot 10^7 \text{ кВт}$ .

Т а б л и ц а 1.6

Радиоактивные источники энергии в литосфере

Нуклид	Энергия распада, МэВ·ат. <sup>-1</sup>	Удельное содержание, 10 <sup>-6</sup> г/г	Полная тепловая энергия, Дж·г <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>
<sup>238+235</sup> U	46	3,5	3
<sup>232</sup> Th	40	12	0,8
<sup>40</sup> K	0.7	3	10 <sup>-4</sup>

Приведем основные энергообразующие радионуклиды, их удельную мощность (табл. 1.6) и изменение содержания в веществе при движении вглубь Земли (рис. 1.13).

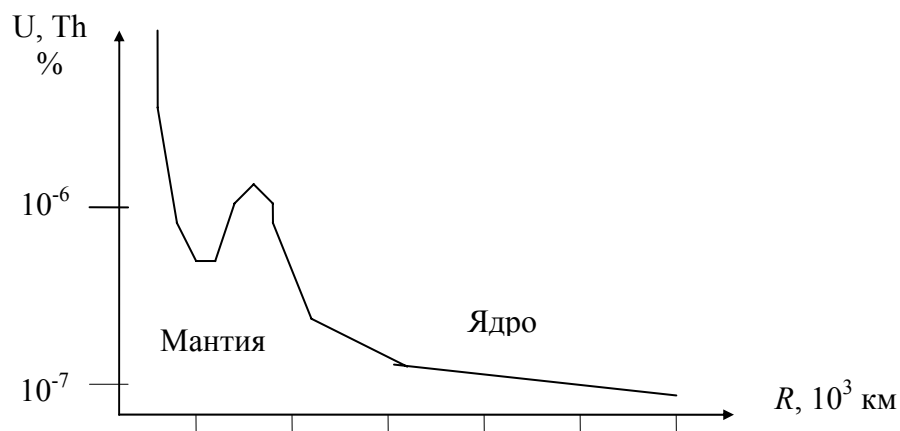


Рис. 1.11. Содержание энергообразующих радиоактивных элементов в недрах Земли.

Соотношение потока энергии от различных источников на поверхности Земли свидетельствует о безусловном преобладании среди природных источников солнечной энергии:

Источники	Поток тепловой энергии, Вт·м <sup>-2</sup>
Солнечная энергия .....	2,4 · 10 <sup>2</sup>
Термальные воды .....	0,1
Теплопроводность из недр .....	5 · 10 <sup>-2</sup>
Деятельность человека .....	1,5 · 10 <sup>-2</sup>
Приливное трение .....	10 <sup>-3</sup>
Вулканизм .....	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Космическое излучение .....	10 <sup>-5</sup>
Землетрясения .....	10 <sup>-7</sup>

Величина антропогенного производства энергии уже приблизилось к величине теплового потока из недр и при сохранении темпов роста потенциально сможет влиять на глобальный тепловой баланс.

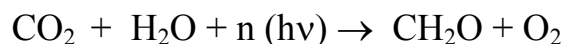
Ежегодное поступление в атмосферу газов и аэрозолей с поверхности Земли составляет 3 · 10<sup>15</sup> г, из них антропогенных – 3 · 10<sup>14</sup> г. При этом только 3 · 10<sup>10</sup> г – это ежегодный привнос на Землю взвешенного вещества.

### 1.6.7. Энергия и человеческая цивилизация

На Земле существует единственный природный процесс, при котором солнечная энергия не только потребляется или перераспределяется, но и связывается и запасается на длительный срок. Это биогенный механизм аккумуляции энергии – фотосинтез. У разных организмов он может протекать с использованием различных доноров (ДН<sub>2</sub>) и акцепторов (А) электронов и водорода:



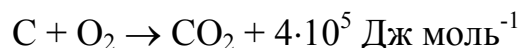
где АН<sub>2</sub> – продукты фотосинтеза. На поверхности Земли фотосинтез более чем наполовину осуществляется одноклеточными организмами, донорами электронов у которых служат либо органические вещества (молочная кислота, изопропиловый спирт и т.д.), либо неорганические соединения. Только меньшая доля углерода связывается высшими растениями по известной реакции



Теоретическое значение числа фотонов, необходимых для прохождения реакции, при длине волны 700 нм равняется 3, минимальное значение, полученное экспериментально лишь однажды – 4, что соответствует 75 % эффективности процесса. Большинство экспериментаторов в лабораторных опытах получали число фотонов больше 7, т.е. эффективность около 38 %. Эффективность фотосинтеза растений в природе намного ниже. Примерно 200 г·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> биомассы, синтезируемой дикорастущими растениями в среднем на поверхности Земли, непрерывно запасают около 0,12 Вт·м<sup>-2</sup> мощности. Принимая, что в США на производство продуктов питания на одного жителя затрачивается 2 кВт энергии, получаем, что при использовании 10 % площадей страны максимальное количество потребителей продуктов фотосинтеза (едоков) на ее территории могло бы составить более одного миллиарда человек. Конечно, реальная эффективность сельскохозяйственной деятельности гораздо ниже. Приведем данные о распределении земель Российской Федерации по способу их использования:

Вид земли	Площадь, млн. га (%)
Сельскохозяйственные угодья .....	222 (13)
Леса и кустарники .....	787 (46)
Болота .....	109 (6,4)
Оленьи пастбища .....	319 (18,7)
Строения, сооружения, дороги .....	13,5 (0,8)
Неиспользуемые .....	258,5 (15,1)
И т о г о .....	1709 (100)

Интенсивное земледелие повысило эффективность биологической трансформации энергии, но подлинная энергетическая революция была связана с потреблением ископаемого топлива, т.е. с использованием стратегического эволюционного запаса Земли:



В этом отношении нашей стране повезло: весьма значительная доля мировых ископаемых запасов приходится на ее территорию. При этом структура



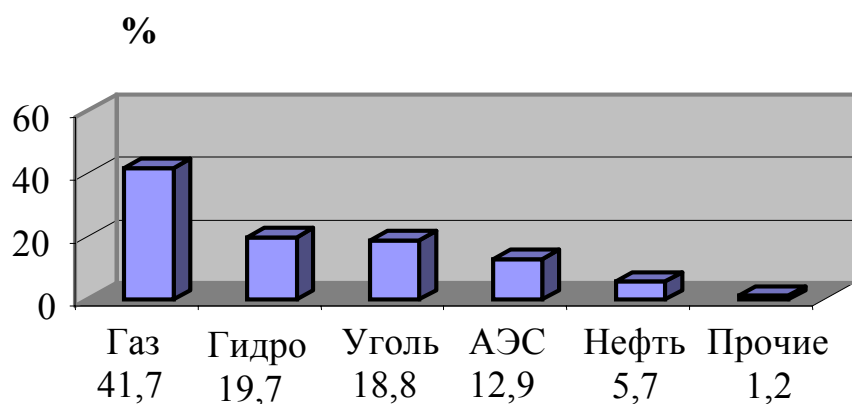


Рис. 1.12. Основные топливные составляющие производства энергии в России (1999)

производства энергии в России (табл. 1.7) вполне соответствует статусу промышленно развитой страны (рис. 1.14).

Т а б л и ц а 1.7

Душевое потребление энергии в России

Показатели	Годы			
	1990	1995	2000	2010 (прогноз)
Первичные энергоресурсы, т.у.т.	8,51	6,27	6,13	6,6 – 6,9
в том числе:				
• питание	1,87	1,36	1,24	1,3 – 1,4
• жилье	2,14	2,27	2,27	2,45 – 2,55
• транспорт	0,74	0,81	0,98	1,2 – 1,3
Электроэнергия, МВт.ч	7,25	5,67	5,83	6,85 – 7,4

(Источник: [http://www.eriras.ru/RU/enstrat2020/tab1\\_2\\_4.htm](http://www.eriras.ru/RU/enstrat2020/tab1_2_4.htm))

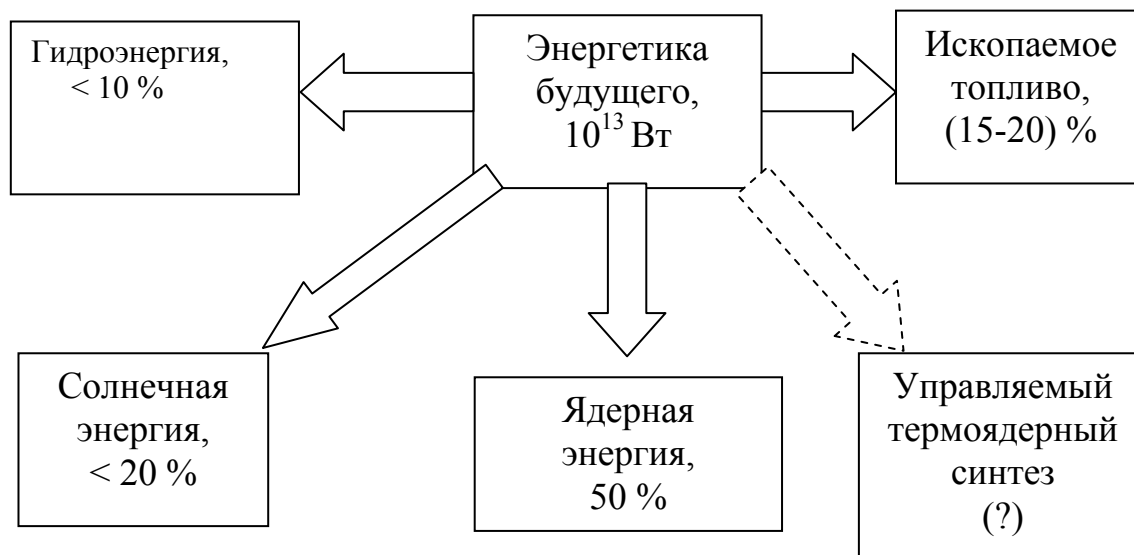


Рис. 1.15. Структура мировой энергетики в первой половине XXI в.

Наконец, последний вопрос. Что в перспективе ожидает искусственную энергетику на Земле? Футурологический ответ на этот вопрос (рис. 1.15.) дал один из специалистов по управляемому термоядерному синтезу (см. библиографический список). Ядерная энергетика остается главной перспективой до появления следующего воплощенного в технические решения и внедренного в практику источника.

## **2. Ядерная геофизика и геохронология**

Открытие явления радиоактивности в 1896 г. оказало мощное, хотя и неоднозначное влияние на развитие человеческой цивилизации. Однако с точки зрения научного развития оно, несомненно, имело прогрессивное значение. В частности, в науках о Земле оно привело к появлению ядерно-физических методов исследований. Присутствие радиоактивности в окружающей среде

предоставляет возможность определения абсолютного возраста материальных объектов и событий, а также использования радиоактивных меток для изучения скорости обменных процессов в геосфере.

Нуклиды – атомы, ядра которых содержат определенное число протонов и нейтронов.

Изотопы – нуклиды с одинаковым числом протонов.

Изотоны – нуклиды с одинаковым числом нейтронов.

Изобары – нуклиды с одинаковым суммарным числом протонов и нейтронов.

На сегодняшний день известно 113 химических элементов ( $1 \leq Z \leq 109$ , а также  $Z = 110, 112, 114, 116$ ), среди них 81 элемент со стабильными изотопами (самый тяжелый –  $^{209}\text{Bi}^{83}$ ) и 32 полностью радиоактивных элемента; всего около 300 стабильных и более 1200 радиоактивных нуклидов. Отсутствуют стабильные изобары с  $A = 5$  и 8.

Элементы с  $Z \geq 94$ , т.е. за плутонием, синтезированы искусственно. Последние из получивших официальные названия элементов:

104 – резерфордий (Rutherfordium, Rf);

105 – дубний (Dubnium, Db);

106 – сиборгий (Seaborgium, Sg);

107 – борий (Bohrium, Bh);

108 – хассий (Hassium, Hs);

109 – мейтнерий (Meitnerium, Mt).

### Единицы измерения радиоактивности

Мера радиоактивности – **активность** – равна числу спонтанных распадов в единицу времени\*. Ранее используемая единица – грамм-эквивалент радия (активность 1 г  $^{226}\text{Ra}$ ) соответствует 1 кюри (Ки) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  расп.·с<sup>-1</sup>. В системе СИ принята единица активности беккерель (Бк), равная расп.·с<sup>-1</sup>.

---

\* Определения, используемые в тексте, могут отличаться от принятых стандартов, что, на взгляд автора, допустимо в учебном пособии. Стандартные определения следует искать в НРБ-99 (Нормы радиационной безопасности 1999 г.), см., например,

<http://www.rosatom.ru/stations/document/nrb-99>,

или любом недавно изданном учебнике по дозиметрии.

## 2.1. Основы дозиметрии

Напомним физические величины, используемые для описания падающего на мишень излучения:

- интегральный поток;
- энергетический спектр;
- спектральная мощность.

Для установления связи между характеристиками излучения и производимым биологическим эффектом они не подходят, для этого используются специальные дозиметрические величины.

**Поглощенная доза ( $D$ )** – это средняя энергия ионизирующего излучения, поглощенная единичной массой вещества. Физическое основание: при  $E \leq 10$  МэВ радиационные эффекты в веществе пропорциональны энергии, поглощенной веществом.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

В СИ 1 Гр (грей) = 1 Дж·кг<sup>-1</sup>

Внесистемная единица, использовавшаяся ранее: 1 рад = 100 эрг·г<sup>-1</sup> = 0,01 Гр.

Такая характеристика неудобна для использования на практике, так как зависит от вида излучения (для  $\gamma$ -излучения рассчитать легко, но для  $\beta$ -излучения – это прямая ионизация плюс часть тормозного излучения, для нейтронов – ядра отдачи плюс гамма от (n,  $\gamma$ ) и т.д.), а также от геометрии, состава вещества и пр.

**Экспозиционная доза** облучения была введена, как мера удельной ионизации воздуха фотонным излучением. Ранее используемая единица экспозиционной дозы носит название **рентгена**. Один рентген (Р) соответствует дозе рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, создающего в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при стандартных условиях ионы в одну электростатическую единицу заряда каждого знака.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$$

В СИ: 1 Кл·кг<sup>-1</sup> (не нашла практического применения).

Ионизационный эффект от дозы в 1 Р соответствует объемной ионизации в  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов в одном см<sup>3</sup> воздуха. Понятно, что интенсивность другого вида излучения, способного привести к тому же результату, будет отличаться

от фотонного. Оценим поглощенную при этом дозу: средняя энергия для ионизации молекулы воздуха (фотодиссоциация плюс атомарная ионизация) составляет  $E_{\text{ион.возд.}} \approx 33,8$  эВ. Тогда

$$1 \text{ Р} \approx 0,11 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3} = 87,3 \text{ эрг} \cdot \text{г}^{-1} \Rightarrow 1 \text{ Р} \approx 1 \text{ рад}$$

Связь дозы облучения с потоком излучения – вопрос сложный, но для излучения в рентгеновском диапазоне энергии (0,07 - 2) МэВ

$$1 \text{ Р} \approx 2 \cdot 10^9 / E \text{ (МэВ)} \text{ фотонов} \cdot \text{см}^{-2}$$

Оценка биологических эффектов воздействия ионизирующего излучения произвольного состава потребовало введения новой характеристики – эквивалентной дозы. Но сначала рассмотрим еще несколько необходимых определений.

**Доза в органе или ткани ( $D_T$ )** – это средняя поглощенная доза для органа или ткани массой  $m_T$

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D dm$$

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения ( $W_R$ ): фотоны любых энергий, электроны ( $e^+$ ,  $e^-$ ), мюоны – 1; нейтроны ( $E < 10$ кэВ и  $E > 20$  МэВ), протоны ( $E > 2$  МэВ) – 5; нейтроны ( $10$  кэВ  $< E < 100$  кэВ и  $2$  МэВ  $< E < 20$  МэВ) – 10; нейтроны ( $100$  кэВ  $< E < 2$  МэВ),  $\alpha$ -частицы и ядра тяжелее  $\alpha$  – 20.

**Эквивалентная доза ( $H_{T,R}$ )** – это доза, поглощенная в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешенный коэффициент:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_T$$

При воздействии различных видов излучения эквивалентная доза определяется как сумма парциальных эквивалентных доз. В СИ эквивалентная доза измеряется в **зивертах (Зв)**. Она численно получится в зивертах, если поглощенная доза была выражена в греях. Внесистемной единицей является **бэр** (биологический эквивалент рада):

$$1 \text{ бэр} = D_T \text{ (рад)} \cdot W_R;$$

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}.$$

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов ( $W_T$ ): гонады – 0,2; костный мозг, кишечник, легкие, желудок – 0,12; пищевод, печень, щитовидная

и грудная железы, мочевого пузыря – 0,05; кожа, клетки костных поверхностей – 0,01; остальное – 0,05.

**Доза эффективная (Q)** – величина, используемая как показатель меры риска при облучении. Она равна сумме произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на их взвешенные коэффициенты

$$Q = \sum_T W_T \cdot H_T$$

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв). Для групп людей используется *коллективная эффективная доза*.

**Биологическое действие излучения** происходит через повреждение органических макромолекул двумя способами: 1) прямым, при котором ядерная частица разрушает сами молекулы; характерно для тяжелых ядер; 2) косвенным; более универсальный; излучение производит радиолиз воды, продукты которого – свободные радикалы (ОН, Н, НО<sub>2</sub>) – обладают повышенной химической активностью. Минимальная смертельная, т.е. приводящая к гибели 50 % особей данного вида, поглощенная доза варьируется от 0,5 Гр для икринок аквариумных рыб до десятков тысяч грей для некоторых видов бактерий.

Ионизирующая радиация при воздействии на человека может вызвать два вида поражений. Один из них имеет пороговый характер и является детерминированным. Это значит, что при дозе, превышающей определенный порог, тяжесть эффекта (лучевая болезнь, лучевое поражение) прямо пропорциональна дозе. Действие различных доз на людей:

Доза, Гр	Действие на человека
0,2 – 0,5	.... Возможны изменения состава крови
0,5 – 1	..... Изменения состава крови. Повреждения органов
1 – 2	..... Повреждения органов. Возможная потеря трудоспособности
2 – 4	..... Нетрудоспособность. Возможная смерть
3	..... Смертность 50 %
6	..... Смертность 100 %

Исследования показали особенно высокую биологическую эффективность радиационного действия тяжелых ионов на организм человека, а именно отсутствие восстановления радиационных повреждений на

молекулярном уровне и функциональные повреждения при остановке ионов в нервных тканях. При достаточно большой дозе облучения гибнет любой организм. Дозы ниже смертельной вызывают различные заболевания, объединенные термином “лучевая болезнь”.

Второй вид поражения, по мнению ряда специалистов, может носить беспороговый стохастический характер. При этом тяжесть вредных эффектов, таких как лейкозы, опухоли различных органов, сокращение продолжительности жизни, генетические повреждения, не зависит прямо от величины полученной дозы облучения. Совершенно очевидно, что для конкретного человека, у которого уровень лучевого воздействия был ниже порогового уровня, практически невозможно установить связь между дозой облучения и появлением в дальнейшем, скажем, лейкемии. Поэтому оценка вероятности отдаленных последствий (через 10–20 лет и более) устанавливается из статистики этих эффектов по большим выборкам населения или персонала, связанного с повышенными рисками.

Эмпирически установлено, что разрушающее биологическое действие излучения удается существенно ослабить введением в организм до облучения некоторых органических веществ (серосодержащие, спирты и т.д.). Как правило, эти вещества сильные антиоксиданты.

Для стандартизации контроля безопасности жизни населения и работы персонала, связанного с источниками излучений, введены государственные стандарты на **предел дозы (ПД)**, объединенные в **Нормы радиационной безопасности (НРБ)**. В настоящее время в России действующими являются НРБ-99. В соответствии с ними предел эквивалентной дозы для населения составляет 1 мЗв в год в среднем за любые пять лет, но не более 5 мЗв в год.

## **2.2. Радиоактивность в окружающей среде**

Радиоактивность, наблюдаемая сегодня на Земле и оказывающая радиационное воздействие на биосферу, в том числе и на человека, может быть подразделена на **природную** и **искусственную** (антропогенную). Природная радиоактивность, существовавшая до появления в физике и технике способов производства ядерных реакций, может быть первичной, т.е. обеспеченной исходным составом протопланетного вещества, и космогенной, т.е. образованной под действием космических лучей.

### 2.2.1. Долгоживущие первичные нуклиды

Из синтезированных в звездах радионуклидов до настоящего времени могли сохраниться только те, период полураспада которых соизмерим с возрастом Земли. Перечислим их.

Три радиоактивных семейства:

- ряд урана  $(4k + 2)$ ;  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ;  $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет;
- ряд актиноурана  $(4k + 3)$ ;  $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ ;  $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$  лет;
- ряд тория  $(4k)$ ;  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ ;  $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  лет.

Одиночные ядра:

- $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}, ^{40}\text{Ar}$ ;  $T_{1/2} = 1,25 \cdot 10^9$  лет;
- $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ ;  $T_{1/2} = 4,9 \cdot 10^{10}$  лет.

Пример распада первоначально присутствовавших в природном веществе изотопов представляют собой вымершие (реликтовые) нуклиды. Это, в частности,  $^{43}\text{Tc}$  (технеций) и  $^{61}\text{Pm}$  (прометий) – оба до границы стабильности, а также  $^{129}\text{I}$ , реликтовое семейство ряда нептуния:  $(4k + 1)$ ;  $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$ ;  $T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$  лет и многие другие – за границей стабильности.

### 2.2.2. Космические лучи и космогенная радиоактивность

Земля, как космический объект, подвергается постоянному облучению потоком частиц релятивистских энергий, ускоренных за пределами Солнечной системы. Эти частицы называются космическими лучами (КЛ). Они на 99 % состоят из ядер химических элементов, причем доминируют водород (87 %) и гелий ( $\alpha$ -частицы, 12 %). Интенсивность КЛ снижается от границы в глубь атмосферы, и на поверхности Земли они сами и продукты их ядерных взаимодействий обеспечивают примерно пятую часть полного радиационного фона. Максимальная энергия ядра КЛ может достигать гигантской для микромира величины, превышающей  $10^{20}$  эВ (т.е. более 16 Дж на ядро!), но поскольку доля частиц с энергией, превышающей заданную, падает в КЛ примерно как обратный квадрат энергии, то только два таких ядра приходит на Землю каждую секунду. Помимо постоянного потока КЛ, Земля время от времени подвергается облучению частицами, ускоряемыми в активных процессах на Солнце, так называемыми солнечными энергичными частицами. Однако их средние энергии гораздо меньше средней энергии КЛ. Радиационное



воздействие солнечных энергичных частиц представляет опасность для космонавтов, но благодаря экранированию атмосферы не опасно для жителей Земли.

Основной вклад в дозу облучения на уровне моря вносят мюоны. Соответствующая эффективная доза составляет 270 мкЗв в год. На высотах, используемых для полетов самолетов гражданской авиации, радиационные эффекты существенно увеличиваются. Облучение производится преимущественно нейтронами, с дополнительным вкладом электронов и протонов, и эффективная доза облучения составляет приблизительно 5 мкЗв в час.

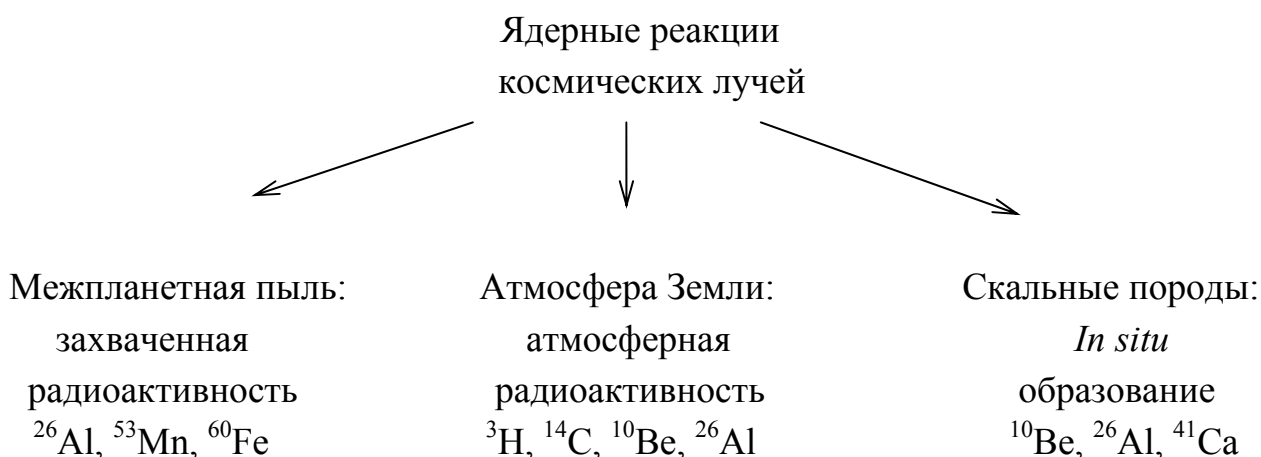


Рис. 2.1. Объекты образования космогенных нуклидов в окружающей среде

Т а б л и ц а 2.1

Биологически важные космогенные радионуклиды в атмосфере Земли

Радионуклид	Период полураспада, лет	Скорость образования, ат. $\cdot$ м <sup>-2</sup> $\cdot$ с <sup>-1</sup>	Концентрация, Бк $\cdot$ м <sup>-3</sup>
$^3\text{H}$	12,33	2500	1,4
$^{14}\text{C}$	5730	22000	56
$^{22}\text{Na}$	2,6	0,86	0,0021
$^{32}\text{P}$	0,039	8,1	0,27

При взаимодействии космических лучей с ядрами элементов, составляющих окружающую среду, происходят ядерные реакции с образованием новых нуклидов, называемых космогенными (рис. 2.1). Среди космогенных нуклидов есть и радиоактивные, причем, если их период полураспада значительно меньше возраста Земли, этот источник является для них основным.

В табл. 2.1 представлены атмосферные концентрации космогенных радиоактивных нуклидов, участвующих в биохимических реакциях.

### 2.2.3. Природная радиоактивность атмосферы

Природная радиоактивность нижней атмосферы прямо определяется концентрацией радиоактивных газов, входящих в радиоактивные ряды уранов и тория, и косвенно – концентрацией материнских радиоактивных нуклидов в литосфере. Так называемый аэрозольный, т.е. пылевой компонент воздуха обладает меньшей активностью.

Пример: оцените воздушную концентрацию радия ( $^{226}\text{Ra}$ ), входящего в состав атмосферного аэрозоля (микрочастинок):

$$n_{\text{пыли}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$$

$$n_{\text{Ra}} \approx 1.7 \cdot 10^{-12} \text{ г/г пыли}$$

$$A_{\text{Ra}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \cdot 1.7 \cdot 10^{-12} \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \approx 1.9 \cdot 10^{-11} \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3} \approx 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$$

Эту величину сравните с концентрацией газообразного элемента из ураноториевых семейств – радона (см. раздел 2.2.4).

Помимо первичных дочерних нуклидов в атмосфере присутствует космогенный радиоуглерод ( $^{14}\text{C}$ ) в составе углекислого газа. Его равновесная концентрация обеспечивается балансом образования и перехода в океан и биосферу. Современное изотопное отношение  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  составляет  $1.2 \cdot 10^{-12}$ , что создает эффективную дозу облучения 12 мкЗв в год.

### 2.2.4. Перенос радона в атмосфере

Радон ( $\text{Rn}^{86}$ ) имеет три радиоактивных изотопа, присутствующих в атмосфере:

$$^{222}\text{Rn} \text{ (радон); } T_{1/2} = 3,8 \text{ дня} = 3.3 \cdot 10^5 \text{ с;}$$

$^{219}\text{An}$  (актинон);  $T_{1/2} = 4$  с;

$^{220}\text{Tn}$  (торон);  $T_{1/2} = 52$  с.

Часто, в связи с низкой концентрацией  $^{235}\text{U}$  и малым временем жизни актинона, его вкладом в атмосферную радиоактивность пренебрегают. Источником атмосферного радона являются его материнские радиоактивные ядра в подповерхностных породах, а механизмом переноса в атмосферу – капиллярная диффузия через почвенный слой. Известно, что концентрация радона в почве увеличивается с глубиной, причем на глубине нескольких метров она на несколько порядков выше, чем у поверхности. Попробуем получить этот результат из простой модели. Пусть  $C(z)$  – концентрация радона на глубине  $z$  метров под поверхностью. Тогда уравнение одномерной диффузии (первый закон Фика) будет выглядеть так:

$$\frac{\partial C(z)}{\partial t} = D \cdot \Delta C(z) + Q - \lambda \cdot C(z),$$

где  $D$  – эффективный коэффициент диффузии в градиенте концентрации, учитывающий тип почвы, ее влажность и т.д.,  $Q$  – мощность источника, а  $\lambda$  – постоянная (обратное время жизни) радиоактивного распада.

Граничное условие

$$C(z = 0) = C_0 \tag{2.1}$$

В стационарном случае (2.1) переписывается в виде

$$\frac{d^2 C(z)}{dz^2} = \frac{\lambda}{D} C(z) - \frac{Q}{D},$$
$$C(z) = \frac{Q}{\lambda} \left[ 1 - \exp\left(-z \sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \right] + C_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)$$

Известно (рис. 2.2), что  $Q/\lambda \gg C_0$ . Тогда

$$C(z) = \frac{Q}{\lambda} \left[ 1 - \exp\left(-z \sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \right].$$

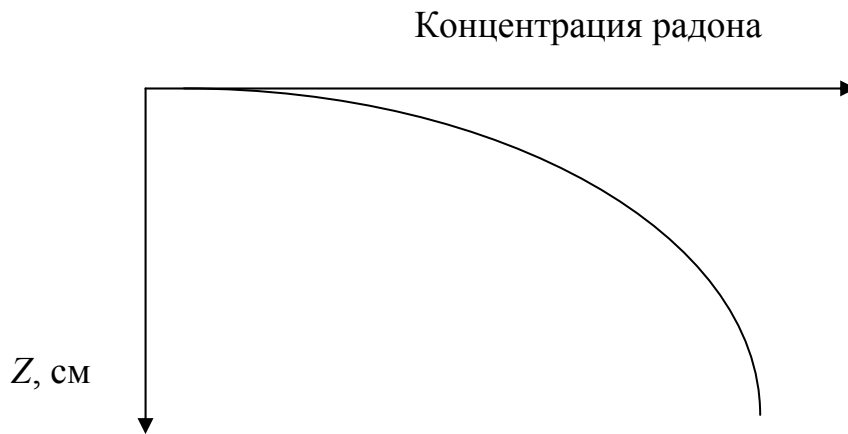


Рис. 2.2. Относительное изменение концентрации радона в приповерхностном слое почвы

**Эксхалция ( $E$ )** – это поток (количество эманации с единицы поверхности в единицу времени). Согласно второму закону Фика

$$E = \left\{ D \frac{dC(z)}{dz} \right\}_{z=0} = Q \sqrt{\frac{D}{\lambda}} .$$

Природные концентрации урана и тория в литосфере:

Элемент	Концентрация, Бк·см <sup>-3</sup>
<sup>238</sup> U .....	3,7·10 <sup>-2</sup>
<sup>235</sup> U .....	1,9·10 <sup>-3</sup>
<sup>232</sup> Th .....	3,7·10 <sup>-2</sup>

Значение коэффициента диффузии для оценок можно принять  $D = 0.005 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , тогда численная оценка содержания радона в окружающей среде будет такой:

Содержание в почве, Бк·см <sup>-3</sup> .....	1,1·10 <sup>-2</sup>
Эксхалция, Бк·см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> .....	3,3·10 <sup>-6</sup>
Содержание в приземном воздухе, Бк·см <sup>-3</sup> .....	≈ 10 <sup>-5</sup>

Последующий атмосферный перенос от поверхности определяется турбулентной диффузией в пограничном слое с коэффициентом диффузии  $K \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Эта величина подходит лишь для грубых оценок, так как сильно зависит от высоты.

Радон попадает внутрь живых организмов при дыхании. Основное радиационное действие на людей оказывает  $\alpha$ -радиация, возникающая от его короткоживущих дочерних продуктов (КДП), оседающих после распада радона в верхних дыхательных путях. Хотя увеличение риска профессиональных заболеваний у шахтеров, связанного с повышенным содержанием радона, было хорошо известно, его влияние на облучение на поверхности долго не учитывалось. Радон привлек к себе внимание радиологов в конце 70-х г. прошлого столетия, когда выяснилось, что от половины до двух третей эквивалентной дозы облучения населения обеспечивается его радиоактивностью.

Скрытая энергия – это суммарная энергия  $\alpha$ -излучения, выделяемая КДП в единице объема воздуха. Для  $^{220}\text{Rn}$  величина  $3700 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  воздуха  $\approx 1,3 \text{ МэВ} \cdot \text{л}^{-1}$  носит название «рабочий уровень» («working level»).

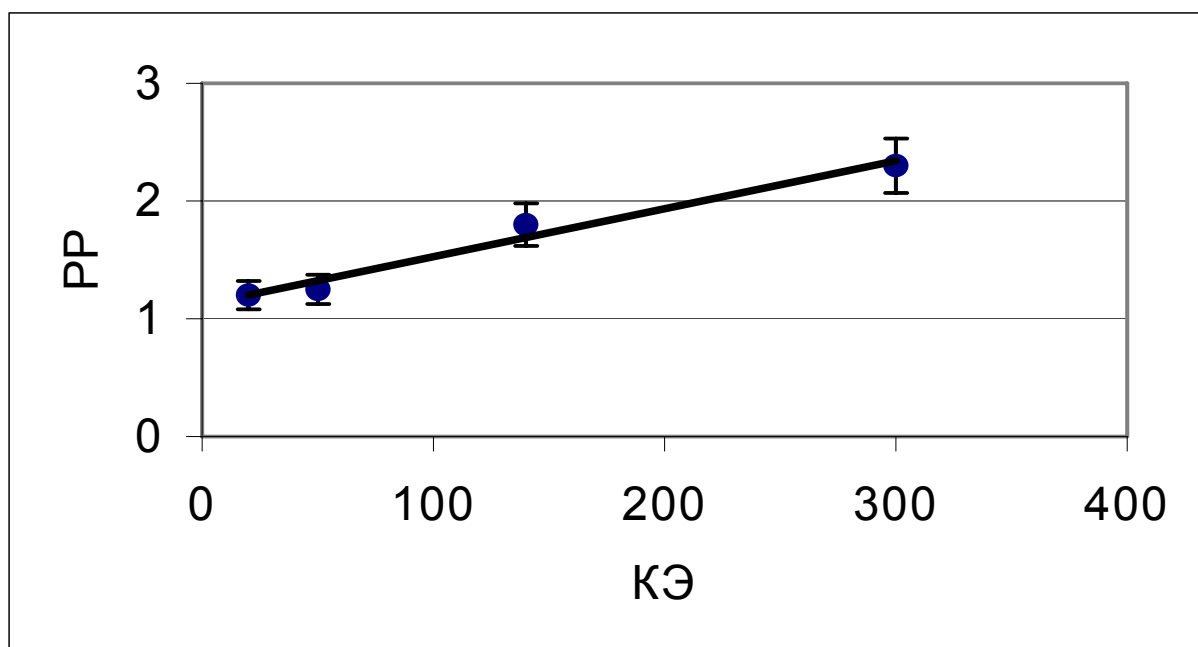


Рис. 2.2. Риск рака легких в зависимости от кумулятивной экспозиции в Беккерелях на кубический метр по данным М.В. Жуковского и И.В. Ярмошенко [1997]

В действующем НРБ-99 предельно допустимая концентрация радона для жилых помещений составляет  $200 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Относительный риск рака легких (РР) в зависимости от кумулятивной экспозиции в беккерелях на кубический метр (КЭ) аппроксимируется линейно (рис. 2.3):

$$PP = 1 + 0.0049 \cdot \text{КЭ}.$$

Т.е. создается впечатление, что предельно допустимая концентрация обеспечивает увеличение ракового риска в два раза. Однако все действующие дозиметрические модели созданы на основе данных о профессиональном облучении шахтеров, работавших на урановых рудниках, и не распространяются на область малых доз. Опубликованные к концу 90-х гг. прошлого века экспериментальные данные, посвященные зависимости появления рака легких от концентрации радона в жилищах, не подтверждают радиационный канцерогенез при малых дозах облучения от радона.

В заключение приведем данные о наличии источников естественной радиоактивности, в том числе облучения от КЛ в среднестатистическую эффективную дозу, приходящуюся на одного жителя Земли:

Источник облучения	Годовая эффективная доза, мЗв
Космические лучи:	
• облучение .....	0,38
• космогенные радионуклиды .....	0,01
<b>И т о г о</b> .....	<b>0,39</b>
Внешнее $\gamma$ -облучение:	
• вне помещений .....	0,07
• внутри помещений .....	0,41
<b>И т о г о</b> .....	<b>0,48</b>
Облучение от радиоактивности, содержащейся внутри организма .....	
	<b>0.29</b>
Облучение от изотопов радона:	
• радон .....	1,15
• торон .....	0,10
<b>И т о г о</b> .....	<b>1,25</b>
<b>Полная эффективная доза</b> .....	<b>2,4</b>

Еще раз уточним, что разброс индивидуальных доз от Антарктиды до Индии и Бразилии составляет почти три порядка этой величины. Обычно высокие значения обусловлены особым составом почв. Например, в Бразилии известны пляжи с черным песком, обогащенным торием и ураном. На них фон достигает 50 мкГр в час, что почти в 400 раз превышает среднее глобальное значение. Сходное по происхождению нагорье существует юго-восточном побережье Индии.

### 2.2.5. Природный ядерный реактор в Окло (Габон)

На вопрос, когда и где на Земле впервые имела место самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция, наиболее эрудированные читатели ответят, что случилось это в 1942 г. в Чикаго, в знаменитой лаборатории Энрико Ферми. И будут неправы, так как около двух миллиардов лет назад это уже происходило в Восточной Африке.

Условием незатухающей цепной реакции в ядерном топливе является выполнение условия  $k \geq 1$ , где  $k$  – это отношение числа вторичных нейтронов к первичным. Для больших реакторов

$$k = k_{\infty} P,$$

где  $P$  – вероятность того, что нейтрон не покинет рабочее тело реактора при своем замедлении,  $k_{\infty}$  – коэффициент размножения в бесконечном объеме.

Отсюда получается условие  $k_{\infty} > 1$ . В естественной смеси урана доля  $^{235}\text{U}$  составляет только 0,72 %, а остальное приходится на  $^{238}\text{U}$ , способный лишь на радиационный захват замедляющихся нейтронов. Пусть  $\sigma_{\gamma}$  и  $\sigma_f$  – сечения радиационного захвата и захвата с делением для нейтронов,  $I_{\gamma}$  и  $I_f$  – резонансные интегралы для радиационного захвата и деления:

$$I_i = \int \sigma_i(E) \frac{dE}{E}.$$

Величина  $\nu_f$  – это число вторичных нейтронов на деление от теплового нейтрона (табл. 2.2). Число вторичных нейтронов, образующихся при захвате теплового нейтрона в природном уране

$$\eta = \frac{\nu \cdot \xi \cdot \sigma_f^{U5}}{\sigma_n^U},$$

где  $\xi$  – отношение концентрации уранов  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $\sigma_n^{\text{U}}$  – полное сечение поглощения нейтрона ураном

$$\sigma_n^{\text{U}} = (1 - \xi) \cdot \sigma_{\gamma}^{\text{U8}} + \xi \cdot (\sigma_{\gamma}^{\text{U5}} + \sigma_f^{\text{U5}})$$

Т а б л и ц а 2.2

Характеристики захвата нейтронов изотопами урана и плутонием

Элемент	$^{235}\text{U}$ (U5)	$^{238}\text{U}$ (U8)	$^{239}\text{Pu}$
$\tau$ , лет	$1,0 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^4$
$\sigma_{\gamma}$ , б	98	2,7	270
$\sigma_f$ , б	580	–	740
$I_{\gamma}$	144	275	200
$I_f$	275	–	300
$\nu_f$	2,4	–	2,9

При  $\xi = 0,720\%$   $\eta = 1,34$ . Однако для нейтронов деления  $E_f = 2$  МэВ, чтобы избежать их захвата на U8, необходимо в составе топлива иметь замедлитель (модератор). Замедлителем могут быть  $\text{D}_2\text{O}$ , C, Be и BeO. Но хорошие замедлители одновременно являются и хорошими поглотителями тепловых нейтронов. При оптимальном соотношении концентрации природного урана и обычной воды коэффициент размножения  $k_{\infty}$  меньше 1, но очень близок к ней. Важно, что увеличение  $\xi$  от 0,72 до 3 % повышает  $\eta$  с 1,34 до 1,83. Но 2 млрд. лет назад содержание U5 в уране как раз и составляло 3 % и, значит, для смеси урана и воды могли создаваться условия поддерживаемого термоядерного синтеза.

**Открытие.** 7 июня 1972 г. на обогатительном комбинате во Франции при масс-спектрометрическом контроле руды техники получили  $\xi = 0,717\%$  вместо 0,720 %. В результате проверок было обнаружено, что причиной отклонения была руда из Окло (Габон) со средней концентрацией U5, пониженной до 0,64%. Общий дефицит U5 в добытой в Окло руде составил примерно 200 кг.

**Результаты исследований.** Возраст урановых отложений по урано-свинцовой датировке (см. разд. 2.3.2) составил  $1,8 \cdot 10^9$  лет. Отложения,



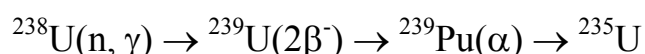
обогащенные ураном, толщиной (4–10) м и длиной (600–900) м образовались в дельте древней реки. В результате тектонических процессов отложения погрузились на несколько километров под скальную породу, при этом в слой проникли подземные воды. Подъем «реактора» на современный уровень залегания произошел несколько десятков миллионов лет назад. Примерный объем древнего «реактора» – несколько кубических метров. Эта зона реакций по мере истощения топлива продвигалась по области залегания урана. Убедительным доказательством протекания цепных реакций служат данные о результирующем соотношении изотопов неодима (Nd) в породах (табл. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3

Содержание изотопов неодима

Содержание, %	142	143, 144	145, 146	148
Природный	27	36	25,5	5,7
От деления U5	0	55,2	33,5	8,2
Руда Окло	0	54,95	33,46	8,25

Длительность протекания реакции определялась по флюенсу нейтронов:



Из данных о концентрации плутония можно получить величину длительности работы «реактора» –  $0,23 \cdot 10^6$  лет.

Полная энергия, выделенная природным реактором, оценена в  $1,5 \cdot 10^4$  МВт·год, что соответствует работе двух энергоблоков ЛАЭС в течение 2,3 лет, т.е. среднее энерговыделение составляло 25 КВт. «Реактор» имел отрицательный температурный коэффициент, т.е. при повышении скорости реакции увеличивалась температура, и вода из связанного состояния в окружающих породах переходила в свободное и гасила реакцию.

## Следствия

1. Возможность обеспечить надежное хранение отходов ядерного топлива. За миллиарды лет из области хранения были потеряны только изотопы инертных газов Кг и Хп.

2. Весьма спекулятивное предположение о возможном воздействии повышенной радиации от «реактора» на биологическую эволюцию.

### **2.3. Искусственная радиоактивность**

Открытие явления радиоактивности было достижением ученых, производство ядерного оружия – решением политиков. Для большинства людей началом ядерной эпохи стали ядерные взрывы над японскими городами в конце Второй мировой войны.

#### Хиросима

6 августа 1945 г. бомбардировщик США В-29, пилотируемый капитан-лейтенантом Паулем Тиббетом, сбросил на город Хиросима атомную бомбу «Little Boy» мощностью 12,500 т ТНТ эквивалента. Бомба взорвалась на высоте 580 м над университетской больницей «Hospital Shima». Число жертв (убитые и быстро умершие раненые) составило 140 тыс. человек.

Бомба имела длину около 3 м, диаметр 0,7 м, вес 3,6 т. Принцип действия: заряд подкритической массы  $^{235}\text{U}$  влетал в  $^{235}\text{U}$  мишень. Бомба была уникальной, т.е. изготовленной в единственном экземпляре.

#### Нагасаки

9 августа 1945 г. экипаж другого бомбардировщика В-29 сбросил бомбу «Fat Man» на основе  $^{239}\text{Pu}$  мощностью 22,000 т ТНТ эквивалента на город Нагасаки. Бомба взорвалась на высоте 500 м, унеся жизни 70 тыс. человек. Аналогичное бомбе взрывное устройство было предварительно испытано 16 июня 1945 г. в пустынном районе штата Нью-Мехико.

К середине 80-х гг. прошлого века число облученных и выживших жителей Хиросимы и Нагасаки составляло 60 тыс. и 30 тыс. человек соответственно. С научной точки зрения они представляли собой уникальный объект для изучения воздействия радиации на человека. Целью исследований является создание дозиметрической системы, т.е. установление количественной взаимосвязи индивидуальной дозы и вероятности развития определенного

---

При написании этого раздела использовались материалы докладов Научного комитета по эффектам атомной радиации ООН (UNSCEAR) 2000 и 2001 гг. (<http://www.unscear.org>).

заболевания. По Хиросиме проблема заключается в отсутствии информации о полях ионизирующих излучений, в основном нейтронов, воздействовавших на людей. Для восстановления данных о радиационной дозе от взрыва в Хиросиме в начале 1960-х в Неваде была даже построена 480-метровая башня, на которой установили незащищенный работающий реактор. Регистрировалось пространственное распределение потока нейтронов. Однако спектры нейтронов при взрыве и при контролируемом делении различны. Дозиметрическая система по содержанию долгоживущих радиоактивных ядер, образованных при взрыве в стенах домов, каменных плитах и других материальных свидетелях трагедии, для Хиросимы продолжает уточняться.

За исключением боевого применения ядерного оружия, основными искусственными источниками радиоактивности являются производство и испытания этого оружия в рамках доктрины взаимного сдерживания, ядерная энергетика, производство и применение радиоактивных изотопов.

### 2.3.1. Испытание и производство ядерного оружия

Испытания ядерного оружия в атмосфере, проходившие в 1945–1980 гг., привели к выбросу в окружающую среду радиоактивных продуктов деления и синтеза, явившихся наиболее мощным искусственным источником облучения (табл. 2.4).

Т а б л и ц а 2.4

Атмосферные ядерные испытания.

Испытания	Страна (полигон)				
	США (Невада)	СССР (Семипалатинск, Новая Земля)	Англия (Мари- линг)	Франция (Муруроа)	Китай (Лобнор)
Число	197	219	21	45	22
Мощность, Мт	154	247	8	10	21

Всего было взорвано 534 ядерных устройства общей мощностью 440 Мт ТНТ (мегатонн ТНТ – весовой эквивалент условного взрывчатого вещества

тринитротолуола). Самый мощный взрыв в 50 Мт был проведен СССР на Новой Земле в октябре 1961 г.

Радиоактивные продукты испытаний присутствовали в глобальных выпадениях в значительных концентрациях на протяжении десятков лет. Наиболее важные с дозиметрической точки зрения нуклиды представлены в табл. 2.5.

Т а б л и ц а 2.5

Глобальный выброс дозиметрически важных радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада, лет	Выход при делении, %	Глобальный выброс, ПБк*
$^3\text{H}$	12,33		186 000
$^{14}\text{C}$	5730		218
$^{90}\text{Sr}$	28,78	3,5	626
$^{91}\text{Y}$	0,16	3,76	120 000
$^{131}\text{I}$	0,02	2,9	675 000
$^{137}\text{Cs}$	30,07	5,57	948
$^{239}\text{Pu}$	24 100		6,52

Максимальное загрязнение окружающей среды происходило до 1963 г., т.е. до подписания Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере. Испытания, проводившиеся после 1963 г. не подписавшими договор странами, в основном Францией и Китаем, практически не оказали негативного дополнительного воздействия на окружающую среду. Значительная доля выброшенной радиоактивности попадала в стратосферу и затем, независимо от точки инъекции, возвращалась на поверхность Земли в виде глобальных выпадений. После прекращения атмосферных взрывов в 1963 г. происходит самоочищение атмосферы (пик 1986 г. вызван Чернобыльской катастрофой).

Оценка локальной плотности выпадения радиоактивности и соответствующих эквивалентных доз облучения населения производилась

---

\* Петабеккерелей =  $10^{15}$  Бк

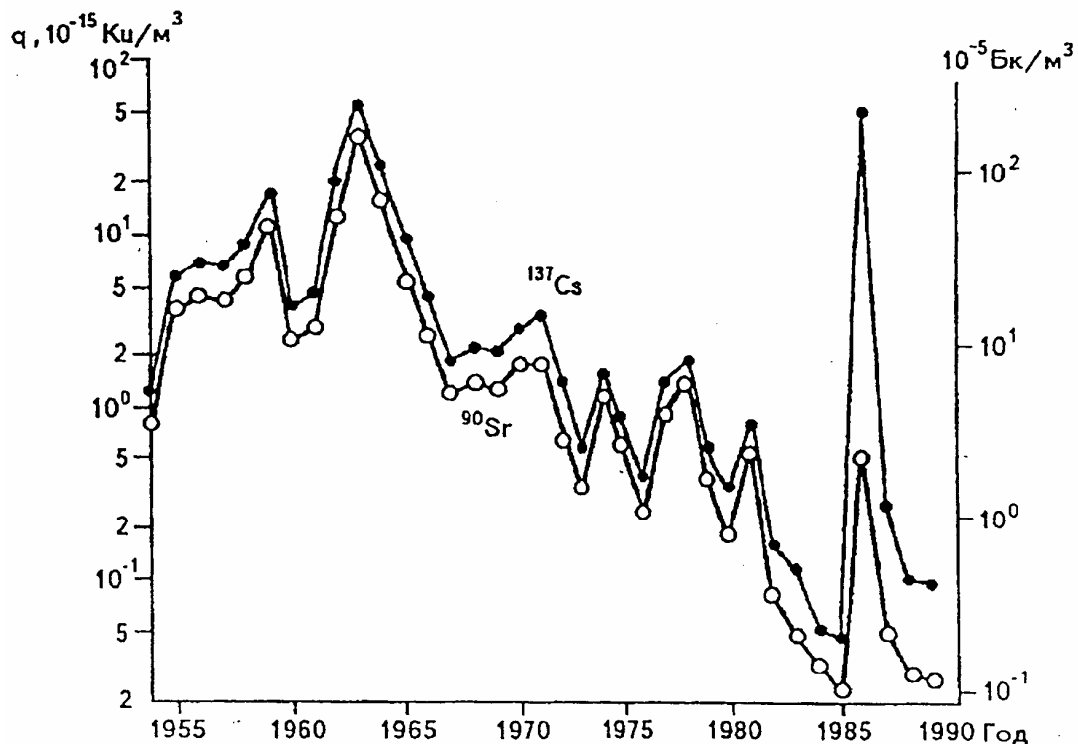


Рис. 2.3. Приземная активность в воздухе радиоактивных нуклидов искусственного происхождения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в Центральной России

по концентрациям радионуклида  $^{90}\text{Sr}$ . Выполненные расчеты показали, что средняя глобальная эквивалентная доза облучения от испытаний ядерного оружия достигала максимального значения (0,14 мЗв в год) в 1963 г. и снизилась до 5мкЗв в год к 2000 г. Безусловно, локальные эффективные дозы, полученные жителями районов, прилегающих к ядерным полигонам, могли быть значительно выше.

Производство ядерного оружия было сосредоточено в закрытых центрах (в Советском Союзе это были номерные города, расположенные вблизи Челябинска, Красноярска и Томска) и влияния на глобальную радиационную обстановку не оказывало. Особое значение и потенциальную опасность представляют хранение и уничтожение ядерных зарядов. Поскольку данной проблеме посвящено большое количество материалов в научной и популярной печати (см., например, [www.bellona.no](http://www.bellona.no)), то здесь мы ее рассматривать не будем.

### **2.3.2. Атомная энергетика**

Производство электроэнергии на основе ядерного деления может быть разбито на пять технологических процессов:

- добыча и переработка ядерного топлива;
- обогащение топлива и производство рабочих топливных элементов;
- собственно производство энергии;
- переработка использованного топлива;
- хранение и утилизация отходов.

#### **Добыча, переработка и обогащение**

В конце 1992 г. производство и потребление урана в СССР составляло 210 000 т и 104 000 т соответственно. Общемировые разведанные запасы урана – 2,6 млн. т, в том числе в России – около 200 000 т. Для ядерной энергетики требуется обогащение  $^{235}\text{U}$  до (3–5) % в таблетках диаметром 6 мм. Из этих таблеток собирают топливные элементы (ТВЭЛы) длиной 3 м и диаметром 144 мм. В одной кассете реактора ВВЭР-440 содержится 126 ТВЭЛов, а всего в активной зоне их около сорока тысяч.

#### **Атомные электростанции (АЭС)**

В СССР было 18 АЭС, в настоящее время в России их девять: Балаковская (Саратовская обл.), Билибинская (Магадан), Калининская, Кольская (Апатиты), Курская, Сосновоборская (Ленинградская обл.), Нововоронежская, Смоленская и Белоярская. Их доля в энергетике России составляет около 13 %, но в европейской части – до 25 %, а на Северо-Западе – до 65 %. Ближайшие перспективы отрасли связаны с пуском Ростовской АЭС (блок № 1), а также блока № 5 Курской и блока № 3 Калининской АЭС. Кроме того, планируются работы по продлению сроков эксплуатации ряда действующих блоков, например № 1 и 2 Сосновоборской АЭС со сроками плановой остановки в 2003, 2005 гг. Помимо АЭС на территории России в 1998 г. имелось 42 исследовательских реактора, значительная часть которых к настоящему времени остановлена.

В 1985 г. в мире действовало 351 АЭС в 26 странах; они обеспечивали 254 тыс. МВт электроэнергии, или 15 % мирового потребления. К концу 1997 г.

в мире действовало 429 АЭС в 32 странах; они обеспечивали 365 тыс. МВт электроэнергии, или 17 % мирового потребления.

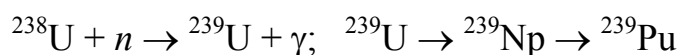
### **Переработка топлива и хранение отходов**

Через три – пять лет уран со степенью выгорания 10 % выгружают из активной зоны реактора и помещают на хранение. После 5 лет выдержки одна кассета имеет активность более 50 000 Ки. 1000 МВт (электрических) обеспечиваются смесью 29,1 т  $^{238}\text{U}$  и 0,1 т  $^{235}\text{U}$  и оставляют после себя 14 МКи, в том числе из них 7,5 МКи  $^{239}\text{Pu}$ . Выделение плутония из отработанного топлива – задача не связанная напрямую с энергетическим циклом и имеющая военную направленность.

### **Плутоний**

Физические свойства: плотность около  $20 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , самовозгорание при контакте с  $\text{O}_2$ . Критическая масса около 7 кг. Последнее обуславливает его применение в ядерных зарядах. Бомба, сброшенная на Нагасаки 9 августа 1945 г., имела плутониевый заряд; первый испытательный взрыв советского плутониевого устройства был произведен 29 сентября 1949 г. на Алтае.

Два основных искусственных изотопа плутония – это  $^{238}\text{Pu}$  (так называемый энергетический, открыт в 1940 г. Г. Сиборгом, Э. Макмилланом, Нобелевская премия 1951 г.) и  $^{239}\text{Pu}$  (оружейный). В ядерных реакторах оружейный плутоний образуется в цепочке



и таким образом нарабатывается в процессе расхода топлива.

Плутоний-239 – это один из наиболее опасных канцерогенов. Естественное содержание плутония в литосфере составляет примерно 10 кг, а испытания ядерного оружия распылили в окружающую среду около 10 т. Мировые запасы искусственно произведенного оружейного плутония –  $10^5$  кг и энергетического –  $6,5 \cdot 10^5$  кг. При этом, запас обогащенного урана у ядерных держав настолько велик, что использование плутония в энергетике неперспективно.

Предельно допустимая концентрация составляет  $3 \cdot 10^{-17}$  Ки·л<sup>-1</sup> на внешней границе зоны наблюдения АЭС. Загрязнение плутонием по районам:

Район	Плотность, Бк·м <sup>-2</sup>
Германия .....	67 – 148
Великобритания .....	33 – 122
Россия:	
ЛАЭС .....	144 – 262
ПО Маяк .....	менее 1400
Украина, Чернобыль .....	более 3700

Хранение плутония (по правилам МАГАТЭ):

Минимальное учетное количество .....	15 г
Тревожное количество .....	7 кг
Периодичность учета .....	7 сут

---

*Коллективная доза* для населения Земли от всей ядерной энергетики оценивается в 7,5 чел.-Зв в год на гигаватт произведенной электроэнергии. Средняя годовая индивидуальная доза в 2000 г. составляла

$$7,5 \text{ чел.-Зв}/(\text{год} \cdot \text{ГВт}) \cdot 250 \text{ ГВт-год} / 6 \cdot 10^9 \text{ человек} = \mathbf{0,3 \text{ мкЗв}},$$

что это пренебрежимо мало по сравнению с дозой от природной радиоактивности в окружающей среде.

### **Аварии и радиоактивное заражение окружающей среды**

Плановая эксплуатация объектов ядерного энергетического комплекса не представляет угрозы для жизни и здоровья населения и персонала станций. К несчастью, его достаточно короткая история насчитывает несколько нештатных ситуаций. Две наиболее крупные из них, приведшие к экологическим катастрофам, произошли на территории Советского Союза.

### **Кыштымская авария**

В 15 км к востоку от уральского города Кыштыма расположен в прошлом закрытый город Челябинск-65 (Озерск) – место нахождения производственного объединения «Маяк», пионера в отечественном ядерном производстве с момента изготовления первой атомной бомбы (1948 г). На протяжении 40 лет



производство и переработка ядерных материалов на «Маяке» сопровождались сбросом примерно 123 млн. Ки долгоживущих радионуклидов в естественные водоемы, в том числе в реку Теча с 1949 по 1956 г. было сброшено  $2,75 \cdot 10^6$  Ки. Значительная часть этой радиоактивности водным и атмосферным путем попала в окружающую среду, образовав обширное пятно загрязнения. Экологическая катастрофа произошла в сентябре 1957 г., когда взорвалось искусственное хранилище высокоактивных отходов емкостью  $300 \text{ м}^3$  и еще  $20 \cdot 10^6$  Ки продуктов деления было разнесено по окрестностям. Локально выпало 90 %, но общая площадь загрязнения составила 23 тыс.  $\text{км}^2$  (217 населенных пунктов, 272 тыс. человек). Пострадала биосфера, из районов с наибольшей поверхностной плотностью загрязнения были выселены жители. Ликвидация последствий катастрофы продолжается до сих пор. При этом необходимо отметить, что статистически достоверных отдаленных последствий облучения среди населения, подвергшегося облучению, не выявлено.

### **Чернобыльская катастрофа**

26 апреля 1986 г. в 1 ч 23 мин произошел тепловой взрыв на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС, сопровождавшийся выбросом в атмосферу 100 % инертных газов ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ), (10–20) % летучих элементов (I, Te, Se) и 3,5 % топливного материала (U, Ra, Pu). Общая масса выброса оценивается в 6 т; по радиоактивным элементам, ПБк:

$^{137}\text{Cs}$	–	85;
$^{131}\text{I}$	–	1800;
$^{14}\text{C}$	–	6;
$^{238}\text{Pu}$	–	5,2 (от всех ядерных испытаний – 12).

В 30–километровой зоне поверхностная  $\gamma$ – активность по  $^{137}\text{Cs}$  составила более  $1500 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ . Значительному загрязнению подверглись территории Украины, Белоруссии и России (район Брянск–Тула–Орел). В восточной части Европы пострадали Скандинавия, Польша, Австрия, Швейцария, Германия. В то же время катастрофа практически не дошла до юго-западной Европы: в Португалии на поверхности земли регистрировалось менее  $20 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ .

## Дозы облучения

Острая лучевая болезнь. В момент аварии на рабочих местах находилось около 600 человек, из них 237 человек получили высокие дозы облучения (табл. 2.6) и в той или иной степени страдали лучевой болезнью. В течение первых месяцев после аварии умерли 28 человек и еще двое – в течение первого года.

Ликвидаторы. Общее число – около 800 тыс. человек, из них около 200 тыс. получили дозы 0,01 до 0,5 Гр. Среднегодовая эквивалентная доза уменьшалась от 170 мЗв в 1986 г. до 15 мЗв в 1989 г. и позже регулировалась стандартными нормативами для персонала. Эта группа риска является объектом пристального медицинского и научного контроля по выявлению поздних последствий малых доз облучения, например раковых заболеваний. На сегодня статистически достоверных отклонений в их здоровье не обнаружено.

Т а б л и ц а 2.6

Последствия лучевой болезни  
персонала Чернобыльской АЭС

Число пациентов	Предполагаемая доза, Гр	Смерти
21	6–6	21
21	4–6	8
55	2–4	1
140	1–2	0
Всего 237		30

Население. Радионуклидами, вызвавшими радиационное воздействие на население, в основном являлись  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{131}\text{I}$ . Средняя доза облучения составила: от 1 Зв – дети в возрасте до трех лет; до 30–70 мЗв – 116 тыс. человек эвакуированного взрослого население. И на Украине, и в Белоруссии, и в России в настоящее время выявлено статистически достоверное увеличение рака щитовидной железы у лиц, получивших высокие дозы в детском возрасте; общее число таких случаев уже превышает 1800. Других достоверных отдаленных последствий не выявлено.

### 2.3.3. Против радиофобии

На человека в повседневной жизни обычно воздействуют малые дозы радиоактивности. Т.е. принципиальным является вопрос о существовании нижнего порога радиационного риска. На условном графике (рис. 2.5) в правой части кривой показана область экспериментально проверенных данных.

Область малых доз экспериментально недостоверна и потому остается предметом научной дискуссии. В то же время в общественном сознании независимо от научных результатов сложилось несколько мифов.

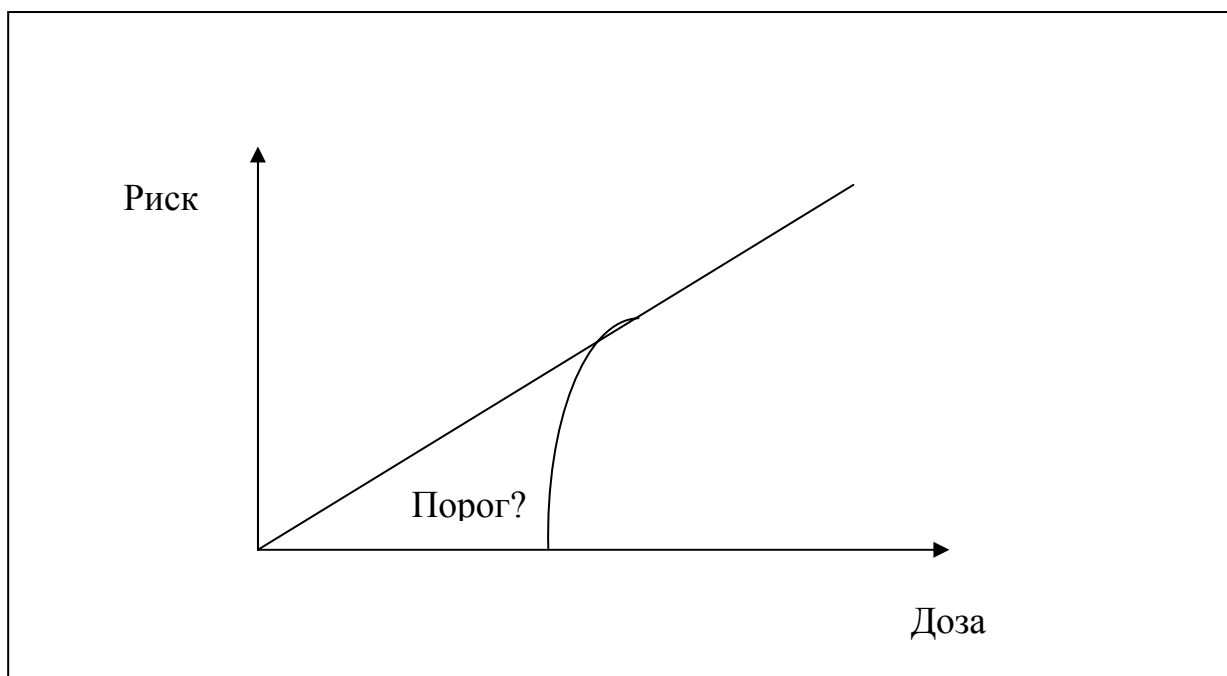


Рис. 2.5. Условный график зависимости радиационного риска от дозы облучения

Миф 1. Любая доза радиации вызывает генетические повреждения. Доза в  $2 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ , характерная для среднего радиационного фона на поверхности Земли, вызывает за год пять повреждений ДНК на одну клетку. Естественная частота повреждений составляет примерно 70 млн. в год, а диапазон приспособления человека к естественному радиационному фону составляет  $1\text{--}280 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ . При таких условиях население разных районов Земли проживает из поколения в поколение без статистически выявленных аномалий

в радиогенных, т.е. вызванных радиацией, раковых заболеваниях. Однако после черновыльской аварии 270 тыс. человек были выселены из зоны, соответствовавшей дозе 6–60 мЗв·год<sup>-1</sup>. Это результат политического решения, принятого по недостаточно научно обоснованному совету.

Существует ли нижний порог зависимости? По НРБ-99 считается, что нет. Однако, признать это окончательно доказанным научным фактом нельзя.

Миф 2. Интегральная эквивалентная доза от Чернобыля на территории США составляет в среднем  $4,6 \cdot 10^{-3}$  мЗв на человека. Если умножить ее на число жителей северного полушария, то можно получить огромную коллективную дозу и сделать прогноз возникновения дополнительных раковых заболеваний в Америке от Чернобыля в 53 400 случаев!

Т а б л и ц а 2.7

Факторы риска (Свердловская область, 1993 г.)

Фактор риска	Пожизненный риск		Смертность (на 10 <sup>5</sup> чел. · год <sup>-1</sup> )		Потеря продолжительности жизни, лет	
	м.	ж.	м.	ж.	м.	ж.
Пожизненное облучение радоном 3,1 мЗв·год <sup>-1</sup>	0,019	0,0034	31,8	4,8	0,3	0,05
Общий онкологический риск	0,17	0,14	241	174	2,4	2,2
Травмы, отравления, несчастные случаи	0,2	0,067	330	92	5,7	1,9
В том числе:						
убийства			59	17		
самоубийства			72	19		
отравления						
алкоголем			44	11		

Примечание. м. – мужчины; ж. – женщины.

Миф 3. При ядерном конфликте от радиации погибнет весь мир. В период с 1945 по 1980 г. было произведено 534 ядерных взрыва, общая мощность составила 440 Мт ( $1,8 \cdot 10^{24}$  Дж), что обеспечило жителю Земли

среднюю индивидуальную дозу 3,5 мЗв за 50 лет. В разгар холодной войны в распоряжении потенциальных участников конфликта находилось около 50 000 зарядов общей мощностью 13 000 Мт, что в пропорции дает 110 мЗв дозы облучения. Эта интегральная по времени величина соизмерима с годовой эффективной дозой, получаемой жителями районов с самой высокой радиоактивностью на Земле – штата Керала в Индии и штата Майн-Джарайс в Бразилии.

Радиация является фактором риска, но не самым большим. Сравнение радиационного риска с другими источниками несчастий для одного из радиационно неблагоприятных регионов России приводится в табл. 2.7. Хотя этим данным почти десять лет, они дают типичное соотношение величин.

## **2.4. Методы датирования, основанные на радиоактивности**

Радиоактивность была открыта в земных минералах, и очень скоро изучение радиоактивности геологических образцов привело к идее определения их абсолютного возраста. Осознание того факта, что земное вещество – одновременно и трансформированное по составу вещество космоса, а также появившаяся позднее возможность изучать космические образцы, такие как метеориты, расширили область радиоизотопного датирования.

### **2.4.1. Определение возраста нуклеосинтеза**

Рассмотрим изменение со временем концентрации радиоактивного нуклида сорта  $i$ , образованного в первичном нуклеосинтезе:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = Q(t) \cdot K_i - \lambda_i \cdot N_i(t) \quad (2.2)$$

Здесь  $\lambda$  – постоянная распада,  $Q(t)$  – интенсивность нуклеосинтеза,  $K_i$  – относительная доля генерации  $i$ -того нуклида. Понятно, что используется предположение об эквивалентных источниках нуклеосинтеза, которое является достаточно грубым. Формальное решение (2.2) имеет вид

$$N_i(t) = K_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \int_0^t \exp(\lambda_i \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau \quad (2.3)$$

Для двух нуклидов выражение (2.3) приводит к отношению концентраций:

$$\frac{N_j(t)}{N_i(t)} = \frac{K_j}{K_i} \exp(-(\lambda_j - \lambda_i) \cdot t) \frac{\int_0^T \exp(\lambda_j \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^T \exp(\lambda_i \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau} \quad (2.4)$$

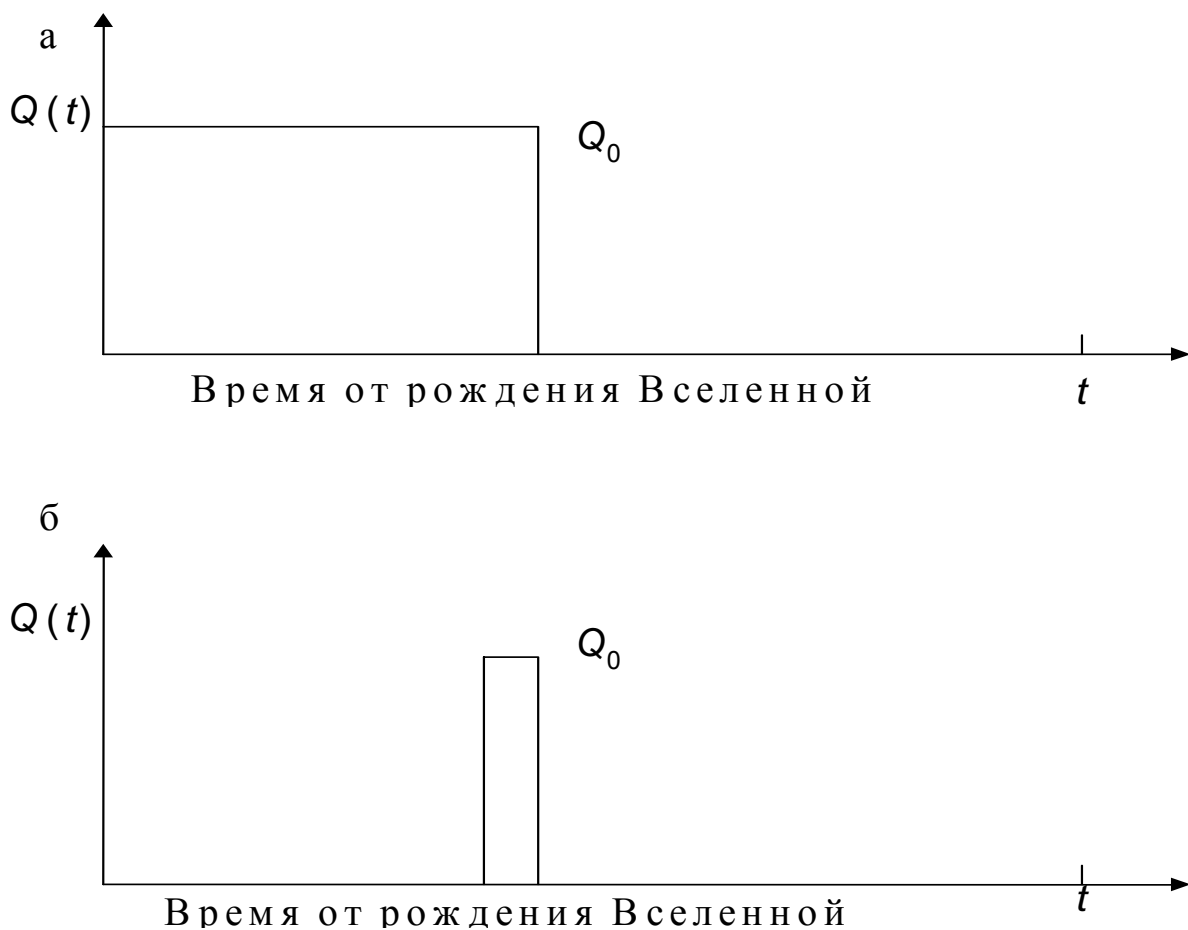


Рис. 2.6. Условные модели динамики нуклеосинтеза

Решая (2.4) относительно времени  $T$ , получим значение возраста с момента нуклеосинтеза. Например, для пары изотопов урана современное измеренное отношение концентрации составляет  $N_{235}/N_{238} = 1/138 \approx 0,0072$ , а относительное рождение в нуклеосинтезе по расчетам –  $K_{235}/K_{238} = 1,42$ .

Конкретный результат будет модельно зависимым, т.е. он требует задания неизвестной нам функции источника  $Q(t)$ . Рассмотрим два предельных случая.

**Протяженный нуклеосинтез.** Пусть  $Q(t) = Q_0$  при  $0 \leq t \leq T$  и  $Q(t) = 0$  при  $t > T$ . Тогда, если принять, что нуклеосинтез прекратился перед формированием Солнечной системы (см. Рис. 2.6, а),  $T \approx 8 \cdot 10^9$  лет. Прибавив к этой величине возраст Солнечной системы, получим 12,6 млрд. лет.

**Взрывной нуклеосинтез.** В этой модели положим  $Q(t) = Q_0 \cdot \delta(t - T)$  (рис. 2.6, б). Тогда интервал, прошедший от этого события до современности, будет равен  $6,4 \cdot 10^9$  лет.

Как показывают предыдущие оценки, результат зависит от модели с фактором 2, и действительный возраст нуклеосинтеза, скорее всего, лежит между полученными предельными значениями, т.е.

$$6,4 \cdot 10^9 \text{ лет} \leq t_{\text{нуклеосинтеза}} \leq 12,6 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

#### 2.4.2. Рубидий – стронциевый метод датирования

При радиоактивном распаде  $^{87}\text{Rb}$  образуется  $^{87}\text{Sr}$  с константой распада  $\lambda_{\text{Rb-87}} = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$ . Рубидий самостоятельных минералов не образует и, потому в качестве объектов датирования используются калиевые минералы (биотит, мусковит, полевой шпат), содержащие несколько процентов рубидия в виде примеси. Мерой возраста служит количество атомов дочернего стронция  $^{87}\text{Sr}_t$

$$^{87}\text{Sr}_t = ^{87}\text{Sr}_0 + ^{87}\text{Rb} \cdot [\exp(\lambda_{87} \cdot t) - 1] \quad (2.5)$$

Присутствие в пробе наряду с радиогенным стронцием некоторой доли первичного стронция  $^{87}\text{Sr}_0$  заставляет прибегнуть к методу трехизотопной диаграммы. Разделим обе части (2.5) на число атомов стабильного изотопа  $^{86}\text{Sr}$ , что оправдано, так как его содержание в пробе не менялось в течение всего времени существования геологического объекта. Тогда

$$\left( \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_t = \left( \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \left( \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} \right)_t [\exp(\lambda_{87} \cdot t) - 1]$$

При наличии когенетических одновозрастных проб, отличающихся только начальным химическим составом, линейная аппроксимация их измерений

пересекает ось ординат в точке, соответствующей исходному изотопному отношению стронциев (рис. 2.7).

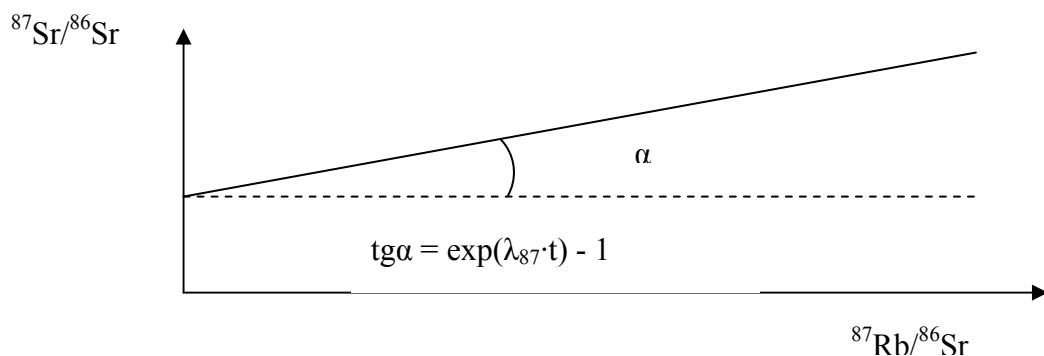


Рис. 2.7. Изохронная диаграмма Rb–Sr

Возраст серии пород, образующих изохрону (прямую равных возрастов), можно вычислить по формуле

$$t = \frac{1}{\lambda_{87}} \ln(1 + \operatorname{tg}\alpha)$$

Примеры применения метода. Важнейшие достижения рубидий-стронциевого метода в космохронологии – это определение возраста каменных метеоритов. Для хондритов средний возраст составляет 4,49 млрд. лет и для ахондритов – 4,36 млрд. лет. Рубидий-стронциевый метод позволил установить возраст древнейших земных пород, и в частности *гнейсов* Гренландии с возрастом 3,6 млрд. лет.

### 2.4.3. Уран-свинцовый метод

Метод, а точнее методы, основан на распаде уранов и тория до свинца и соответственно зависит от времени эволюции изотопного состава свинца. Постоянные распадов (лет<sup>-1</sup>) и современное отношение изотопов урана:

$$\lambda_{238} \dots\dots\dots 1,55 \cdot 10^{-10}$$



$$\begin{array}{ll} \lambda_{235} & \dots\dots\dots 9,85 \cdot 10^{-10} \\ \lambda_{232} & \dots\dots\dots 4,95 \cdot 10^{-11} \\ {}^{238}\text{U}/{}^{235}\text{U} & \dots\dots\dots 138 \end{array}$$

Современное среднее содержание свинцов: 204 : 206 : 207 : 208 = 1,4 : 24,1 : 22,1 : 52,4. Запишем три уравнения распада относительно накопления свинца:

$$\begin{array}{l} {}^{206}\text{Pb} = {}^{206}\text{Pb}_0 + {}^{238}\text{U} [\exp (\lambda_{238} t) - 1]; \\ {}^{207}\text{Pb} = {}^{207}\text{Pb}_0 + {}^{235}\text{U} [\exp (\lambda_{235} t) - 1]; \\ {}^{208}\text{Pb} = {}^{208}\text{Pb}_0 + {}^{232}\text{Th} [\exp (\lambda_{232} t) - 1]. \end{array}$$

При переходе к концентрации относительно нерадиогенного стабильного изотопа  ${}^{204}\text{Pb}$

$$\begin{array}{l} \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{238}t} - 1); \\ \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{235}t} - 1); \\ \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{232}\text{Th}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{232}t} - 1). \end{array} \quad (2.6)$$

Решив уравнения (2.6) относительно времени, получим три независимые датировки, которые будут согласующимися (иначе говорят, конкордатными), если исследуемый минерал оставался замкнутым на протяжении всей своей истории. Распространенной причиной дискордатности радиоактивных методов датирования, включая урано-свинцовый, является диффузия продуктов распада из образцов.

#### 2.4.4. Калий - аргоновый метод

Радиоактивный изотоп  ${}^{40}\text{K}$  составляет 0,0117 % природного калия. Он распадается на  ${}^{40}\text{Ca}$  (прямой  $\beta$ -распад) и  ${}^{40}\text{Ar}$  ( $e$ -захват) с приведенными ниже постоянными распада:

$$\lambda_{\text{э.з}} = 5,8 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1};$$

$$\lambda_{\beta} = 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ лет}^{-1}.$$

Таким образом, атмосферный аргон имеет преимущественно радиогенное происхождение. Предположения, на которых основан метод датирования:

- определяется возраст закрытия системы;
- закрытие системы происходило за время, пренебрежимо малое по сравнению с ее возрастом;
- не было потерь или контаминации  $^{40}\text{Ar}$  (идеально закрытая система);
- введена поправка на содержание первичного  $^{40}\text{Ar}_0$ .

Поправка вводится по методу трехизотопной диаграммы. В качестве третьего изотопа используется стабильный  $^{36}\text{Ar}$  с современным содержанием  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar} = 0,337\%$ :

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{Ar}_0 + (\lambda_{\text{эз}}/\lambda) ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1). \quad (2.7)$$

Поделив (2.7) по частям на  $^{36}\text{Ar}$ , получим

$$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0 + (\lambda_{\text{эз}}/\lambda) (^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}) (e^{\lambda t} - 1),$$

что в координатах  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$  при фиксированном времени соответствует прямой линии с наклоном, определяемым возрастом и точкой пересечения ординаты – первичному отношению  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$ .

Калий-аргоновый метод датирования не может быть применен для осадочных пород, поскольку они состоят из продуктов эрозии более древних пород, имеющих свой возраст. Кроме того, осадочные минералы, как правило, содержат очень низкую концентрацию калия и не способны удерживать аргон.

Существование уникального по изотопному составу мантийного аргона. Для некоторых образцов подстилающих океанических базальтов  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) > 10\,000$ . Это значение невозможно получить экстраполяцией от современного значения при постоянной скорости дегазации. Объяснение: 95 % аргона были потеряны мантией примерно  $4,5 \cdot 10^9$  лет назад, т.е. имеется указание на полное плавление внешнего тела Земли.

Пример применения метода. Палеомагнитная шкала. Доказательства того, что магнитное поле Земли меняло свою полярность в геологическом прошлом, были получены в 1906 г. французом Бертраном Брюнесом. Однако систематическое изучение процесса инверсий (переполюсовок) магнитного поля Земли было невозможно до разработки калий-аргонового метода датирования. Измерение реликтового поля (напряженности и наклона)

производится в вулканических породах, фиксировавших его величину и направление при остывании ниже точки Кюри. Эти же вулканические породы, начиная с нескольких сотен тысяч лет назад, надежно датируются калий-аргоновым методом. Далее (табл. 2.8) приводится шкала инверсии общего геомагнитного поля за 5 млн. лет.

Т а б л и ц а 2.8

Геомагнитная история последних шести миллионов лет

Магнитная эпоха	Полярность	Интервал времени, млн. лет
Брюнес	Прямая	0–0,72
Матуяма	Обратная	0,72–2,47
Гаусс	Прямая	2,47–3,17
Гильберт	Обратная	3,17–5,41

В названиях эпох увековечена память об ученых, внесших определяющий вклад в изучение геомагнетизма. Возраст границ нормальных и обратных магнитных эпох был установлен калий-аргоновым методом датирования.

#### 2.4.5. Неравновесные методы (на примере иониевого)

Неравновесные методы датирования используются преимущественно для определения абсолютного возраста океанических осадков и континентальных осадочных пород. Рассмотрим их на примере иониевого метода.

Иониевый метод датирования основан на измерении содержания изотопа тория  $^{230}\text{Th}$ , который в старой радиохимической номенклатуре назывался ионием (Io из ряда  $^{238}\text{U}$ ;  $T_{1/2} = 80\ 000$  лет), в осадочных отложениях. Теоретическое основание метода:

- содержание  $^{238}\text{U}$  и  $^{230}\text{Th}$  в океане, определяемое притоком вещества с континентов, остается постоянным в течение последних 400 000 лет;
- миграции  $^{230}\text{Th}$  в донных осадках не происходит;
- скорость осаждения  $^{230}\text{Th}$  на океаническое дно постоянна.

Суть метода заключается в получении кривой вертикального распределения концентрации  $^{230}\text{Th}$  в осадке, которое должно соответствовать ожидаемой экспоненте, что связано с осаждением на дно резко неравновесных количеств

$$^{230}\text{Th} > ^{226}\text{Ra} > ^{238}\text{U}.$$

Экспоненциальный спад наблюдается до горизонта, соответствующего радиоактивному равновесию урана и иония в осадке, а там выходит на плато. Это уровень равновесного горизонта, определяющего предельный возраст метода (рис. 2.8).

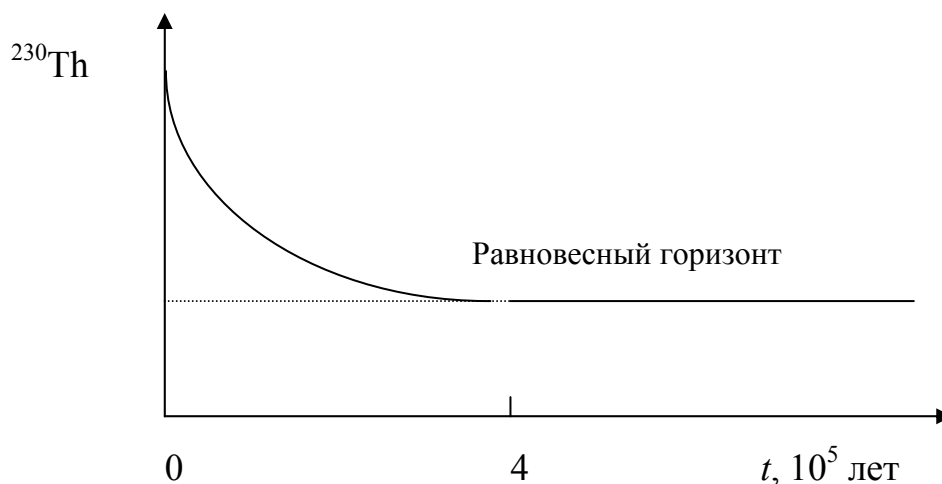


Рис. 2.8. Изменение концентрации в осадочном образце до достижения равновесного горизонта

Пример применения метода. Колонки глубоководных океанических осадков, содержащие уникальную информацию о прошлом природной среды, требуют датирования, т.е. определения средней скорости осадкообразования. Тогда глубина в колонке однозначно соответствует известному возрасту. Иониевый метод позволил для колонок из Индийского океана измерить скорость седиментации (осадкообразования), равную  $2,75 \text{ мм}/10^3 \text{ лет}$ .

## 2.4.6. Радиоуглеродный метод

Радиоуглерод ( $^{14}\text{C}$ ;  $T_{1/2} = 5730$  лет) был синтезирован искусственно впервые в 1940 г. В середине 40-х годов прошлого века Либби (Willard Libby) измерил его естественную концентрацию в атмосфере и затем разработал метод датирования, принесший ему Нобелевскую премию 1960 г.

Постоянный источник  $^{14}\text{C}$  в атмосфере – это поглощение тепловых нейтронов, образуемых в каскадных реакциях КЛ, на ядрах азота:



Экзотермическая реакция (2.8) имеет большое полное сечение  $\sigma_{\text{tot}} = 1,7$  б и является основным каналом захвата нейтронов. Интегральная по атмосферному столбу единичной площади скорость образования  $^{14}\text{C}$  в среднем по широте составляет  $2,2 \text{ ат.} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Основное предположение радиоуглеродного метода – глобальное постоянство атмосферного отношения (концентрация  $^{14}\text{C}$ /концентрация  $^{12}\text{C}$ ). Тогда, после выхода некоей системы из контакта с атмосферой, захваченная активность  $^{14}\text{C}$  начинает снижаться по закону радиоактивного распада, и длительность периода от закрытия системы однозначно определяется выражением

$$t, \text{ лет} = -8033 \ln (A_{\text{образца}} / A_{\text{стандарта}}),$$

где  $A$  – удельная активность радиоуглерода в углеводе, а стандарт соответствует средней атмосферной активности.

По договоренности радиоуглеродный возраст отсчитывается от 1950 г., который принят за нулевой. Добомбовое относительное содержание радиоуглерода  $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_0 = 1,2 \cdot 10^{-12}$ . Радиоспектрометрические методы регистрации активности  $^{14}\text{C}$  позволяют датировать геологические, биологические и археологические образцы массой от десятков грамм до килограмм до возраста около 30 тыс. лет. В конце 70-х годов прошлого века был разработан метод ускорительной масс-спектрометрии, повысивший чувствительность измерений на несколько порядков. Методу стали доступны миллиграммовые образцы и возрасты до 100 тыс. лет.

Пример применения метода. Туринская плащаница. По религиозному канону – это посмертное покрывало распятого Христа. Полотнище размером 4,2 м на 1,2 м с контурами лица и рук человека и следами крови. Известна с 1353 г., когда французский рыцарь де Шарне объявил о владении ею.

Возможность изотопного датирования плащаницы была одобрена Католической Церковью после внедрения метода ускорительной масс-спектрометрии, уменьшившего массу требуемого для измерений образца до единиц миллиграмм. Готовность участвовать в датировании плащаницы изъявили семь лабораторий. Из их списка кардинал-хранитель выбрал три: Аризону (США), Оксфорд (Великобритания) и Цюрих (Швейцария). 21 апреля 1988 г. были взяты образцы плащаницы. Окончательный результат анализа возраста –  $1325 \pm 33$  лет нашей эры, т.е. с 95 % вероятностью она была изготовлена между 1260 и 1390 гг.

#### 2.4.7. Трековый метод

Прохождение тяжелого энергичного ядра через непроводящий материал производит существенные повреждения на атомном и молекулярном уровне. Плотность таких повреждений, проявляющихся при соответствующей обработке в виде ядерных треков, может служить мерой длительности облучения данного материала ионизирующими ядрами. Простейшим в применении и наиболее надежным является вариант метода, рассматривающий в качестве источника ядер процесс деления ядер  $^{238}\text{U}$  ( $\lambda_{\text{деления}} \approx 10^{-16}$  лет $^{-1}$ ). Природные кристаллы и кварцы накапливают радиационные дефекты от распадов содержащегося в них урана. Плотность треков при этом такова:

$$\rho_c = (\lambda_{\text{деления}} \cdot t) (N_v \cdot C^{238} \cdot R^{238} \cdot \varepsilon^{238}),$$

где  $N_v$  – концентрация атомов вещества;  $C^{238}$  – доля урана-238;  $R^{238}$  – длина треков;  $\varepsilon^{238}$  – эффективность травления.

После подсчета плотности треков под микроскопом образец подвергается облучению медленными нейтронами, которые вызывают индуцированные деления ядер урана-235. Дополнительная плотность треков от осколков индуцированного деления

$$\rho_u = (\sigma \cdot \Phi) (N_v \cdot C^{235} \cdot R^{235} \cdot \varepsilon^{235}),$$

где  $N_v$  – концентрация атомов вещества;  $C^{235}$  – доля урана-235;  $R^{235}$  – длина треков;  $\varepsilon^{235}$  – эффективность травления.

Соотношение исходной плотности треков и плотности треков, возникших в результате облучения, позволяет установить возраст образца:

$$t = \frac{\sigma \cdot \Phi}{\lambda_{\text{деления}}} \frac{C^{235} \cdot R^{235} \cdot \epsilon^{235}}{C^{238} \cdot R^{238} \cdot \epsilon^{238}} \frac{\rho_c}{\rho_n}. \quad (2.9)$$

При этом первый сомножитель правой части (2.9) определяется ядерно-физическими константами и флюенсом нейтронов. Второй сомножитель можно считать константой при возрасте образца менее десятков миллионов лет, а при больших возрастах следует учитывать экспоненциальное изменение отношения концентраций 235-го и 238-го изотопов урана. Наконец, третий сомножитель вычисляется из результатов эксперимента.

Известно, что треки осколков деления отжигаются при нагревании твердых тел. Скорость отжига треков в различных минералах варьируется в широких пределах. Треки в цирконе устойчивы к отжигу, тогда как в апатите и кальците отжигаются менее чем за миллион лет при температуре ниже 100 °С. Таким образом, метод треков от осколков деления характеризует возраст остывания и определяет время, прошедшее с момента падения температуры ниже границы сохранности треков.

#### 2.4.8. Геохронология

##### Историческая справка о физических методах датирования Земли

1899 г., Джоли. Определение возраста океана по скорости растворения соли из подстилающих литосферных пород (90,0 млн. лет). В 1963 г. вновь были сделаны расчеты с учетом гидрологического цикла. Результат – от 1300 до 2500 млн. лет.

1899 г., Лорд Кельвин. Определение возраста Земли по остыванию проводящей сферы от температуры затвердевания до современного потока тепла. Результат – 20,0 млн. лет.

1904 г., Резерфорд. Предложение первого после открытия радиоактивности метода, основанного на накоплении  $^4\text{He}$  после  $\alpha$ -распада в радиоактивных минералах. Метод практически не реализован из-за быстрой капиллярной диффузии гелия.

За экспериментальную основу сравнения возрастов в геологии была принята стратиграфия – определение относительного возраста по послойному отложению пород. Стратиграфический принцип в наиболее простой формулировке: «Глубже, значит древнее». Стратиграфия применима только к осадочным породам и не распространяется на метаморфические и магматические породы. Единая геостратиграфическая шкала была построена методом совмещения слоев со сходными биологическими останками, границы периодов определялись сменой доминирующих видов. После внедрения методов радиоактивного датирования появилась возможность определения абсолютного возраста границ периодов и превращения этой шкалы в геохронологическую (приложение).

*Приложение*

**Геохронологическая шкала**

(хроностратиграфическая плюс хронометрическая шкалы)

Начало, млн. лет назад	Эра	Период	Эпоха	События
4600	Докембрий- ская	Докембрийский		Формирование земной коры и последующая эволюция жизни Образование первого суперконтинента, анаэробные бактерии
2500		Архейский		
600		Протерозойский		
570	Палеозой- ская	Кембрийский (Южный Уэльс)		Датирование слоев по строматолитам; фотосинтезирующие цианобактерии; <i>Эдиакарская фауна</i> , более 60 видов (Аделаида, Южная Австралия) Морские животные с минерализованными раковинами, трилобиты, брахиоподы, моллюски, разнообразие червей



Начало, млн. лет назад	Эра	Период	Эпоха	События
500	Мезозойская	Ордовикский (племя Северного Уэльса)		Царство трилобитов
430		Силурийский (силуры – племя Уэльса)		Появление кораллов и примитивных рыб. Землетрясения, вулканы, образование гор
395		Девонский (юго-запад Англии)		Кораллы, аммониты, царство рыб и первые наземные растения
345		Каменноугольный		Ледниковые эпохи, амфибии и рептилии, стегоцефалы
280		Пермский		Вымирание трилобитов, амфибии и рептилии доминируют на суше; климат холоднее и суше
225		Триасский		Доминируют моллюски, беспозвоночные, появление рептилий; черепахи; динозавры и ихтиозавры;
190		Юрский		формирование Урала, Тянь- Шаня, Алтая. Папоротники, цикады, тростник, хвойные; аммониты и другие беспозвоночные; появляется археоптерикс; начало формирования Атлантического океана
135		Меловой		Цветковые растения; расцвет рептилий

Начало, млн. лет назад	Эра	Период	Эпоха	События
65	Кайнозой- ская	Третичный	Палеоцен	Массовое вымирание: динозавры, птерозавры и аммониты; распространение животных; травы, кустарники, цветущие растения. Млекопитающие начинают доминировать, появляются грызуны и приматы
58			Эоцен	Доминируют млекопитающие: грызуны, травоядные, плотоядные, парнокопытные, появление первых китов
37			Олигоцен	Продолжается распространение млеко питающих: свиньи, носороги, тапиры
25			Миоцен	Все больше современных млекопитающих: лошади, собаки и медведи, киты, современные птицы, человекообразные обезьяны в Южной Европе; появляется рамапитек
9			Плиоцен	Современные виды млекопитающих; появление австралопитека
1.8			Четвертичный	Плейстоцен
0,01 Н. вр.			Голоцен	История цивилизации

П р и м е ч а н и е. Геохронологическая шкала включает в себя хроностратиграфическую и хронологическую шкалы.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**Адроны** (от греч. hadros – большой, сильный) – общее название элементарных частиц, участвующих в сильных взаимодействиях. Адронами являются протоны, нейтроны, мезоны и др. Термин введен Л.Б. Окунем (СССР) в 1967 г.

**Аккреция** (от лат. accretio – приращение, увеличение) – падение вещества на космическое тело под действием сил тяготения. Аккреция сопровождается выделением гравитационной энергии.

**Активность** – мера радиоактивности радионуклида, равная числу спонтанных ядерных превращений (в том числе распадов), происходящих за промежуток времени.

**Биосфера** – совокупность органического мира Земли и населенной им природной среды. Область активной жизни, охватывающая нижнюю часть атмосферы (высота до 20–25 км), гидросферу и верхнюю часть литосферы (глубина до 2–3 км). Самая крупная экосистема.

**Гнейсы** – горная кристаллическая порода, состоящая из полевого шпата, кварца, слюды и некоторых других минералов. Распространены очень широко, особенно среди пород докембрийского возраста.

**Доза поглощенная** – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу и равная отношению средней энергии, поглощенной в единичном объеме, к массе вещества в этом объеме.

**Звездный ветер** – постоянное радиальное истечение плазмы из атмосферы звезды в окружающее пространство. Образование звездного ветра обычно связано с потоком энергии, поступающим из более глубоких слоев звезды, а максимальная мощность характерна для ранних стадий эволюции звезды.

**Изотопная вариация** – отклонение относительного содержания изотопов выбранного элемента от величины, характерной для некоторого стандарта.

**Коллективная доза эффективная** – мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения. Она равна сумме индивидуальных эффективных доз. Единица эффективной коллективной дозы – человеко – зиверт (чел.-Зв).

**Космические лучи** – ядра химических элементов, ускоренные в космическом пространстве до релятивистских энергий и заполняющие межзвездное пространство Галактики. Служат источником значительной доли радиационного фона в природной среде.

**МАГАТЭ** – Международное агентство по атомной энергии.

**Окружающая среда** – внешняя по отношению к данному биологическому виду часть биосферы. Современная окружающая среда человека включает в себя природную и искусственную (техногенную) среду, т.е. совокупность созданных человеком сооружений, транспортных средств и т.п. (так называемая вторая природа). Часто термин *окружающая среда* понимается только как *окружающая природная среда* и в таком значении иногда используется в международных документах (например, в Программе ООН по окружающей среде — ЮНЕП).

**Постоянная Хаббла** – коэффициент пропорциональности в линейном законе, связывающем скорость удаления внегалактического объекта с расстоянием до него. Названа по имени Эдвина Пауэлла Хаббла, американского астронома, установившего эту закономерность в наблюдательных данных в 1929 г.

**Природная среда** – часть биосферы, ставшая областью обитания и развития человеческой цивилизации и эволюционировавшая вместе с ней.

**Субдукция** – поддвигание участков океанической литосферной плиты под континентальную. В теории тектоники плит – одно из возможных взаимных движений в нижней литосфере, создающих структуру земной коры и приводящих к изменчивости поверхности Земли. Субдукции сочетаются с раздвигами и сдвигами (коллизиями). При этом наращивается и разрушается континентальная литосфера, проявляется разнообразный магматизм, выделяется значительное количество сейсмической энергии в результате тектонических подвижек в земной коре и верхней мантии, возникают многочисленные рудные месторождения.

**Эдиакарская фауна** – разнообразные ископаемые останки, открытые в Южной Австралии в отложениях, датируемых возрастом примерно 600 млн. лет. Описано около 30 видов, более 60 % этой коллекции относится к кишечнополостным. Представители эдиакарской фауны встречаются в некоторых других местах земного шара, в том числе в Северной и Южной Аме-

рике и Африке. Эдиакарская фауна, включавшая в себя крупных и очень крупных беспозвоночных размером до полутора метров, последующего развития не имела.

**Экосистема** (от греч. oikos — жилище, местопребывание и система) — выделенный природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания (атмосферой, почвой, водоемом и т.п.), с которой они связаны основным обменом вещества и энергии. Данный термин применяется к природным объектам различной сложности и размеров: океан или небольшой пруд, тайга или участок березовой рощи.

**Эукариоты** — микроорганизмы, обладающие клеточным ядром. Согласно новейшей системе органического мира эукариоты считают царством или надцарством, противопоставляя его другому царству или надцарству — прокариотов, т.е. безъядерных клеточных организмов (бактерии, сине-зеленые водоросли). Предполагается, что эукариоты — это более поздний этап развития жизни.

## Библиографический список

### К 1-й главе

Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: Энергоиздат, 1981. 209 с.

Кинг А., Шнейдер Б. Первая глобальная революция. Доклад Римского клуба. М.: Прогресс, 1992. 342 с.

Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 691 с.

Пределы роста/ Д.Х. Медоуз, Д.Л. Медоуз, Й. Райндерс, В.В. Беренс М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 205 с.

Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Глобальная эволюция Земли. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 446 с.

Путвинский С.В. Возможна ли будущая энергетическая система без ядерного синтеза? //Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 11. С. 1235–1249.

Scientific American. Special Issue: Life in the Universe. October 1994.

### Ко 2-й главе

Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерения, дозы, оценки риска. Екатеринбург, 1997. 232 с.

Петров Ю.В. Природный ядерный реактор Окло// Успехи физических наук. 1977.Т. 123. С. 473–486.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 591 с.

Харленд У.Б. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир, 1985. 140 с.

Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды. М.: Атомиздат, 1967. 332 с.

БЛИНОВ Александр Всеволодович

## ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Часть 1

Учебное пособие

Редактор *О.В. Махрова*

Технический редактор *А.И. Колодянская*

Оригинал-макет подготовлен автором

Директор издательства СПбГПУ *А.В. Иванов*

Свод. темплан 2002 г.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2, 95 3005 – учебная литература

---

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Усл. печ. л.

Уч. изд. л.

Тираж

Заказ

С78

---

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

Издательство СПбГПУ, член Издательско-полиграфической ассоциации вузов Санкт-Петербурга.

Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

---

Отпечатано на ризографе RN-2000 FP

Поставщик оборудования – фирма «Р – ПРИНТ»

Телефон: (812) 110-65-09

Факс: (812) 315-23-04