

Физическая экология

Занятие 6

Искусственная радиоактивность.

Методы радиоактивного датирования.

Искусственная радиоактивность

Научный комитет ООН по эффектам атомной радиации <http://www.unscear.org>

Международная комиссия по радиационной защите
<http://www.icrp.org>

Искусственные радиоактивные нуклиды

Нуклид	Период полураспада	Источник
^3H	12,3 лет	Испытания ядерного оружия, реакторы деления, переработка топлива, производство ядерного оружия
^{131}I	8,0 дней	Испытания ядерного оружия, реакторы деления, лечение щитовидной железы
^{129}I	$1,6 \cdot 10^7$ лет	Испытания ядерного оружия, реакторы деления
^{137}Cs	30,2 лет	Испытания ядерного оружия, реакторы деления
^{90}Sr	28,8 лет	Испытания ядерного оружия, реакторы деления
^{99}Tc	$2,1 \cdot 10^5$ лет	Продукт деления ^{99}Mo , применяемого в медицинской диагностике
^{239}Pu	$2,41 \cdot 10^4$ лет	Нейтронное облучение ^{238}U

Ядерное оружие

Применение

06.08.1945 бомбардировщик В-29 США, пилотируемый капитан-лейтенантом Паулем Тиббетом, сбросил бомбу с урановым зарядом мощностью 12,5 тыс. тонн ТНТ эквивалента на город Хиросима. Бомба взорвалась на высоте 580 м над университетской больницей. Число жертв (убитые и быстро умершие раненые) составило более 100 тысяч человек.

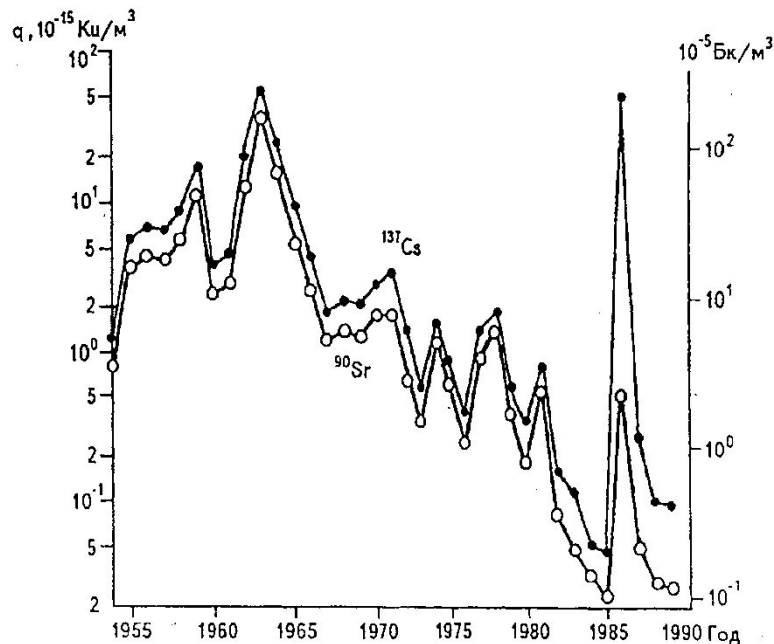
09.08.1945 экипаж другого В-29 сбросил бомбу, изготовленную на основе ²³⁹Pu заряда мощностью 22 тыс. тонн ТНТ эквивалента, на город Нагасаки. Бомба взорвалась на высоте 500 м, унеся жизни более 50 тысяч человек.

К середине 80-х годов прошлого века число облученных и выживших жителей Хиросимы и Нагасаки составляло 60,000 и 30,000 человек, соответственно, со средней эквивалентной дозой облучения 0,2 Зв.

Ядерное оружие

Испытания (1945 – 1980 гг.)

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



Средняя глобальная эквивалентная доза облучения от испытаний ядерного оружия достигала максимального значения 0,14 мЗв в год в 1963 г. и снизилась до 5 мкЗв в год к 2000 г.

Атомная энергетика

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

- добыча урановой руды;
- переработка руды в ядерное топливо (U_3O_8) на гидрометаллургическом заводе;
- конверсия U_3O_8 в газообразную форму UF_6 для разделения изотопов;
- обогащение урана и производство топлива (UO_2) для рабочих топливных элементов;
- собственно производство энергии;
- переработка использованного топлива;
- хранение и утилизация отходов.

Атомная энергетика сегодня

Атомная энергетика — это отрасль энергетики, занимающаяся производством электрической и тепловой энергии путём преобразования ядерной энергии

Мировая Атомная энергетика



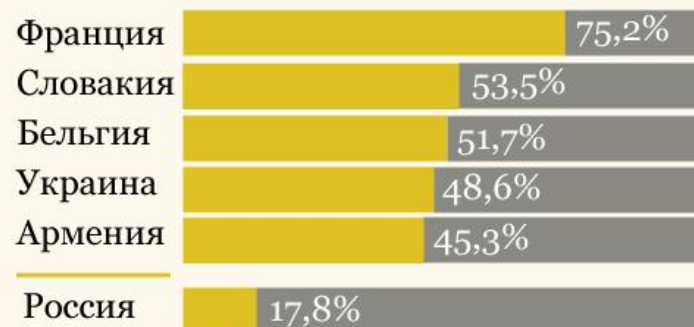
Атомная энергетика России



Распределение общемировой мощности АЭС по странам



Страны-лидеры по доле АЭС в производстве электроэнергии



Атомные станции России

АЭС	Кол-во блоков	Годы ввода в эксплуатацию	Годы вывода из эксплуатации
Балаковская (ВВЭР-1000)	4	1985-1993	2015-2023
Белоярская (БН-600)	1	1980	2010 +15
Билибинская (ЭГП-6)	4	1974-1976	2009-2011 +15
Калининская (ВВЭР-1000)	3	1984-2005	2014-2035
Кольская (ВВЭР-440)	4	1973-1981	2008-2011 +15
Курская (РБМК-1000)	4	1976-1985	2011-2015 +15
Ленинградская (РБМК-1000)	4	1973-1981	2008-2011 +15
Ново-Воронежская (ВВЭР-440, 1000)	3	1971-1980	2010-2016 +20
Смоленская (РБМК-1000)	3	1982-1990	2012-2020
Волгодонская (ВВЭР-1000)	1	2002	2032

Атомная энергетика: радиационный фон

Через 3 – 5 лет работы уран со степенью выгорания 10% выгружают из активной зоны реактора и хранят. После 5 лет выдержки 1 кассета имеет активность более 50,0 тыс. Ки.

(29,1 т ^{238}U + 0,1 т ^{235}U) обеспечивают 1000 МВт·час (электрических) и оставляют после себя 14 МКи (из них 7.5 кКи ^{239}Pu).

Коллективная эффективная доза для населения Земли от всей ядерной энергетики оценивается величиной 7,5 чел.-Зв в год на ГВт производимой электроэнергии. Оценим среднюю годовую индивидуальную дозу в 2009 г.:

$$7,5 \text{ чел.-Зв} / \text{ГВт} \cdot 370 \text{ ГВт} / 7,5 \cdot 10^9 \text{ человек} = \mathbf{0,4 \text{ мкЗв}}$$

Видно, что это пренебрежимо мало в сравнении с дозой от природной радиоактивности в окружающей среде.

Сравнительные характеристики

электростанций

Тип станции	ТЭС	АЭС
Ресурсы на 1 ГВт мощности за год	2 млрд. т угля (1500 эшелонов)	0,5 т природного урана, 1,5 км ³ воды
Экологические последствия	<ul style="list-style-type: none">• Поступление в атмосферу 20 млрд. тонн в год углекислого газа• Выброс радионуклидов• Выброс оксидов серы и азота	<ul style="list-style-type: none">• Обработка и ликвидация радиоактивных отходов• Утечка радиоактивности при аварии реакторов

Атомная энергетика: проблемы

1. Транспортировка и хранение отходов

Общая радиоактивность отходов на территории России по оценкам экспертов составляет $(5,5—8,2) \cdot 10^{19}$ Бк. В дополнение следует упомянуть $1,6 \cdot 10^{20}$ Бк отработанного ядерного топлива (ОЯТ) весом примерно 8,5 тыс. т, которое хранится в исключаяющей мобильность форме.

2. Вывод АЭС из эксплуатации

По оценкам экспертов полная стоимость утилизации АЭС с рекультивацией земель ретроспективно привела бы к удорожанию электроэнергии на (5-10)%.

3. Риск аварий

Кыштым, Три-Майл Айленд, Чернобыль, Фукусима

Чернобыльская авария

26 апреля в 1:23:50 1986 года на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС произошел тепловой взрыв, который полностью разрушил реактор. В результате пожара остатки активной зоны расплавились. Произошел выброс радиоактивных материалов, в том числе изотопов урана, плутония, йода, цезия и стронция. Около 120 тыс. человек было эвакуировано из зон, подвергшихся загрязнению, впоследствии еще более 200 тыс. переселено.



Фотография территории вокруг Чернобыльской АЭС, 27 апреля 1997

Чернобыль: лучевая болезнь (эквивалентная доза более 1 Гр)

В момент аварии на рабочих местах находилось около 600 человек, из них 237 человек получили высокие дозы облучения.

Число пациентов	Предполагаемая доза, Зв	Смерти
21	6 – 16	21
21	4 – 6	8
55	2 – 4	1
140	1 – 2	0
Всего: 237		30

Чернобыль: отдаленные последствия облучения

Ликвидаторы. Общее число облученных, включенных в государственный Реестр, около 650 тысяч человек, из них около 285 тысяч ликвидаторов. Все они получили дозы 0,01 до 0,5 Зв. Среднегодовая эквивалентная доза уменьшалась от 170 мЗв в 1986 г. до 15 мЗв в 1989 г. Эта группа риска является объектом пристального медицинского и научного контроля для выявления поздних последствий малых доз облучения, например раковых заболеваний. На сегодня выявленных статистически достоверных отклонений в здоровье людей, подвергшихся воздействию малых доз, нет.

Население. На территории России число эвакуированных жителей составило 116 тыс. человек. Средняя доза облучения составила от 1 Зв – для детей в возрасте до трех лет, до (30 – 70) мЗв для взрослого население. И в Украине, и в Белоруссии, и в России в настоящее время выявлены статистически достоверные увеличения числа раков щитовидной железы у лиц, получивших высокие дозы в детском возрасте, общее число таких случаев уже превышает 4000. Других достоверных отдаленных последствий не

Дальнейшая судьба станции

После аварии работа электростанции была приостановлена. Однако уже в октябре 1986 года, после обширных работ по дезактивации территории и постройки «саркофага», 1-й и 2-й энергоблоки были вновь введены в строй; в декабре 1987 года возобновлена работа 3-го.

В 1991 году на 2-м энергоблоке вспыхнул пожар, и в октябре он был полностью выведен из эксплуатации. В декабре 1995 года между Правительством Украины, правительствами стран «большой семёрки» и Комиссией ЕС был подписан меморандум о взаимопонимании, который намечал полное закрытие станции к 2000 году. 15 декабря 2000 года был навсегда остановлен реактор последнего 3-го энергоблока.

Саркофаг, возведённый над четвёртым взорвавшимся энергоблоком постепенно разрушается. При этом, опасность исходит от радиоактивных веществ, находящихся внутри него. По официальным данным эта цифра достигает 95 % от количества на момент аварии.



Радиация: концепция допустимого риска

То, с чем сталкивается человек в повседневной жизни – это воздействие малых доз радиации.

Имеются принципиальные недостатки в современных дозиметрических оценках.

1. Дозы, по которым экстраполируется бытовой риск, гораздо выше тех, с которыми имеют дело в повседневной жизни. Интенсивность этих доз гораздо выше обычной.
2. Эквивалентные дозы, полученные жертвами ядерных взрывов, не были точно измерены, а были оценены или экстраполированы.
3. Многие факторы, такие как расовая принадлежность, естественная частота раковых заболеваний, питание, стресс и пр., не были, или не могли быть учтены дозиметрическими системами.

По оценкам Международной комиссии по действию радиации риск смерти от рака составляет 0,08% на 1 бэр (т.е. на 10 мЗв) для острого облучения. Оценка обладает весьма высокой погрешностью.

В настоящее время в США вероятность умереть от рака составляет примерно 20%, т.е. из 10 тысяч человек 2 тысячи умрет от рака.

Если мы подвергнем группу в 10,000 человек воздействию радиации с дозой 60 мЗв, то увеличение числа раков составит 48 случаев ($0,08\% \cdot 6 \cdot 10,000$). Тогда вместо 2,000 человек, которым предстоит умереть от рака, получится 2,048. Подобное незначительное возрастание специфической смертности не будет замечено в силу незначительности будущего статистического

Радиация: концепция допустимого риска

Источник риска	Уменьшение продолжительности жизни (на сколько лет меньше)
Курение, 20 сигарет в день	6 лет
Лишний вес (15%)	2 года
Алкоголь (среднее для США)	1 год
Все несчастные случаи	207 дней
Все природные катастрофы	7 дней
Эквивалентная доза (3 мЗв/год)	15 дней
Эквивалентная доза (10 мЗв/год)	51 день

Методы датирования, основанные на радиоактивности

Определение возраста нуклеосинтеза

Рассмотрим изменение со временем концентрации радиоактивного нуклида сорта i , образованного в звездном синтезе элементов:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = Q(t) \cdot K_i - \lambda_i \cdot C_i(t)$$

Здесь λ - постоянная распада, $Q(t)$ – удельная мощность нуклеосинтеза, K_i – относительная доля генерации i -того нуклида.

$$C_i(t) = K_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \cdot \int_0^T \exp(\lambda_i \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau$$

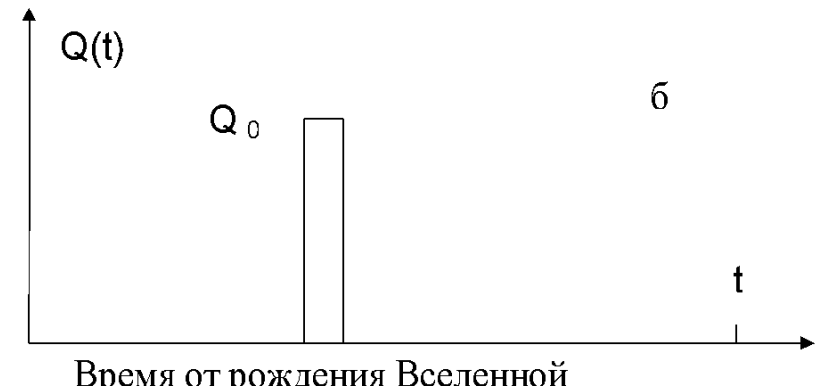
$$\frac{C_j(t)}{C_i(t)} = \frac{K_j}{K_i} \cdot \exp(-(\lambda_j - \lambda_i) \cdot t) \cdot \frac{\int_0^T \exp(\lambda_j \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^T \exp(\lambda_i \cdot \tau) \cdot Q(\tau) \cdot d\tau}$$

Определение возраста нуклеосинтеза

Для изотопов урана современное отношение концентрации составляет $C_{235} / C_{238} = 1/138 \approx 0,0072$, а относительная доля при рождении в нуклеосинтезе по астрофизическим моделям равна $K_{235} / K_{238} = 1,42$.

Протяженный нуклеосинтез (а). 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, вычисления дают $T \approx 8 \cdot 10^9$ лет. Добавив к этой величине возраст Солнечной системы, получим 12,6 миллиарда лет.

Взрывной нуклеосинтез (б). В этой модели положим $Q(t) = Q_0 \cdot \delta(t - T)$. Тогда вычисления дают для интервала, прошедшего от этого события до современности $6,4 \cdot 10^9$ лет.



Рубидий-стронциевый метод датирования

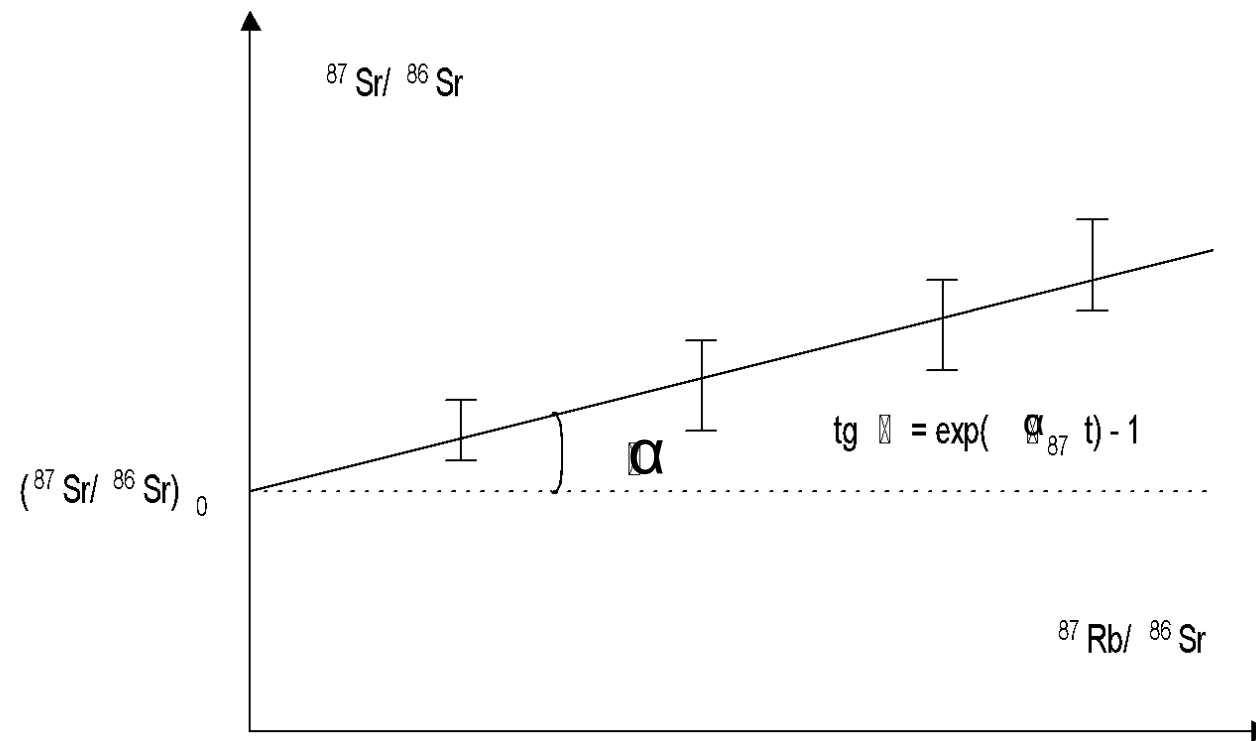
При радиоактивном распаде природного ^{87}Rb образуется ^{87}Sr с константой распада $\lambda_{\text{Rb-87}} = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$. Рубидий самостоятельных минералов не образует и, потому, в качестве объектов датирования используются калиевые минералы (биотит, мусковит, полевой шпат),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

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

Присутствие в пробе первичного стронция $^{87}\text{Sr}_0$ позволяет использовать метод трехизотопной диаграммы. Разделим обе части уравнения на число атомов стабильного изотопа ^{86}Sr , что оправдано, т.к. его содержание в пробе не менялось в течение времени существования геологического объекта.

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

Рубидий-стронциевый метод: решение



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

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

Уран-свинцовый метод датирования

Современное среднее содержание изотопов свинца:

$$204 : 206 : 207 : 208 = 1,4 : 24,1 : 22,1 : 52,4.$$

$$\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{232}\text{Th}}{{}^{204}\text{Pb}} \cdot (e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

Решив три уравнения относительно времени, получим три независимые датировки. Эти датировки будут согласующимися (иначе говорят, конкордатными), если исследуемый минерал оставался замкнутым на протяжении своей истории.

Калий-аргоновый метод датирования

Радиоактивный изотоп ^{40}K составляет 0,0117 % природного калия. Он распадается на ^{40}Ca (прямой β^- распад) и ^{40}Ar (K - захват) с постоянными:

$$\lambda_{\text{эз}} = 5,8 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$$

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

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}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 изотоп аргона ^{36}Ar с современным содержанием $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar} = 0,337\%$.

Радиоуглеродный метод датирования

Радиоуглерод (^{14}C , $T_{1/2} = 5730$ лет) был впервые синтезирован искусственно в 1940 г. В середине сороковых годов, после того, как Серж Корф определил интенсивность нейтронов в атмосфере, Уиллард Либби (Willard Libby) предсказал образование ^{14}C в атмосфере, измерил его естественную концентрацию и разработал метод датирования, принесший ему Нобелевскую премию 1960 г.

Основное предположение метода – глобальное постоянство атмосферного содержания ^{14}C в углероде. При массе углеродного резервуара $8,5 \text{ г углерода} \cdot \text{см}^{-2}$, это соответствует равновесной активности $230 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Тогда, после выхода системы из контакта с атмосферой ее захваченная активность ^{14}C падает по закону радиоактивного распада, и длительность периода после закрытия системы однозначно определяется выражением:

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

Вариации радиоуглерода в атмосфере

