Для любых радиоактивных превращений имеется **общий момент — стохастический характер процесса распада**.

Самым существенным является то, что **механизм процесса превращения для нас не существенен и каждое ядро не помнит своей предыстории**.

Коль скоро это так, то мы должны получить **аналитическое выражение** для закона радиоактивного распада, **которое после минимальной адаптации можно применять ко многим стохастическим процессам**. В плане радиоэкологии это существенно при рассмотрении взаимодействия излучений с веществом и анализе процессов, приводящих к уменьшению загрязнения различных объектов.

Исходные положения для вывода Закона радиоактивного распада.

Радиоактивность — это свойство, относящееся к индивидуальным нуклидам.

Природа радиоактивного распада естественно встречающихся в окружающей нас среде радионуклидов такая же, как и у искусственно произведенных радионуклидов.

Независимо от типа испускаемой частицы все виды радиоактивного распада подчиняются одному и тому же закону радиоактивного распада.

Распад радионуклидов — процесс, существенно отличный от процессов разрушения, распада или превращений привычных для нас объектов.

Момент распада данного радионуклида предсказать невозможно, можно делать предсказания только о вероятности такого события.

Исторический пример

Несмотря на то, что при каждом акте радиоактивного распада только небольшая часть массы исходного ядра превращается в энергию, количество высвобождаемой при этом энергии на единицу массы препарата велико.

1 г радия, находящийся в замкнутом объеме в равновесии с продуктами своего распада, выделяет **в час около 670 Дж** тепловой энергии. Иными словами, 1 г такого препарата **каждые двое суток** выделяет ~3,2·104 Дж энергии, т. е. **столько, сколько высвобождается при сгорании ~1 г каменного угля.**

В радии не наблюдается никаких химических изменений и кажется, что этот процесс может продолжаться сколь угодно долго. Способность радия и продуктов его распада непрерывно выделять энергию свидетельствовала о том, что само явление радиоактивности связано с выделением значительного количества энергии.

В 1905 г. Э. фон Швейдлер, используя имеющиеся к тому времени экспериментальные данные, ввел **статистические понятия для описания явления радиоактивности**: вероятность распада любого отдельного радионуклида за достаточно малый интервал времени Δt не зависит от его предыстории, от условий, в которых находится атом, и зависит только от длительности интервала Δt.

Для достаточно малых временных интервалов эта вероятность пропорциональна только интервалу — $\boldsymbol{\lambda \cdot \Delta t}$.

Коэффициент пропорциональности $\boldsymbol{\lambda}$ получил название **постоянной распада** и является **характерной величиной для каждого радионуклида**.

Вероятность того, что данный радионуклид "**проживет**" в течение интервала времени $\boldsymbol{\Delta t}$ равна $\boldsymbol{1 - \lambda \cdot \Delta t}$, а в течение двух таких интервалов, согласно правилу умножения вероятностей, равна $(\boldsymbol{1 - \lambda \cdot \Delta t})^2$.

Вероятность того, что радионуклид проживет промежуток времени $\boldsymbol{t = n \cdot \Delta t}$, равна $(\boldsymbol{1 - \lambda t/n})^n$. Конечно, это выражение справедливо только для бесконечно малых промежутков времени Δt.

Предел такого выражения при n, стремящемся к бесконечности, хорошо известен из курса математики

$$\lim_{n \to \infty} (1 + x/n)^n = e^x.$$

Т. о., вероятность того, что данный радионуклид проживет временной интервал ***t***, дается выражением **exp(–*λt*).**

Если в рассматриваемом образце в начале содержалось N_0 радионуклидов, то по истечении времени *t* из первоначального их количества останется

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (*)$$

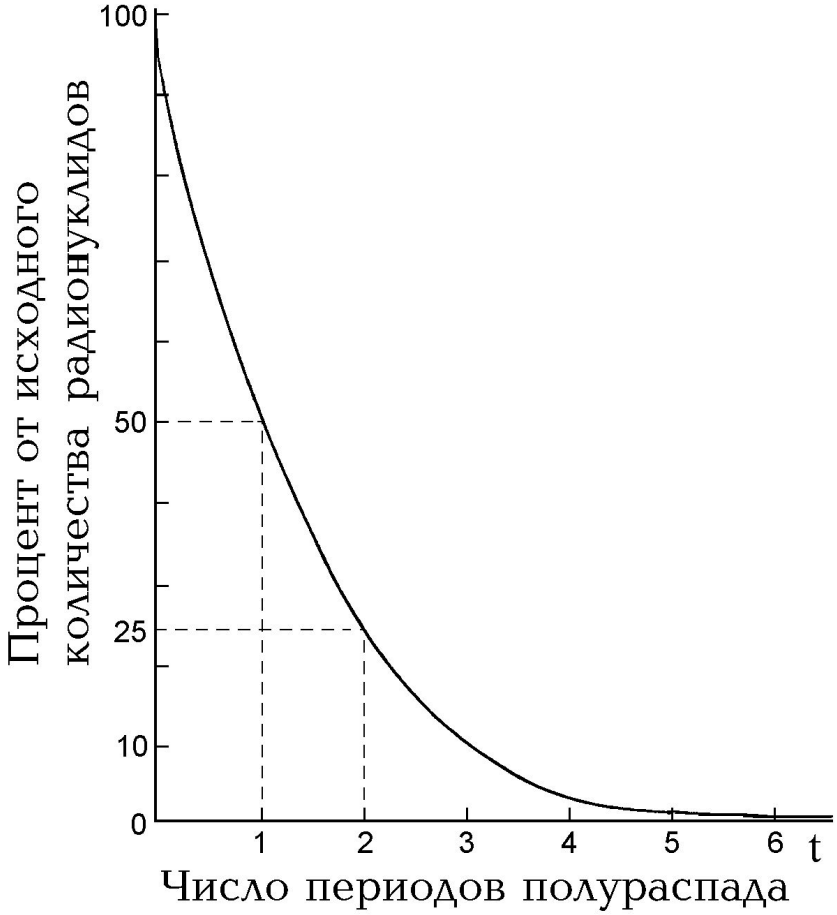
Это математическое выражение закона радиоактивного распада, а *λ* имеет простой смысл: это доля атомов, испытывающих превращения в единицу времени.

Длина отрезка времени должна быть при этом такой, что уменьшение исходного числа радионуклидов за этот промежуток времени должно быть малым по сравнению с исходным их числом N_0. **Константа распада имеет размерность, обратную времени, а показатель у экспоненты всегда безразмерная величина.**

Во всевозможных таблицах радионуклидов приводится, как правило, не величина λ, а период полураспада $T_{1/2}$. За это время исходное количество радионуклидов N_0 уменьшается в два раза

$$T_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0{,}693/\lambda.$$

Значения периодов полураспада для разных радионуклидов находятся в чрезвычайно широких пределах от ~10^{-7} с до ~10^{20} лет. Эти значения можно рассматривать как паспортные характеристики радионуклидов, которые неизменны, по крайней мере, за время существования Галактики.



- Универсальная зависимость уменьшения количества радионуклидов во времени. За единицу измерения по оси абсцисс взят период полураспада.

Скорость распада, т. е. уменьшение числа радионуклидов в единицу времени –d*N*/d*t*, согласно (*), пропорциональна числу имеющихся атомов

$$-dN/dt = \lambda \cdot N. \quad (**)$$

Какие следствия для радиоэкологии следуют из вышесказанного? Если в окружающую среду в результате аварии попали короткоживущие радионуклиды, например с $T_{1/2}$ < 1 часа, то маловероятно, чтобы за счет естественных процессов они загрязнили значительную территорию. Более того, через день об их присутствии можно забыть. Чем меньше $T_{1/2}$, тем более локализовано воздействие радионуклидов на окружающую среду. Однако для населения, находящегося рядом с источником выброса радионуклидов, опасность может быть значительной, особенно в тех случаях, когда радионуклиды находятся в воздушной среде.

Интенсивность излучений, конечно, определяется числом атомов *N*, но в не меньшей мере она определяется постоянной распада (см. выражение (**)) и типом нуклидов.

Чтобы было удобно сопоставлять воздействия радионуклидов, в радиоэкологии количество радионуклидов того или иного типа выражают не в граммах или молях, а через скорость распада этого количества радионуклидов. Эта величина получила название **активность — *A***. Именно она, с учетом типа радионуклидов, определяет радиационную обстановку в интересующем нас месте.

В научной литературе активность так же, как и массовое число нуклида, обозначают буквой *A*. Мы будем использовать для них разные шрифты.

Активность определяется следующим соотношением:

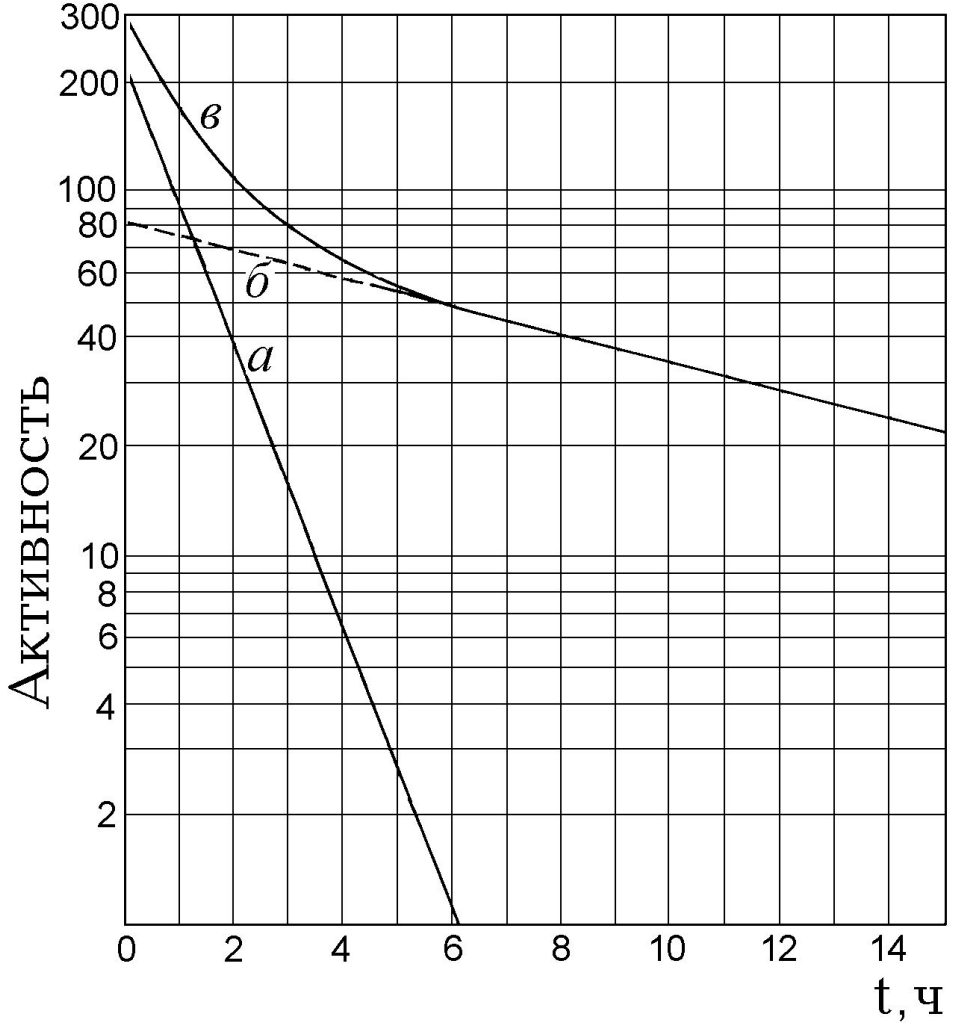
$$A = \lambda \cdot N = -dN/dt; \quad A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \; A\,(t = 0) = A_0. \quad (***)$$

В радиоэкологии, как правило, приходится иметь дело со смесью радионуклидов. **Формально говоря, активность смеси радионуклидов всегда равна сумме активностей отдельных компонент.** Однако нужно помнить, что такая характеристика, как суммарная активность, имеет мало смысла при оценках воздействия, так как воздействие определяется не только активностью, но и энергией и схемой распада. **В природе не существует двух типов радионуклидов, которые при равной активности оказывали бы равное воздействие. Различия в воздействии двух разных радионуклидов с одинаковой активностью на живую ткань могут составлять от процентов до десятков тысяч раз.**

Основные закономерности, связанные с кинетикой распада, проследим на примере рассмотрения **смеси только двух типов радионуклидов**. Наблюдаемая в этом случае активность равна:

$$A = A_1 + A_2 = \lambda_1 \cdot N_1 + \lambda_2 \cdot N_2.$$

Пусть периоды полураспада радионуклидов: $T^1_{1/2}$ **= 8 ч.** и $T^2_{1/2}$ **= 0,8 ч.**. Со временем вклад в суммарную активность более короткоживущего компонента уменьшается и ее зависимость от времени в полулогарифмическом масштабе, переходит в прямую, соответствующую долгоживущему компоненту.



- Изменение во времени активностей двух радиоактивных веществ с периодами, отличающимися в 10 раз. ***а*** — активность препарата с $T^2_{1/2}$ = 0,8 ч., ***б*** — активность препарата с $T^1_{1/2}$ = 8 ч. и ***в*** — суммарная активность.

Более сложный и более важный в экологическом отношении случай, когда у нас второй радионуклид образуется при распаде первого. **Исходный** радионуклид называют **материнским** и обозначают индексом **1**, а **образующийся радионуклид – дочерним** (индекс **2**).

Рассмотрим распад материнского вещества и предположим, что в начале измерений количество материнского радионуклида равно N_1^0, а дочернего нет, т. е. $N_2^0 = 0$.

Образование дочерних ядер происходит с той же скоростью, что и распад материнских — $\lambda_1 \cdot N_1$, а распад их происходит со скоростью – $\lambda_2 \cdot N_2$. По аналогии с (**), мы можем записать $dN_2/dt = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$, или, несколько видоизменив, имеем

$$dN_2/dt + \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_1 \cdot N_1^0 \cdot (\exp(-\lambda_1 t) = 0$$

Решение такого линейного дифференциального уравнения первого порядка хорошо известно и с учетом того, что $N_2^0 = 0$, записывается в виде

$$N_2 = \lambda_1 \cdot N_1^0 \, [(\exp(-\lambda_1 t) - (\exp(-\lambda_2 t)]/(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (****)$$

Основной интерес представляет зависимость количества радионуклидов (или их активности) от соотношения между постоянными распада. Значения постоянных распада λ_i определяют величины активности в любой из моментов времени при заданном N_1^0.

При анализе распада и накопления радионуклидов обычно выделяют **области подвижного равновесия** (Transient Equilibrium), когда $\lambda_2 > \lambda_1$, и **отсутствия равновесия**, когда $\lambda_1 > \lambda_2$.

=

Пусть $\lambda_2 > \lambda_1$. Через интервал времени *t*, $\lambda_2 \cdot t > 3$, т. е. через ~4 периода полураспада, выражение для количества дочерних радионуклидов (см. (****)) существенно упрощается и мы имеем

$$N_2 = N_1^0 \cdot (\exp(-\lambda_1 t) \cdot \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1).$$

Так как $N_1 = N_1^0 \cdot (\exp(-\lambda_1 t)$, то **мы получаем:**

$$N_1/N_2 = (\lambda_2 - \lambda_1)/\lambda_1. \ ()$$

Отношение же активностей $A_i = \lambda_i \cdot N_i$ этих радионуклидов записывается в виде

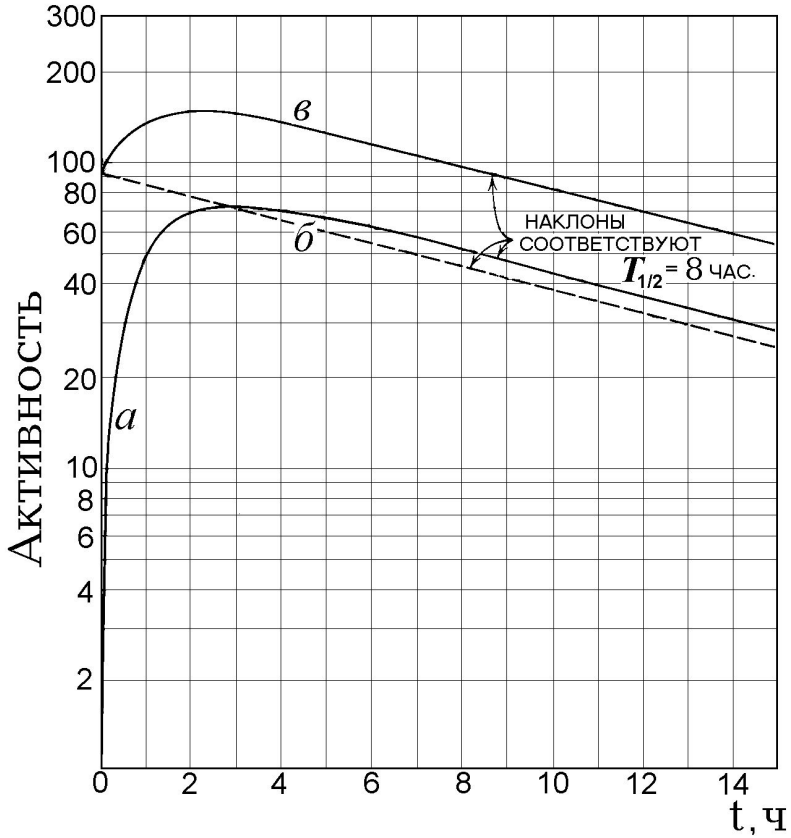
$$A_1/A_2 = (\lambda_2 - \lambda_1)/\lambda_2, \ ()$$

т. е. отношения количеств различных радионуклидов в окружающей среде в общем случае не равно отношению их активностей.

Кинетику распада в случае подвижного равновесия удобно проследить с помощью зависимостей активностей от времени, представленных на рис., где периоды полураспада взяты из предыдущего примера.

а — активность дочерней фракции, образующейся из материнской, $T_{1/2}$ = 0,8 ч.;
б — активность материнских радионуклидов, $T_{1/2}$ = 8 ч.;

в — полная активность в том случае, когда вначале была только материнская фракция.



- Активность дочерних радионуклидов (A_2), отсутствовавших в начальный момент времени, нарастает (кривая ***а***), через ~3 часа превосходит активность материнского препарата A_1 (кривая ***б***), и достигает максимума. Устанавливается подвижное равновесие $A_1/A_2 = 1 - \lambda_1/\lambda_2$ и суммарная активность, представленная кривой ***в*** начинает спадать с периодом полураспада материнского радионуклида.

Особый интерес для радиоэкологии представляет случай $\lambda_2 >> \lambda_1$ — **вековое равновесие** (Secular Equilibrium). За время, малое по сравнению с $T_{1/2}$ материнского радионуклида, в системе устанавливается равновесие и **затем суммарная активность, равна удвоенной материнской активности**

$$N_1/N_2 = \lambda_2/\lambda_1 \text{ и } A_1 = A_2 \text{ . ()}$$

Такая ситуация справедлива **для радиоактивных семейств ^{238}U, ^{235}U и ^{232}Th,** определяющих радиоактивность окружающей нас среды. Здесь мы имеем дело с цепочкой из **более, чем 10 последовательных распадов**. С анализом превращений во всей цепочке или в отдельных ее звеньях приходится сталкиваться при рассмотрении многих задач, связанных с поведением тяжелых естественных радионуклидов в биосфере.

В радиоэкологии хорошо известна и ситуация, когда $\lambda_1 > \lambda_2$. Это ^{241}**Pu**, имеющий $\lambda_1 = 2{,}2\cdot10^{-9}$ с$^{-1}$, и распадающийся путем β-распада в более опасный радионуклид ^{241}**Am** ($\lambda_2 = 7{,}35\cdot10^{-11}$ с$^{-1}$), распадающийся путем α-распада.

Разветвленный распад, т. е. материнский радионуклид может превратиться в разные дочерние. Пусть радионуклид X распадается путем α-распада с постоянной распада λ_α в нуклид *Б* и путем β-распада с постоянной распада λ_β в нуклид *В*. В этом случае количество атомов N_X вещества X уменьшается со скоростью $(\lambda_\alpha + \lambda_\beta)\cdot N_X$, а вещество *Б* образуется со скоростью $\lambda_\alpha\cdot N_X$. Вещество X, конечно, характеризуется только одним периодом полураспада $T_{1/2} = 0{,}693/(\lambda_\alpha + \lambda_\beta)$, а **определенно сказать, в какой нуклид превратится после распада радионуклид X, нельзя**.

В начале XX в. наибольшей удельной активностью обладал ^{226}Ra ($T_{1/2}$ = ~1600 лет; 1 г ^{226}Ra содержит $2{,}66 \cdot 10^{21}$ атомов) и его было удобно взять в качестве эталона, активность которого получила название кюри (Ки). Согласно (***), **активность 1 г ^{226}Ra равна:**

$0{,}693 \cdot 2{,}664 \cdot 10^{21}/(1600 \cdot 3{,}16 \cdot 10^{7}$ с) = $3{,}657 \cdot 10^{10}$ распадов/с.

Период полураспада 226Ra на протяжении нескольких десятилетий постоянно уточнялся. Поэтому численное значение активности 1 г 226Ra также изменялось, что представляло определенные неудобства. Чтобы избежать этого, **было принято, что 1 кюри ≡ $3{,}7 \cdot 10^{10}$ распадов/с.**

В миллионах кюри (МКи) измерялись выбросы при самых крупных радиационных авариях или взрывах атомных бомб. Активность источников, используемых для облучения экосистем или их частей при радиоэкологических исследованиях, измеряли тысячами кюри (кКи). Для исследования миграции веществ в биологических объектах использовали микрокюри (мкКи) необходимых для этого радионуклидов, а при анализе содержания радионуклидов в воде приходилось иметь дело с активностями, кратными 10^{-12} Ки на литр.

В 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам было принято решение о полном переходе к Международной системе единиц СИ, официальной единицей активности стал **беккерель (Бк)**, который рекомендуется использовать в настоящее время

1 Бк = 1 распад/с = $2{,}73 \cdot 10^{-11}$ Ки.

В радиоэкологии для записей активностей и доз используют десятичные приставки.

д

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		Международное	русское			Международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-18}	атто	a	а
10^{15}	пета	P	П	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{12}	тера	T	Т	10^{-12}	пико	p	п
10^{9}	гига	G	Г	10^{-9}	нано	n	н
10^{6}	мега	M	М	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{3}	кило	k	к	10^{-3}	милли	m	м
10^{2}	гекто	h	г	10^{-2}	санти	c	с
10^{1}	дека	da	да	10^{-1}	деци	d	д

Несмотря на то, что для характеристики количества радионуклидов или плотностей загрязнений в радиоэкологии используется активность, часто **оказывается полезным понимать, о каком же количестве вещества в граммах идет речь**. Это особенно полезно в тех случаях, когда мы хотим **сравнить, например, загрязнения территорий химикатами, тяжелыми элементами типа свинца или ртути и радионуклидами.** В таком случае желательно все выражать в одних единицах измерений, например грамм на м^2. Полезно иметь представление о соотношении массы препарата и его активности при анализе равномерности загрязнения каких-то площадей и в ряде других случаев.

Получим выражение для веса 1 Бк любого радионуклида.

По определению 1 Бк это есть 1 распад в секунду, т. е.

$$1\ \text{Бк} = -dN/dt = \lambda \cdot N = (0{,}693/T_{1/2}) \cdot N\ .$$

Активность 1 Бк всегда обусловлена $N = 1/\lambda$ атомами и 1 Бк вещества, состоящего из радионуклидов с массовым числом А и периодом полураспада $T_{1/2}$, весит $m_{1\ \text{Бк}}$

$$m_{1\ \text{Бк}} = (T_{1/2}/0{,}693) \cdot (A/6{,}02 \cdot 10_{23}) = 0{,}24 \cdot 10^{-23}\ T_{1/2} \cdot A,$$ грамм (*****).

Рассмотрим пример.

В результате Чернобыльской аварии загрязненность некоторых территорий составила ~$1{,}5\cdot10^{6}$ Бк·м$^{-2}$ по радионуклиду ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,2 года = 9,54 $\cdot10^{8}$с). Что касается населения, то его полагалось немедленно оттуда эвакуировать. Согласно (*****), плотность загрязнения такой территории — σs радионуклидами ^{137}Cs составляет

$$\boldsymbol{\sigma_s \sim (1{,}5\cdot10^{12}\ c^{-1}\cdot км^{-2})\cdot(137г)\cdot(9{,}54\cdot10^{8}\ c)/0{,}693\cdot6{,}02\cdot10^{23} = 0{,}46\ г\cdot км^{-2}.}$$

Трудно ожидать, чтобы в реальных условиях из атмосферы вещество «вымывалось» так равномерно, чтобы в пределах каждого квадратного километра плотность его была бы постоянной, даже если само вещество хорошо диспергированно. В пределах каждого квадратного километра пробы, взятые в разных местах с площадок размером ~100 см^{2}, как правило будут показывать значительные различия в плотности загрязнений. «Пятнистость» загрязнения территории радионуклидами очень четко проявилась при анализе последствий аварии на ЧАЭС.

Флуктуации

На практике в радиоэкологии, когда нет сильного загрязнения, часто возникает следующая ситуация.

Допустим, нам нужно откалибровать прибор и для этого определить содержание ^{137}Cs в некотором стандартном образце активностью 1,66 Бк.

Установим время измерения равным 1 мин. и проведем 7 измерений. Мы, вероятно, получим числа типа: 93, 100 95, 103, 107, 92, 97 и т.д.

Только среднее их значение даст величину, близкую к 100 распадам в минуту, т. е. 1,66 Бк.

Иными словами, **для достоверного знания активности необходимо достаточно большое количество измерений.**

Промежуточный вывод

1. Для количественного определения загрязнения окружающей среды радионуклидами или их содержания в каком-то объекте разработано понятие активность и единицей измерения активности является беккерель.

В то же время величина активности должна быть всегда связана с конкретным названием радионуклида.

Становясь **на совершенно формальные позиции**, отработанное ядерное топливо или отходы производства, представляющие собой смесь радионуклидов, **можно характеризовать суммарной их активностью**.

Но **суммарная активность не будет нести какой-либо конкретной экологической информации**, полезной для определения воздействия, так как каждый радионуклид является источником характерной только для него радиации.

2. Что такое Радиоактивность. Термин «радиоактивность» был введен М. Кюри для обозначения спонтанного испускания ионизирующих, проникающих лучей некоторыми атомами. На протяжении всей своей жизни она использовала термин “радиоактивные атомы”, но не использовала терминов “радиоактивные ядра” или “радионуклиды”.

Атомные ядра можно разбить на две группы: нуклоностабильные и нуклононестабильные.

Испускание α- и β-частиц или γ-квантов, происходит в результате ядерных превращений.

Анализируя эти превращения, можно делать упор на два разных аспекта:

1. На то, что мы имеем превращение одного элемента в другой;
2. На то, что мы имеем дело с переходом нестабильного ядра в более стабильное.

Дадим «окончательное» определение радиоактивности, делая акцент на превращении одного химического элемента в другой. **Радиоактивность — это самопроизвольное превращение изотопов одного элемента в изотопы другого, происходящее путем испускания элементарных частиц или ядер. Превращения могут происходить как из основного, так и метастабильного состояния материнского нуклида за время $T_{1/2} > 10^{-7}$ с, существенно превышающее время жизни возбужденного составного ядра в ядерных реакциях, происходящих за счет сильных взаимодействий.**

3. Стабильные и нестабильные ядра. Трудности возникают и при попытке дать определения терминам «стабильные нуклиды» и радионуклиды.

Нижнюю временную границу для периода полураспада определить несложно. Так как в поле нашего рассмотрения находятся только нуклоностабильные ядра, то самые быстрые превращения радионуклидов, представляющих интерес для радиоэкологии, происходят за счет электромагнитных взаимодействий и характеризуются $T_{1/2} > 10^{-7}$ **с**.

В ядерной физике достаточно широкое распространение нашло формальное деление радионуклидов на короткоживущие и долгоживущие. Обычно к **короткоживущим** относят радионуклиды с периодом полураспада $T_{1/2} < 10$ **сут**.

Определить верхнюю временную границу для $T_{1/2}$ и отделить таким образом стабильные нуклиды от радионуклидов трудно. Однозначно это сделать, практически, невозможно. Более того, содержание в Земле ^{232}Th и ^{238}U больше, чем некоторых заведомо стабильных элементов.

Мы не имеем оснований соотносить значение $T_{1/2}$ со временем существования Солнечной системы, Галактики или Вселенной.

Не очень продуктивным является и утверждение, что радионуклидами являются те нуклиды, для которых известен период полураспада. В этом случае многое определяется экспериментальными возможностями.

4. Сколько химических элементов естественного происхождения находится в окружающей нас природной среде. Самые тяжелые — свинец $_{82}$**Pb** и висмут $_{83}$**Bi**. Два — **технеций — $_{43}$Tc и прометий — $_{61}$Pm не содержат стабильных изотопов**. Т. о., **имеется 81 стабильный химический элемент**.

Сколько стабильных изотопов у этих 81 стабильных элементов? 23 элемента моноизотопны. Рекордсменом по числу стабильных изотопов является **олово, у которого их десять**. **В окружающей нас среде находится 268 стабильных изотопов, из которых 157 являются четно-четными. Нечетно-нечетных** изотопов **четыре** и все они находятся в начале периодической системы: ^{2}H, ^{6}Li, ^{10}B и ^{14}N. Четно-нечетных стабильных нуклидов 54, а нечетно-четных — 52. (268-й нуклид – это водород — 1H, который стоит особняком при такой классификации.)

Радионуклиды с периодами полураспада порядка времени существования Солнечной системы или больше были образованы тогда (а частично и до того), когда возникло вещество, из которого сформировалась Солнечная система.

Эти радионуклиды входившие в состав вещества Солнечной системы являются основным источником естественного радиационного фона и получили название **примордиальных**. (Primordial – изначальный, исконний. Радионуклидов естественного происхождения много. Так, например, изотопы радия, радона или полония являются основными дозообразующими радионуклидами для человека, но они являются дочерними примордиальных. Во многих случаях это различие полезно иметь ввиду.)

Их делят на радионуклиды, образующие **радиоактивные семейства** (семейства ^{232}Th, ^{235}U и ^{238}U), и **отдельно встречающиеся радионуклиды**.

Дошедшие до нашего времени отдельно встречающиеся примордиальные радионуклиды, распадающиеся за счет α-распада, β^--распада или ЭЗ.

Нуклид	$T_{1/2}$, лет	Распространенность, %	Тип распада	Энергия распада, кэВ	Типичное содержание в земной коре, Бк·кг$^{-1}$.
^{40}K	$1{,}277\cdot10^{9}$	0,0117	β^- (89,3%) ЭЗ (10,7%)	$Q_{\beta^-} = 1311{,}09$ $Q_{ЭЗ} = 1504{,}9$	630
$^{50}_{23}V$	$1{,}4\cdot10^{17}$	0,25	β^- (17%) ЭЗ (83%)	$Q_{\beta^-} = 1036{,}9$ $Q_{ЭЗ} = 2208{,}2$	$2\cdot10^{-5}$
$^{87}_{37}Rb$	$4{,}75\cdot10^{10}$	27.835	β^-	$Q_{\beta^-} = 283{,}3$	70
^{113}Cd	$9{,}3\cdot10^{15}$	12,22	β^-	$Q_{\beta^-} = 316$	$<2\cdot10^{-6}$
^{115}In	$4{,}41\cdot10^{14}$	95,7	β^-	$Q_{\beta^-} = 495$	$2\cdot10^{-5}$
^{123}Te	$>1\cdot10^{13}$	0,908	ЭЗ	$Q_{ЭЗ} = 51{,}3$	$2\cdot10^{-7}$
^{138}La	$1{,}05\cdot10^{11}$	0,090	β^- (33,6%) ЭЗ (66,4 %)	$Q_{\beta^-} = 1044$ $Q_{ЭК}=1737$	$2\cdot10^{-2}$
^{144}Nd	$2{,}29\cdot10^{15}$	23,8	α	$Q_{\alpha} = 1905{,}1$ $E_{\alpha} = 1830$ кэВ	$3\cdot10^{-4}$

$7 \cdot 10^{-8}$

^{147}Sm	$1,06(2) \cdot 10^{11}$	15,0	α	$Q_\alpha = 2310,3$	0,7
^{148}Sm	$7,10^{15}$	15,0	α	$Q_\alpha = 1985,8$	
^{149}Sm	$> 2 \cdot 10^{15}$	13,82	α	$Q_\alpha = 1869,7$	
^{152}Gd	$1,08 \cdot 10^{14}$	0,20	α	$Q_\alpha = 2205,0$	$7 \cdot 10^{-6}$
^{174}Hf	$2,0 \cdot 10^{15}$	0,16	α	$Q_\alpha = 2496$	$2 \cdot 10^{-7}$
^{176}Lu	$3,78 \cdot 10^{10}$	2,59	β^-	$Q_{\beta^-} = 1191,7$	0,04
^{180}Ta метастаб.	$>1,2 \cdot 10^{15}$	0,012	α	$Q_\alpha = 2030$	
^{186}Os	$2,0 \cdot 10^{15}$	1,58	α	$Q_\alpha = 2822,0$	
^{187}Re	$4,35 \cdot 10^{10}$	62,60	β^-	$Q_{\beta^-} = 2,663$	$1 \cdot 10^{-3}$
^{190}Pt	$6,5 \cdot 10^{11}$	0,01	α	$Q_\alpha = 3249$	$7 \cdot 10^{-8}$

Дочерние продукты распада ^{232}Th, ^{235}U и ^{238}U независимо от их периода полураспада постоянно присутствуют в окружающей среде. Количество их ничтожно, но мы, тем не менее, знаем сколько их. Изотопы двух химических элементов: **астата** — $_{85}At$ и **франция** — $_{87}Fr$ являются **самыми редко встречающимися химическими элементами нашей планеты**, содержание которых известно.

Действительно, если принять содержание урана в земной коре равным 10^{14} тонн, а тория примерно в 5 раз больше, то им сопутствуют ~43 кг франция (в основном $^{223}_{87}Fr$ от распада ^{235}U) и всего ~22 г астата (в основном $^{218}_{85}At$ от распада ^{238}U).

«Благодаря» явлению радиоактивности мы оказываемся в состоянии при полной массе земной коры ~$2{,}8 \cdot 10^{25}$ г определить в ней присутствие редкого химического элемента — астата в количестве всего ~22 г, причем с относительной погрешностью, зависящей, в основном, от точности определения содержания ^{235}U и ^{238}U.

На этом пути удалось обнаружить наличие в земной коре еще одного примордиального элемента — плутония. Речь идет об изотопе **^{244}Pu**, который концентрируется в редкоземельном минерале бастнасите. Содержание его в земной коре оценивается величиной порядка нескольких грамм.