

**РАДОН: ВРАГ, ВРАЧ и ПОМОЩНИК**

Курс лекций

**Лекция 1. РАДИОАКТИВНОСТЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

## Содержание

<b>1. ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ</b>	<b>1</b>
<b>2. КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ</b>	<b>6</b>
<b>3. КОСМОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ</b>	<b>8</b>
<b>4. ТЕРРИГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ</b>	<b>9</b>
<b>5. РАДИОНУКЛИДЫ АТМОСФЕРЫ</b>	<b>14</b>
<b>6. РАДИОНУКЛИДЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ</b>	<b>17</b>
<b>7. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ</b>	<b>20</b>
<b>8. ГЕОГРАФИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА</b>	<b>23</b>

Радиоактивные элементы возникли при образовании Вселенной 15 миллиардов лет назад, существуют они и сейчас, причём во всех компонентах как живой, так и неживой материи. Связанная с естественными радионуклидами радиация – одна из природных составляющих воздуха, которым мы дышим, земли, по которой мы ходим, домов, в которых мы живем, пищи, которую мы едим, и тканей, из которых мы состоим. Мы непрерывно облучаемся космическими лучами, особенно во время воздушных перелетов и горных путешествий (да и когда лежим дома на диване, кстати, тоже). Природная ионизирующая радиация оказывает существенное влияние (обычно - положительное, но иногда и отрицательное) на биосферу (растения, дикие и домашние животные, рыбы, люди, птицы, микробы и т.п.). Поэтому изучение естественных радионуклидов, их доступности для живой материи, связанных с ними радиационных полей, флуктуаций во времени и в пространстве природного радиационного фона необходимо для объективной оценки радиоэкологического, радиационного и радионуклидного риска конкретного биологического вида, например, человека.

Управление радиоэкологическим риском требует не столько знаний о насыщенности радиоактивными изотопами окружающей среды (что, конечно, важно), сколько знаний радионуклидного состава самого живого организма. Именно комплекс внешняя-внутренняя среда, находящийся в скрещенных внешних и внутренних радиационных полях, представляет объект исследования радиохимиков, специализирующихся в охране среды обитания от человека и охране человека от неблагоприятных факторов окружающей среды.

В этой лекции мы рассмотрим особенности пространственного распределения источников ионизирующей радиации в природных средах нашей планеты, качественный и количественный состав естественных радионуклидов в воздухе, воде, горных породах и почве, а также в некоторых биологических объектах (продуктах питания, в животных и в человеке). Основное внимание будет уделено радионуклидам, вносящим существенный вклад в радиационную дозу, получаемую населением (в первую очередь – радионуклидам, являющихся материнскими радионуклидами эманаций). Коротко остановимся на динамике изменения интенсивности радиационных полей на Земле и их флуктуациях.

**1. ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ**

Ничто живое на Земле не может избежать облучения ионизирующим излучением. На нашей планете от радиационных полей укрыться негде. Жизнь тут возникла и продолжает развиваться в условиях постоянного облучения. Неизвестно, могут ли существовать наши экосистемы без постоянного (и как некоторым кажется – вредного) радиационного воздействия на них. Неизвестно даже можем ли мы безнаказанно снижать дозу, получаемую населением от различных источников излучения.

Наш организм не только подготовлен к имеющим место колебаниям радиационного воздействия, но и в значительной степени им сформирован. Наблюдение за населением отдельных регионов Земли с уровнем естественного фона во много раз превышающем средние значения, не обнаружили каких-либо неблагоприятных влияний на здоровье живущих там людей.

**Рис.1а** Вклад различных источников излучения в дозовую нагрузку населения (Общая схема)

Источником ионизирующего излучения может быть космический объект, земной объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или

способное испускать ионизирующее излучение.

*Источник ионизирующего излучения, ИИИ - объект, содержащий радиоактивный материал или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.*

В зависимости от происхождения, ИИИ бывают естественные (космические лучи, гамма-излучение от земных пород, продукты распада радона и тория в воздухе, радий и продукты его распада в строительных материалах, воздухе, питьевой воде и пище и т.п.) и искусственные (рентгеновское излучение, применяемое в медицине, радиоактивные осадки при использовании ядерного оружия, выбросы радионуклидов с отходами атомной станции в окружающую среду, а также гамма-излучение, используемое в промышленности).



**Рис. 1б.** Дозы, получаемые от естественного радиационного фона, мбэр

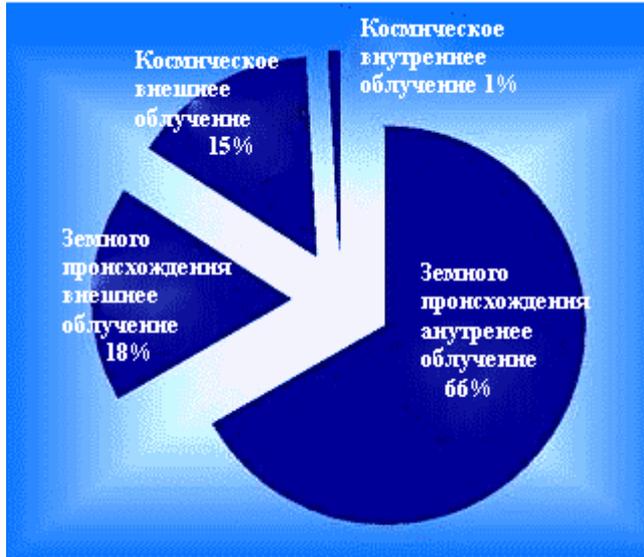
Радиационный фон Земли складывается из трех компонент:

- 1) космическое излучение;
- 2) излучение от рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
- 3) излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение по критерию месторасположения источников излучения делится на внешнее и внутреннее. Внешнее облучение обусловлено источниками, расположенными вне тела человека. Источниками внешнего облучения являются космическое излучение и наземные источники. Источником внутреннего облучения являются радионуклиды, находящиеся в организме человека.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (**Рис 2**).

**Рис.2** Естественные источники радиации



Облучению от естественных источников радиации подвергается любой житель Земли, однако одни из них получают большие дозы, чем другие. Это зависит, в частности, от того, где они живут. Уровни естественного излучения варьируют в довольно широких пределах, в среднем составляя около 2,4 мЗв в год. Наблюдение за населением отдельных регионов Земли с уровнем естественного фона во много раз превышающем средние значения, не обнаружили каких-либо неблагоприятных влияний на здоровье живущих там людей. Доза облучения зависит от образа жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для

приготовления пищи, открытых угольных жаровень, герметизация помещений и даже полеты на самолетах - все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников радиации.

*Замечание.* В системе СИ **поглощенная** доза выражается в **греях** (Гр). Внесистемная (но более распространенная!) единица – **рад**.  $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$ .  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г} = 100 \text{ рад}$ . В системе СИ **эквивалентная** доза выражается в **зивертах** (Зв). (Зиверт – единица эквивалентной дозы излучения в СИ, обозначается Зв. Названа в честь шведского ученого Г.П.Зиверта.

$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 10^2 \text{ бэр}$ )

Внесистемная единица – биологический эквивалент рентгена, **бэр**.

$$1 \text{ бэр} = \frac{1 \text{ рад}}{\text{КК}} = \frac{0,01 \text{ Дж/кг}}{\text{КК}} = \frac{0,01 \text{ Гр}}{\text{КК}} = 0,01 \text{ Зв}$$

$$1 \text{ Зв} = \frac{1 \text{ Гр}}{\text{КК}} = \frac{1 \text{ Дж/кг}}{\text{КК}} = \frac{100 \text{ рад}}{\text{КК}} = 100 \text{ бэр}$$

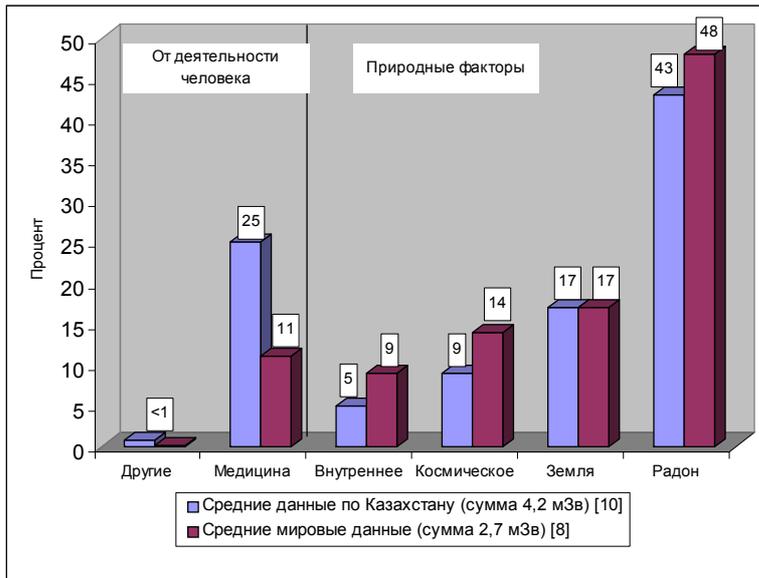
где **КК** – коэффициент качества (для биологической ткани **КК** совпадает с **ОБЭ**, относительной биологической эффективностью). Коэффициент **ОБЭ** показывает, во сколько раз данный вид излучения оказывает более сильное биологическое действие, чем рентгеновское или гамма-излучение, при одинаковой поглощенной энергии в 1 г ткани, т.е. коэффициент **ОБЭ** служит для сопоставления биологического действия разных видов ионизирующего излучения с рентгеновским и гамма-излучением. Коэффициент **ОБЭ** рекомендуют использовать только при сравнительных исследованиях действия различных видов ионизирующих излучений в радиобиологии, а при расчете защиты рекомендуют **КК**. Численные значения **КК** те же, что и для **ОБЭ**.

$$D_{\text{ЭКВ}} = D_{\text{ПОГЛ}} * \text{КК}$$

$\text{КК} = 1$  для гамма-квантов и бета-излучения,  $= 10$  для альфа-частиц,  $= 20$  для атомов отдачи,  $= 3$  для тепловых нейтронов,  $= 10$  для быстрых нейтронов.

Земные источники радиации в сумме ответственны за большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации. В среднем они обеспечивают более 5/6 годовой эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном вследствие внутреннего облучения. Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения (**Рис 3**).

Радиоактивность в природе обусловлена распространением естественных радиоактивных элементов и изотопов в различных природных образованиях: минералах и горных породах, атмосфере, гидросфере, биосфере, а также в космических телах. Природные радионуклиды, естественно распределены на поверхности и в недрах Земли, в приземном слое атмосферы, гидросфере и всех живых организмах, населяющих планету.

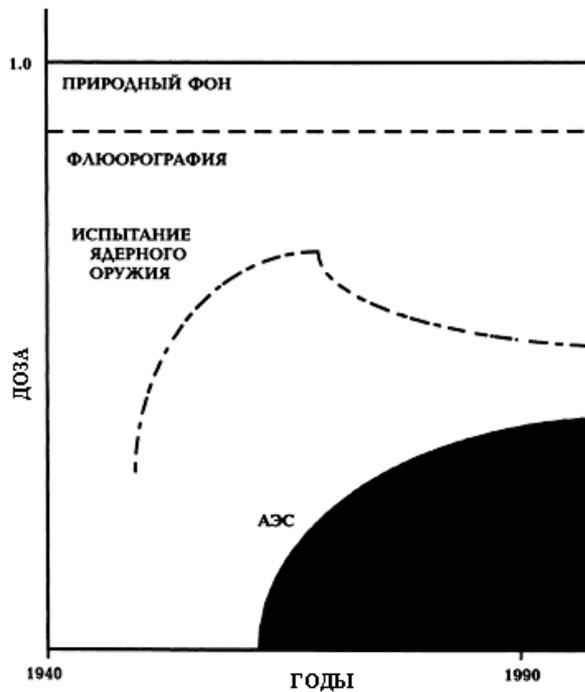


**Рис. 3** Вклад различных источников радиации в облучение населения (всего Земного шара и Казахстана, в частности).

В результате процессов радиоактивного распада Земля получает некоторое количество тепловой энергии ( $1,35 \cdot 10^{13}$  ккал/сек), что примерно соответствует тому количеству тепла, которое Земля теряет на лучеиспускание в мировое пространство. Этой энергией обусловлено увеличение температуры с глубиной

(геотермический градиент).

Вклады от разных источников в облучение варьируется в пространстве (**Рис.3**) и времени (**Рис.4**).



**Рис.4** Вклад природных факторов и деятельности человека в дозовую нагрузку на население

Динамика изменения вкладов различных источников радиации в общее облучение населения за последние 60 лет схематически изображена на **Рис.4**. Видно, что ни последствия испытаний ядерного оружия, ни развитие атомной энергетики не оказали существенного влияния на дозовую нагрузку, причем вклад этих источников в облучение постоянно снижается. Вклад от природного фона постоянен. Постоянна и доза от флюорографии и рентгеновской диагностики человека. Вклад радона в дозовую нагрузку (40-50% общей экспозиционной годовой дозы человека) в среднем на треть меньше флюорографии, но в некоторых регионах дозы от флюорографии и от радона сравнимы по величине.

Под естественным фоном излучения понимается эффективная доза ионизирующего излучения, создаваемая всеми составляющими ЕРФ. По современным воззрениям, общая средняя годовая индивидуальная эффективная доза на душу населения в мире оценивается равной 2208 мкЗв (220,8 мбэр), что соответствует годовой коллективной эффективной дозе (КЭД)  $10^7$  чел-Зв ( $10^9$  чел-бэр). Однако вклад разных составляющих во внешнее и внутреннее облучение населения неодинаков. Структура и дозовые нагрузки жителей планеты в обобщенном виде представлены в **Табл.1** и на **Рис. 5**. Естественные источники ионизирующего излучения обуславливают как внешнее облучение (космическое излучение; излучение радионуклидов, присутствующих в земной коре и строительных материалах), так и внутреннее, связанное с поступлением радионуклидов естественного происхождения при дыхании или через пищеварительный тракт.

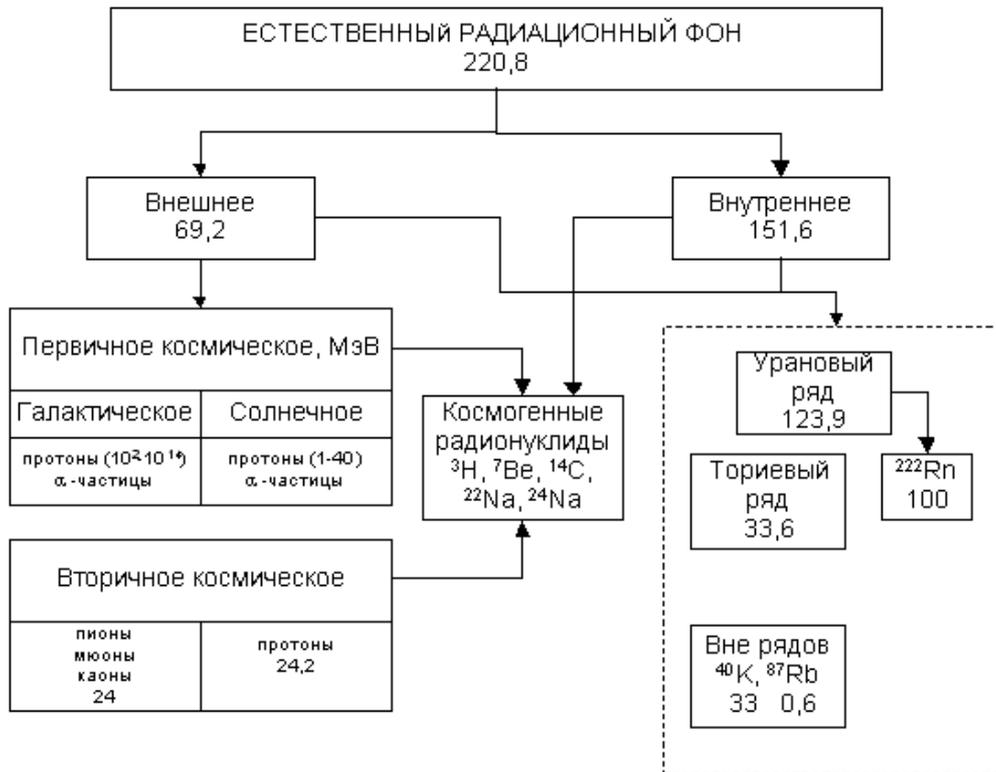
**Табл. 1.** Годовая эффективная доза от природных источников в районах с нормальным радиационным фоном, мкЗв/год (мбэр/год).

Источники излучения	Внешнее облучение	Внутреннее облучение	Суммарная доза облучения
<b>Космическое излучение:</b>			
фотонная компонента	240 (24,0)	----	240 (24,0)
корпускулярная (нейтронная)	42 (4,2)	----	42 (4,2)
<b>Космогенные радионуклиды</b>	----	15 (1,5)	15 (1,5)
<b>Земные радионуклиды</b>			
урановый ряд:			
$^{238}\text{U}$ и $^{234}\text{U}$		5 (0,5)	1239 (123,9)
$^{230}\text{Th}$		7 (0,7)	
$^{226}\text{Ra}$	100 (10,0)	7 (0,7)	
$^{222}\text{Rn}$ и $^{214}\text{Po}$		1000 (100,0)	
$^{210}\text{Pb}$ и $^{210}\text{Po}$		120 (12,0)	
ториевый ряд:			
$^{232}\text{Th}$	160 (16,0)	3 (0,3)	336 (33,6)
$^{228}\text{Ra}$ и $^{224}\text{Ra}$		13 (1,3)	
$^{220}\text{Rn}$ и $^{208}\text{Tl}$		160 (16,0)	
радионуклиды вне рядов:			
$^{40}\text{K}$	150 (15,0)	180 (18,0)	330 (33,0)
$^{87}\text{Pb}$		6 (0,6)	6 (0,6)
<b>Всего (округлено)</b>	<b>692 (69,2)</b>	<b>1516 (151,6)</b>	<b>2208 (220,8)</b>

Характерной особенностью излучения естественных источников является то, что оно воздействует на население Земли с относительно постоянной мощностью дозы в течение очень длительного периода времени. Некоторые из составляющих общей дозы облучения за счет ЕРФ довольно постоянны во времени и пространстве и практически не зависят от человеческой деятельности. Речь идет о дозах от перорального поступления  $^{40}\text{K}$ , находящегося под гомеостатическим контролем, и доз за счет ингаляционного и перорального поступления космогенных радионуклидов ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ) вследствие относительно равномерного их распределения над поверхностью Земли. Но имеются и такие составляющие дозы облучения, которые зависят от человеческой деятельности и которые в настоящее время сильно изменяются. Например, дозы за счет ингаляции радона ( $^{222}\text{Rn}$ ), торона ( $^{220}\text{Rn}$ ) и продуктов их распада при пребывании человека в помещении определяются особенностями конструкции зданий, используемых строительных материалов, систем вентиляции и т.п. Третья группа источников занимает промежуточное положение. Например, дозы от космического излучения в принципе неуправляемы, хотя человек может укрыться от них, равно как и дозы от внешнего облучения от источников земного происхождения, которые изменяются в процессе глобальной человеческой деятельности.

Естественная радиоактивность биосферы обусловлена космогенными и терригенными (земного происхождения) радионуклидами.

**Рис. 5.** Структура облучения человека за счет естественного радиационного фона



## 2. КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

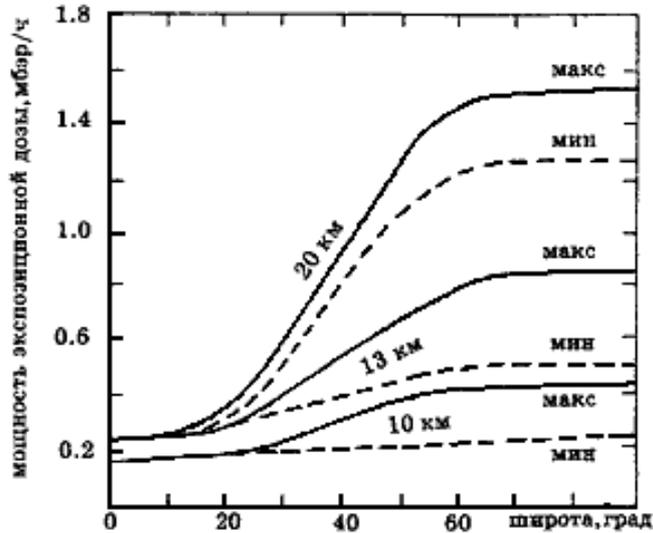
*Внешнее облучение* населения за счет естественного радиационного фона обусловлено рядом факторов. Одним из них является космическое излучение, вклад которого в индивидуальную годовую ЭД на уровне моря равен 282 мкЗв (28,2 мбэр), что составляет 12,8% от естественного фона. В пределах до 10000 м над уровнем моря мощность дозы космического излучения через каждые 1500 м высоты удваивается. На высотах от 10 до 20 км она изменяется в диапазоне от 1,8 до 8 сЗв (бэр)/год. На высотах 10-12 км, соответствующих трассам трансконтинентальных авиалайнеров, мощность дозы равна 0,002-0,004 Зв/ч. Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает примерно 40% внешнего облучения, получаемого населением от природных источников радиации.

На протяжении более чем 4,5 млрд. лет, что соответствует современным оценкам возраста солнечной системы, ее эволюция от пылегазовой туманности до белковых структур прочно связана с космосом как источником излучения. **Космические лучи** в основном приходят к нам из глубин Вселенной. Некоторая их часть рождается на Солнце во время солнечных вспышек.

Наиболее вероятные источники галактических космических лучей – вспышки сверхновых звезд и образующиеся при этом пульсары. Космические лучи – уникальный естественный источник частиц сверхвысоких энергий, позволяющий изучать процессы взаимодействия элементарных частиц и их структуру. Многие небесные тела (например, солнечная корона, Луна, поверхность которой бомбардируют частицы высокой энергии, испущенные Солнцем) являются естественными источниками рентгеновского излучения.

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят электроны, протоны и  $\alpha$ -частицы, а также ядра некоторых лёгких элементов. Это так называемое первичное космическое излучение. При взаимодействии первичного космического излучения с ядрами атомов, присутствующими в атмосфере Земли, протекает множество ядерных реакций. В результате образуются ядра новых легких элементов, а также мюоны, нейтроны, рентгеновское и  $\gamma$ -излучение. Это так называемое вторичное космическое излучение. На уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов. Воздействие на живые организмы вторичного космического излучения более

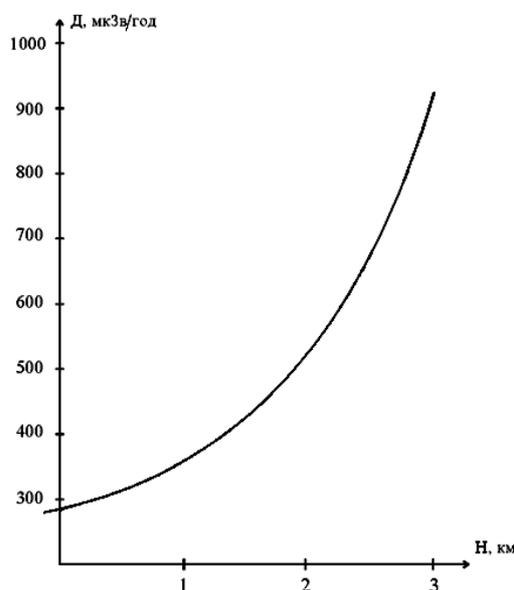
слабое, чем первичного, так что атмосфера выступает как щит, прикрывающий жизнь на Земле от вредных посланцев космоса. При прохождении космического излучения через атмосферу происходит ионизация молекул газов, так что оно может быть отнесено к ионизирующему излучению.



**Рис. 6.** Величина солнечного излучения во время максимальной и минимальной активности солнечного цикла в зависимости от высоты местности над уровнем моря и географической широты.

составляет 0.8 нГр/час и мощность эквивалентной дозы составляет 2.4 нЗв/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около 0.35 мЗв в год. Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Однако облучение это неравномерно. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого - магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения. Вариации ионизирующей составляющей космического излучения вызываются и магнитным полем Земли, отклоняющим первичные нарушенные космические ядра. Мощность эффективной дозы, вызванной ионизирующей компонентой космического излучения на открытом воздухе на уровне моря, составляет на экваторе величину порядка 260-270 мкЗв/год, в северных широтах - 270-290 мкЗв/год. По абсолютному значению эффективные дозы, обусловленные нейтронной составляющей космического излучения, в несколько раз ниже ионизирующей составляющей, но более значительно зависят от широты местности и равны в экваториальных широтах 31 мкЗв/год, в полярных - 95 мкЗв/год.

Солнечные вспышки представляют большую радиационную опасность во время космических полетов (Рис.5). Космические лучи, идущие от Солнца, в основном состоят из протонов широкого энергетического спектра (энергия протонов до 100 МэВ), Заряженные частицы от Солнца способны достигать Земли через 15-20 мин после того, как вспышка на его поверхности становится видимой. Длительность вспышки может достигать нескольких часов.



Наибольший эффект действия космического внешнего облучения связан с зависимостью космического излучения от высоты. Люди, живущие на уровне моря, получают из-за космических лучей эффективную дозу около 300 мкЗв в год. При увеличении высоты проживания людей увеличивается и получаемая ими эффективная доза. С высотой, в пределах колебаний рельефа Земли, на каждые сто метров над уровнем моря, годовая эффективная доза увеличивается на 10 мкЗв за счет уменьшения слоя атмосферы. Начиная с высоты 1,5-2,0 км, этот прирост увеличивается.

**Рис. 7.** Изменение годовой дозы космического облучения в зависимости от абсолютной высоты

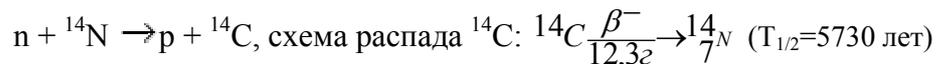
График значений мощности годовой дозы приведен на **Рис. 7**. Так, при подъеме с высоты 4000 м (максимальная высота, на которой расположены человеческие поселения: деревни шерпов на склонах Эвереста) до 12000 м (максимальная высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) уровень облучения за счет космических лучей возрастает в 25 раз. Уровень облучения растет с высотой, поскольку уменьшается экранирующий слой воздуха. На высоте 8 км мощность эффективной дозы составляет 2 мкЗв/час, что приводит к дополнительному облучению при авиаперевозках. При трансконтинентальном перелете на обычном турбовинтовом самолете, летящем со скоростью ниже скорости звука ( $T_{\text{полета}} \approx 7.5$  часа), индивидуальная доза, получаемая пассажиром (0,05 мЗв=50 мкЗв), на 20% больше, чем доза, полученная пассажиром сверхзвукового самолета ( $T_{\text{полета}} \approx 2.5$  часа) (0,04 мЗв), хотя последний подвергается более интенсивному облучению из-за большей высоты полета. Это объясняется тем, что во втором случае перелет занимает гораздо меньше времени. Коллективная эффективная доза от глобальных авиаперевозок достигает 2000 чел-Зв, что составляет на душу населения в мире в среднем около 0,001 мЗв/год, а в Северной Америке 0,01 мЗв/год.

### 3. КОСМОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

Природные искусственные (космогенные) изотопы - название немного искусственное, но оно довольно точно характеризует суть значительного количества изотопов, существующих в природе и образовавшихся под действием различного рода естественных ядерных реакций, вызванных космическими излучениями в атмосфере и под действием естественных альфа, нейтронных и гамма-излучателей в земной коре. Эти изотопы, естественно ничем не отличаются от полученных искусственно-техногенным путем. От изначально существовавших радионуклидов (U, Th, K-40 и др.) они отличаются значительно меньшим периодом полураспада и их довольно постоянное количество в атмосфере, гидросфере и почвах поддерживается за счет постоянно идущих ядерных реакций в этих сферах.

Космогенные радионуклиды постоянно возникают в стратосфере и верхней тропосфере (а частично и в литосфере) за счет взаимодействия первичного космического излучения (протонов и нейтронов) с ядрами стабильных атомов, присутствующих в воздухе (азот, кислород, аргон и др.).

Примерами ядерных реакций служат:



В результате ядерных реакций образуются радионуклиды, например, радиоактивные ядра  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^{32}\text{P}$ ,  ${}^{35}\text{S}$  и др. Из них только четыре (тритий, бериллий-7, углерод-14 и натрий-22) имеют значение с точки зрения формирования дозовых нагрузок на человека за счет внутреннего облучения (эти изотопы поступают с пищей в организм человека). Создаются дозы порядка 15 мкЗв или менее 1% от ЕРФ (**Табл.2**). В связи с относительным постоянством космического потока над земной поверхностью годовые дозы облучения за счет них являются весьма однородными в различных регионах Земли.

**Табл.2** Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека.

Радионуклид	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0.004
${}^7\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

Взрослый человек потребляет с пищей 95 кг углерода в год при средней активности на единицу массы углерода 230 Бк/кг. Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет 0,015 мЗв/год.

#### 4. ТЕРРИГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

*Терригенные радионуклиды* появились на Земле в момент ее образования и представлены двумя группами (рядами): радиоактивными семействами урана-радия и тория, а также калием-40, рубидием-87 и некоторыми другими долгоживущими радионуклидами, стоящими в средней части Периодической системы элементов. Периоды их полураспада очень велики (миллиарды лет), и поэтому естественный фон, обусловленный терригенными радионуклидами, как правило, весьма постоянен для данного места.

В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от  $10^7$  лет и выше. Физические характеристики некоторых из них представлены в **Табл. 3**.

Естественная радиоактивность литосферы обусловлена присутствием в слагающих ее геологических образованиях радиоактивных изотопов U, Th, K, Rb и др. В земной коре наиболее повышены концентрации трех радиоактивных элементов: урана ( $2,5 \cdot 10^{-4}$  %, 2,5 г/т), тория ( $1,3 \cdot 10^{-3}$  %, 13 г/т) и калия-40 (2,5 %). Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало, соответственно, от урана-238 и тория-232 – долгоживущих изотопов, включившихся в состав Земли с самого ее рождения.

**Табл. 3.** Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле.

Радионуклид	Весовое содержание земной коре	Период в полураспада, лет:	Тип распада:
Уран-238	$3 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^9$	$\alpha$ -распад
Торий-232	$8 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$\alpha$ -распад, $\gamma$ -распад
Калий-40	$3 \cdot 10^{-16}$	$1,3 \cdot 10^9$	( $\beta$ - распад, $\gamma$ -распад)
Ванадий-50	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	$\gamma$ -распад
Рубидий-87	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$\beta$ -распад
Индий-115	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta$ -распад
Лантан-138	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$\beta$ -распад, $\gamma$ -распад
Самарий-147	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$\alpha$ -распад
Лютеций-176	$3 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$\beta$ -распад, $\gamma$ -распад

Из всех терригенных радионуклидов следует подчеркнуть особую значимость калия-40, который широко распространен в природе и, будучи биогенным элементом, в основном обуславливает естественную радиоактивность растительных и животных организмов, в том числе и тела человека).

Основной вклад в радиоактивность горных пород, почв и грунтов вносят калий-40 и радионуклиды семейства урана-радия и тория. Горные породы вулканического происхождения (особенно граниты) по сравнению с осадочными (за исключением сланцев) обладают большей активностью (**Табл. 4**).

**Табл. 4.** Концентрация некоторых радионуклидов в горных породах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли.

Тип породы	Концентрация радионуклидов, нКи/кг (Бк/кг)			Мощность поглощенной дозы, мкрад/ч (10-8 Гр/ч)
	калий-40	уран-238	торий-232	
<b>Вулканические:</b>				
- кислые (граниты);	27,0 (1000)	1,60 (60)	2,20 (81)	12,0 (12,0)
- промежуточные (диориты);	19,0 (700)	0,62 (23)	0,88 (32)	6,2 (6,2)
- ультраосновные (диабазы);	4,0 (150)	0,01 (0,37)	0,66 (24)	2,3 (2,3 )
<b>Осадочные:</b>				
- известняки;	2,4 (89)	0,75 (28)	0,19 (7,0)	2,0 (2,0)
- карбонаты;	-	0,72 (27)	0,21 (7,8)	1,7 (1,7)
- песчаники;	10 (370)	0,5 (18,5)	0,30 (11)	3,2 (3,2)
- сланцы	19 (700)	1,20 (44)	1,20 (44)	7,9 (7,9)

Родоначалники радиоактивных семейств: уран-238, уран-235 и торий-232 - через ряд дочерних радиоактивных продуктов распада от урана до таллия (более 30 нуклидов) превращаются в стабильные изотопы свинца. Наиболее важное гигиеническое значение из радионуклидов, представляющих ряды урана-радия и тория, имеют уран-238, радий-226, радон-222, свинец-210 и полоний-210.

Несмотря на то, что радиоактивные элементы встречаются в тех или иных количествах повсеместно, распределение их в земной коре очень неравномерно. Наиболее высокие концентрации урана свойственны изверженным (магматическим) породам, в особенности гранитам. Высокие концентрации урана также могут быть приурочены к темноцветным сланцам, осадочным породам, содержащим фосфаты, а также метаморфическим породам, образовавшимся из этих отложений. Естественно, что и почвы, и обломочные отложения, образовавшиеся в результате переработки вышеназванных пород, также будут обогащены ураном.

По радиоактивности породообразующие минералы подразделяют на четыре группы.

1. Наибольшей радиоактивностью отличаются минералы урана (первичные - уранит, настуран, вторичные - карбонаты, фосфаты, сульфаты уранила и др.), тория (торианит, торит, монацит и др.), а также находящиеся в рассеянном состоянии элементы семейства урана, тория и др.
2. Высокой радиоактивностью характеризуются широко распространенные минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли).
3. Средней радиоактивностью отличаются такие минералы, как магнетит, лимонит, сульфиды и др.
4. Низкой радиоактивностью обладают кварц, кальцит, гипс, каменная соль и др. В этой классификации радиоактивность соседних групп возрастает примерно на порядок.

Радиоактивность горных пород определяется радиоактивностью породообразующих минералов. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в широких пределах. Радиоактивность пород и руд по эквивалентному процентному содержанию урана принято подразделять на следующие группы:

1. породы практически нерадиоактивные ( $U < 10^{-5} \%$ );
2. породы средней радиоактивности ( $U > 10^{-4} \%$ );
3. высокордиоактивные породы и убогие руды ( $U > 10^{-3} \%$ );
4. бедные радиоактивные руды ( $U > 10^{-2} \%$ );
5. рядовые и богатые радиоактивные руды ( $U > 0,1 \%$ ).

К практически нерадиоактивным относятся такие осадочные породы, как ангидрит, гипс, каменная соль, известняк, доломит, кварцевый песок и др., а также ультраосновные, основные и средние породы. Средней радиоактивностью отличаются кислые изверженные породы, а из осадочных - песчаник, глина и особенно тонкодисперсный морской ил, обладающий способностью адсорбировать радиоактивные элементы, растворенные в воде. Радиоактивные руды (от убогих до богатых) встречаются на урановых или ураново-ториевых месторождениях эндогенного и экзогенного происхождения. Их радиоактивность изменяется в широких пределах и зависит от содержания урана, тория, радия и других элементов. С радиоактивностью горных пород тесно связана радиоактивность природных вод и газов. В целом в гидросфере и атмосфере содержание радиоактивных элементов ничтожно мало. Подземные воды могут иметь разную радиоактивность. Особенно велика она у подземных вод радиоактивных месторождений и вод сульфидно-бариевого и хлоридно-кальциевого типов. Радиоактивность почвенного воздуха зависит от количества эманаций таких радиоактивных газов, как радон, торон, актинон. Ее принято выражать коэффициентом эманирования пород ( $\epsilon$ ), являющимся отношением количества выделившихся в породу долгоживущих эманаций (в основном радона-222 с наибольшим периодом полураспада) к общему количеству эманаций. В массивных породах  $\epsilon = 5 - 10\%$ , в рыхлых трещиноватых  $\epsilon = 40 - 50 \%$ , т.е. увеличивается с ростом коэффициента диффузии.

Кроме общей концентрации радиоактивных элементов, важной характеристикой радиоактивности сред является энергетический спектр излучения или интервал распределения энергии. Известно, что каждый радиоактивный элемент характеризуется определенным энергетическим спектром. Например, для урано-радиевого ряда максимальная энергия гамма-излучения не превышает 1,76 МэВ, а суммарный спектр 0,65 МэВ, для ториевого ряда аналогичные параметры составляют 2,62 и 1 МэВ. Энергия гамма-излучения калия-40 постоянна (1,46 МэВ). По суммарной интенсивности гамма-излучения можно оценить наличие и концентрацию радиоактивных элементов, а, анализируя спектральную характеристику (энергетический спектр), можно определить концентрацию урана, тория или калия-40 в отдельности.

В земных объектах уран и торий могут входить в заметных количествах в кристаллические решетки ряда минералов в виде изоморфной примеси и даже образовывать самостоятельные урановые и ториевые минералы, в которых эти элементы являются главными компонентами. Важнейшими урановыми минералами являются безводные его окислы. При преобладании в составе минерала окислов 4-валентного урана он называется уранитом, при преобладании 6-валентного урана - урановой смолкой. Эти минералы имеют черный цвет и характерный смоляной блеск в свежем изломе. К важнейшим ториевым минералам относятся торианит (безводный окисел тория), торит (силикат тория) и монацит (безводный фосфат церия, в котором содержание тория достигает иногда 28%). Монацит - очень устойчивый минерал и при разрушении породы переходит в россыпи. Монацитовые пески являются важным источником для извлечения тория и редких земель. Уран значительно более подвижен, чем торий, и при разрушении минералов мигрирует в растворенном состоянии, образуя затем серию вторичных минералов, объединяемых под общим названием «урановые слюдки». Эти минералы легко растворимы и характеризуются отсутствием у них радиоактивного равновесия. Радий - элемент весьма подвижный, что объясняется положением его в кристаллической решетке урановых минералов: образуясь из урана путем трех актов  $\alpha$ -распада, Ra находится не в узлах кристаллической решетки, а в междоузловых промежутках кристалла, он легко попадает в поры, трещины и другие нарушения кристалла и выщелачивается водой или растворами. В результате, равновесие радий уран может быть существенно сдвинуто. Может реализоваться «нормальный» сдвиг равновесия (радия меньше, чем урана) или «аномальный»

сдвиг равновесия (дочернего радия больше материнского урана). Так, некоторые минеральные воды, воды нефтяных месторождений, глубоководные океанические ила обогащены радием. В морской воде содержание Ra не превышает  $1 \cdot 10^{-10}$  мг/м<sup>3</sup>, в некоторых же минеральных источниках его содержание может достигать до  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  г/л.

В некоторых условиях радий накапливается и может образовывать радиевые минералы, вообще не содержащие урана (например, радиокальцит). Высокая миграционная способность радия и радона создает вокруг урановых месторождений ореолы повышенной активности почвенного воздуха (так называемые радиоактивные аномалии), иногда превышающие кларковые содержания этих элементов в сотни и тысячи раз. Часто в таких ореолах в ряду генетически связанных радионуклидов наблюдается существенные сдвиги радиоактивных равновесий.

Из изотопов радия образуется подвижный компонент – радиоактивный инертный газ – радон, вносящий основной вклад в дозовую нагрузку на человека. Основными источниками радона являются горные и осадочные породы, содержащие уран (радий):

- - бокситы и углистые сланцы тульского горизонта нижнего карбона, залегающие на глубинах от 0 до 50 м и с содержаниями урана более 0,002%;
- - углеродисто-глинистые диктионемовые сланцы, глауконитовых и оболочковых песков и песчаников пакерортского, цератопигиевого и латоринского горизонтов нижнего ордовика, залегающие на глубинах от 0 до 50 м с содержанием урана более 0,005%.
- - углеродсодержащие гравелиты, песчаников и алевролитов гдовского горизонта венда, залегающие на глубинах от 0 до 100 м с содержанием урана более 0,005 %;
- - граниты рапакиви верхнего протерозоя, залегающие приповерхностно и имеющих содержание урана более 0,0035 %;
- - калиевые, микроклиновые и плагиомикроклиновые граниты протерозойско-архейского возраста с содержанием урана более 0.005 %;
- - гранитизированные и мигматизированные архейские гнейсы, залегающие приповерхностно, в которых урана более 3,5 г/т.

*Радиоактивность почв* зависит прежде всего от активности материнских горных пород, а также интенсивности процессов обмена радионуклидов между почвами и грунтовыми водами, содержания в почвах воды, органических веществ и других факторов. При этом наибольшей радиоактивностью обладают сероземы, наименьшей - торфяники (Табл. 5).

**Табл. 5.** Концентрация некоторых радионуклидов в почвах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли.

Тип почвы	Концентрация радионуклидов, нКи/кг (Бк/кг)			Мощность дозы, мкрад/ч ( $10^{-8}$ Гр/ч)
	калий-40	уран-238	Торий-232	
Сероземы	18 (660)	0,85 (31)	1,3 (48)	7,4 (7,4)
Серо-коричневые	19 (770)	0,75 (27)	1,1 (41)	6,9 (6,9)
Каштановые	15 (450)	0,72 (26)	1,0 (37)	6,0 (6,0)
Черноземы	11 (410)	0,58 (21)	0,97 (36)	5,1 (5,1)
Серые лесные	10 (370)	0,48 (17)	0,72 (27)	4,1 (4,1)
Дерново-подзолистые	8,1 (290)	0,41 (15)	0,60 (22)	3,4 (3,4)
Подзолистые	4,0 (15)	0,24 (9)	0,33 (12)	1,8 (2,8)
Торфянистые	2,4 (88)	0,17 (6)	0,17 (6)	1,1 (1,1)
Средняя для всего мира	10 (370)	0,7 (26)	0,7 (26)	4,6 (4,6)
Типичный диапазон	3- 20 (100 - 740)	0,3- 1,4 (11 - 54)	0,2 - 1,3 (7 - 48)	1,4 - 9,0 (1,4 - 9,0)

Средняя концентрация радия-226 в почвах составляет 26 Бк/кг (0,7 нКи/кг), свинца-210 и полония-210 - примерно по 33 Бк/кг (0,9 нКи/кг), причем около 30% этих изотопов попадает в

почву с атмосферными выпадениями. Активность горных пород и почв за счет рубидия-87 колеблется от 1 до 200 Бк/кг (0,036-5,5 нКи/кг), другие естественные радионуклиды содержатся в значительно меньших количествах. Общая удельная  $\gamma$ -активность почвы составляет примерно 550-740 Бк/кг (15-20 нКи/кг).

Содержание естественных радионуклидов в разных типах почв различно (Табл. 6).

**Табл. 6.** Содержание радиоактивных элементов в почвах (%).

Почвы	Радий, *10 <sup>-10</sup>	Уран, рассчитанный по равновесию радием, *10 <sup>-4</sup>	Истинное содержание урана, *10 <sup>-4</sup>	Торий*10 <sup>-4</sup>	Торий/Уран
Подзолистые	0,89	2,66	0,12	4,8	40
Серые лесные	0,28	0,84	0,12	6,0	50
Краснозем	0,30	0,90	0,35	2,6	7,1
Чернозем	0,91	2,72	0,93	5,2	5,7

Из **Табл.6** следует, что отношения тория к урану во всех почвах, особенно в подзолистых и серых лесных, значительно выше, чем в горных породах, за счет которых образовались эти почвы. Известно, что в горных породах это отношение обычно близко к трем. Такое относительное обеднение почв ураном легко понять, если учесть, что он гораздо лучше переходит в растворы и выносится из почвы, чем торий. Недостаток урана в почвах подтверждается, если сравнить его количество с содержанием радия. Урана в почвах значительно меньше, чем следовало бы, если бы он находился в равновесии с радием, как это наблюдается в горных породах, где на 1 г радия приходится около 3000000 г урана. Уран выносится из почв в относительно больших количествах, чем радий, т. е. в природных растворах ожидается большее обогащение ураном по сравнению с радием.

Природная радиоактивность нашла применение в геологии. Эманационная съемка, наземная радиометрия, гамма-аэросъемка и гамма-карottage буровых скважин являются эффективными методами поиска урановых месторождений и залежей калиевых солей. Большое значение имеют также радиологические методы определения абсолютного возраста геологических образований, морских и озерных отложений, использующие постоянство скорости радиоактивного распада в качестве эталона времени.

Природные радионуклиды и продукты их распада, находясь в объектах окружающей среды, являются источником внешнего облучения, а при попадании внутрь организма через органы дыхания и желудочно-кишечный тракт всасываются, в той или иной мере задерживаются в органах и тканях, вследствие чего происходит внутреннее облучение. У многих растительных и животных организмов отмечается способность к накоплению радионуклидов.

Дозы излучения над поверхностью Земли, создаваемые природными радионуклидами, определяются прежде всего их содержанием в грунте, где их концентрация зависит от радиоактивности почвообразующих горных пород, от процессов выщелачивания почв грунтовыми водами, сорбции радионуклидов почвами и осаждения их из почвенных вод.

Уран и торий широко распространены в окружающей среде и является основным источником радиоактивности грунта, что необходимо учитывать при строительстве жилищ. Типичные концентрации в исходных продуктах строительных материалов составляют: 1-10 ppm совместно урана и тория в песке, сланцах или известняке и 3-12 ppm для урана и 10-80 ppm для тория в граните. Соответствующие активности варьируются от 0,02 до 0,60 Бк/г.

*1 ppm – одна часть на миллион.*

**Табл. 7.** Основные величины общей удельной (объемной)  $\gamma$ -активности объектов внешней среды

Объекты внешней среды	Единицы измерения	Активность
Аэрозоли приземного слоя воздуха	пКи/м <sup>3</sup> (Бк/м <sup>3</sup> )	0,01 - 0,20 ( $3,7 \cdot 10^{-4}$ - $7,4 \cdot 10^{-3}$ )
Атмосферные выпадения (осадки)	мКи/км <sup>2</sup> в год (Бк/км <sup>2</sup> в год)	15,0 - 25,3 ( $5,5 \cdot 10^8$ - $9,3 \cdot 10^8$ )
Вода питьевая	пКи/л (Бк/л)	3,0 - 8,0 (0,1 - 0,3)
Вода морская	нКи/л (Бк/л)	0,1 - 0,36 (3,7 - 13,4)
Почва	нКи/кг (Бк/кг)	15,0 - 20,0 (550 - 740)
Донные отложения	- " -	20,0 - 30,0 (740 - 1110)
Растения наземные	- " -	2,0 - 5,0 (74 - 185)
Водоросли морские	- " -	3,0 - 10,0 (110 - 370)
Пищевые продукты (по <sup>40</sup> K)	- " -	0,6 - 18,0 (22 - 670)

Средняя эффективная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников естественной радиации, составляет примерно 350 мкЗв, то есть чуть больше средней индивидуальной дозы облучения из-за радиационного фона, создаваемого космическими лучами на уровне моря.

Эффективная доза внешнего излучения, обусловленная всеми природными радионуклидами, колеблется от 3,2 до 8,1 мЗв/год (31,5-81 мбэр/год), составляя в среднем 41 мбэр/год. При этом долгоживущие терригенные радионуклиды, содержащиеся в объектах окружающей среды, создают на высоте 1 м над поверхностью Земли вне помещений среднюю мощность поглощенной дозы в воздухе  $4,6 \cdot 10^{-2}$  мкГр/ч (4,6 мкрад/ч). Из природных радионуклидов наибольший вклад в формирование дозы внешнего облучения (наряду с радием и торием) вносит калий-40 ( $T_{1/2}=1,3 \cdot 10^9$  лет). Калий является одним из наиболее широко распространенных элементов в природе. Содержание его в земной коре превышает содержание урана и тория вместе с продуктами их распада в сотни раз, а радия-226 - в миллионы раз. При этом доля его радиоактивного изотопа (калия-40) в естественной смеси изотопов калия составляет 0,019%. Находясь повсюду в окружающей среде (в почве, растениях и пр.), калий обуславливает значительное внешнее облучение (150 мкЗв/год), или около 7% от всего естественного радиационного фона. Вклад радионуклидов уранового и ториевого рядов во внешнее облучение человека также весьма существенный: 310 мкЗв (31 мбэр)/год. Вместе с калием-40 и рубидием-87 на них приходится примерно 1/5 всей дозы естественного облучения человека. Это объясняется их высоким содержанием в почвах и строительных материалах. Вклад во внешнее излучение космогенных радионуклидов крайне незначителен.

## 5. РАДИОНУКЛИДЫ АТМОСФЕРЫ

Радиоактивность атмосферы Земли связана как с естественными (изотопы радона и продукты их распада, тритий, <sup>14</sup>C, входящий в состав углекислого газа и метана и др.) так и техногенными (криптон-83, ксенон-133, тритий).

Естественная радиоактивность воздуха обусловлена выделением из почв газообразных продуктов радиоактивных семейств урана-радия и тория - радона-222, радона-220 (торона), радона-219 (актинона) и дочерними продуктами их распада, находящимися, главным образом, в аэрозольной форме.

**Табл. 8.** Источники радона-222 в земной атмосфере.

Источники	Активность радона, ( $10^{15}$ Бк/год)
Почва	8900
Растительность и подземная вода	2000
Океан	850
Дома	30
Природный газ	0,3
Уголь	0,02
<b>В среднем</b>	<b>1300</b>

Торон в воздухе содержится в значительно меньших количествах. Дочерние продукты распада радона и торона находятся в воздухе в виде золь, причем отношение их концентраций к концентрации самих эманаций составляет 0,9-0,4, снижаясь до 0,1 и менее после дождей. Содержание космогенных радионуклидов в приземном слое воздуха крайне незначительно.

В окружающую среду радон поступает из различных источников. Большая часть выделяется из скальных пород в земной коре и переносится к поверхности потоками грунтовых вод. Основные источники выбросов радона в окружающую среду приведены в **Табл. 9**.

**Табл. 9.** Установленные выбросы  $^{222}\text{Rn}$  в США в 1978 г. от различных естественных и техногенных источников

Источник	Ежегодные выбросы, Бк/г
Интерьер помещений, зданий	$5,55 \cdot 10^{14}$
Естественные почвы	$4,44 \cdot 10^{18}$
Естественные испарения	$3,26 \cdot 10^{17}$
Природный газ:	
Домашние кухонные плиты	$7,4 \cdot 10^{12}$
Домашние обогреватели	$2,96 \cdot 10^{11}$
Промышленное использование	$4,07 \cdot 10^{14}$
Урановая промышленность:	
Обогащение (действующее производство)	$7,4 \cdot 10^{15}$
Обогащение (закрытое производство)	$5,55 \cdot 10^{15}$
Неурановые рудники:	
Фосфатные	$1,96 \cdot 10^{15}$
Угольные	$5,18 \cdot 10^{14}$
Фосфатные удобрения	$1,78 \cdot 10^{15}$
Жидкое нефтяное топливо:	
Домашние кухонные плиты	$6,66 \cdot 10^{10}$
Домашние обогреватели	$4,81 \cdot 10^{10}$
Геотермальная энергия	$2,15 \cdot 10^{13}$
Угольные ТЭЦ	$1,85 \cdot 10^{13}$
Нефтяные и газовые скважины	$8,51 \cdot 10^{12}$

Среднее содержание  $^{238}\text{U}$  на материках около 3 мкг/т. При этом результирующая активность горных пород составляет 50000 Бк/т\*с, т.е. каждую секунду тонна горной породы генерирует 50000 атомов радона. Однако радон в недрах земли распространен крайне неравномерно. Это связано с тем, что радон накапливается в тектонических нарушениях, куда он поступает по системам микротрещин из горных пород.

Величина поток радона из горных пород определяется концентрацией в них материнских нуклидов эманации, их коллекторскими свойствами (способностью аккумулировать радон) и коэффициентом эманирования (способностью выделять накопленный

радон). Нередки случаи, когда слаборадиоактивные породы содержат в своих пустотах и трещинах радон в количествах, в сотни и тысячи раз больших, чем более радиоактивные горные породы. При своеобразном дыхании Земли радон выделяется из горных пород в атмосферу, причем в наибольших количествах из участков Земли, в пределах которых имеются коллекторы радона.

Наиболее важный естественный источник  $^{222}\text{Rn}$  – распад  $^{226}\text{Ra}$  в почве и скальных породах в земной коре. Среднее содержание  $^{226}\text{Ra}$  в почве равно  $2 \cdot 10^{-12}$  г радия на 1 г почвы. Гамма-излучение над горными породами и почвами за счет естественных изотопов радия, тория (и их продуктов распада) и калия колеблется обычно от 7 до 20 мкР/час, составляя в среднем 8-10 мкР/час (без учета гамма-излучения за счет космического излучения, равного 3,7-4,6 мкР/час). В некоторых районах массового проживания человека фон естественной радиации значительно превосходит средний уровень по земному шару (за счет аномально высокого содержания в почве естественных радионуклидов, а также из-за повышения интенсивности космических лучей с увеличением высоты). Так в монацитовых районах Индии мощность дозы достигает 320 мкРад/час (2,8 рад/год), Бразилии – 115 мкРад/час, районах вулканической экстрезии 1370 мкРад/час (12 рад/год), гранитных районах Франции – 40 мкРад/час. Содержание радия в морской воде колеблется в пределах  $(0,007-0,3) \cdot 10^{-12}$  кюри/л, в реке Миссисипи –  $(1-3) \cdot 10^{-12}$ , в питьевой воде: Россия  $1 \cdot 10^{-12}$ , Австрия –  $6 \cdot 10^{-12}$ , колодцы США – до  $3,5 \cdot 10^{-12}$ , источники: США  $3 \cdot 10^{-7}$ , Япония  $7 \cdot 10^{-7}$ , Чехия (Яхимов)  $5 \cdot 10^{-7}$ , воды урановых месторождений  $(8-2000) \cdot 10^{-12}$  кюри/л. Источники минеральных вод СНГ: Пятигорск  $3 \cdot 10^{-12}$ , Баку  $9 \cdot 10^{-12}$ , Ухта  $7,5 \cdot 10^{-9}$ , Закавказье (№18)  $3,7 \cdot 10^{-10}$ , Магиста  $5 \cdot 10^{-11}$  кюри/л. Радиоактивность травы равна  $1 \cdot 10^{-8} - 0,5 \cdot 10^{-9}$  кюри/кг, мхов –  $0,5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-7}$ . Содержание радия-226 в растениях и пищевых продуктах изменяется от  $0,1 \cdot 10^{-12}$  до  $6,1 \cdot 10^{-12}$  кюри/г. Содержание радия в зерне  $2,3 \cdot 10^{-15}$  кюри/г продукта, в картофеле  $9,6 \cdot 10^{-15}$ , в сухом молоке  $1,7 \cdot 10^{-15}$ , в треске  $4,0 \cdot 10^{-15}$ , моркови и капусте  $1,7 \cdot 10^{-15}$  кюри/г. Содержание радия-226 в теле человека колеблется в пределах (3-1400) пкюри/г (в среднем 75), радия-228 (мезоторий) 50 пкюри.

В результате радиоактивного распада изотопов радия атомы радона попадают в кристаллическую решетку минералов. Процесс выделения радона из минералов и пород в паровое или трещинное пространство получил название эманирования. Не все атомы радона могут выделиться в поровое пространство, поэтому для характеристики степени высвобождения радона используется коэффициент эманирования.

**Эманирование** – выделение радиоактивных изотопов радона из твердых веществ, содержащих изотопы радия. Используется, например, при поиске радиоактивных руд и минералов.

**Эксхалиция** – выделение газов (любых!) из горных пород, почвы, вулканов и т.п.

**Замечание:** при изучении выхода эманации из тел небольших размеров (например, из зерен порошков) используют термин **эманирование**, при изучении выхода эманации из обширных геологических структур или из слоя почвы предпочитают термин **эксхалиция** (эксхалиция).

Скорость эксхалиции зависит от характера породы, ее структуры и степени ее раздробленности, а также от таких параметров, как пористость влажности и температура, а также от времени суток, сезона и метеорологических условий. Различают два механизма эманирования: за счет отдачи и за счет диффузии. Чем меньше зерна породы, тем больше внешняя поверхность зерен, тем активнее идет процесс выделения радона.

Миграция радона зависит от характера заполнения порового пространства породы. В зоне аэрации, то есть выше уровня грунтовых вод, поры и трещины пород и почв заполнены, как правило, воздухом. Ниже уровня грунтовых вод все пустотное пространство пород заполнено водой (в нефтегазоносных районах оно может быть также заполнено нефтью и газом). В первом случае радон как всякий газ распространяется по законам диффузии. Во втором - может также мигрировать вместе с водой. Дальность миграции радона определяется его периодом полураспада. Поскольку этот период не очень велик, дальность миграции радона не может быть большой. Для сухой породы она больше, однако, как правило, радон мигрирует в водной среде. Именно поэтому наибольший интерес представляет изучение поведения радона в воде.

Концентрации изотопов радона и продуктов их распада в приземном слое воздуха разных районов земного шара различны; водная поверхность, снежный и ледовый покровы препятствуют выходу радиоактивных газов из почв и горных пород, эманирование же из самих этих объектов очень мало. Поэтому среднее содержание радона-222 в воздухе континентальных областей равно примерно 3,7 (0,1), в приморских районах и на островах - 0,37 (0,01), над океанами и полярными областями - 0,037 Бк/м<sup>3</sup> (0,001 пКи/л).

Во всех местах залегания урановых и ториевых минералов, радон и торон поступают в атмосферу путем диффузии (Важную роль играет и процесс отдачи, но мы им займемся позднее). Поскольку выделение радона из почвы сильно зависит от типа почвы в данной местности и от атмосферных условий, поток радона из почвы и соответствующие его концентрации в атмосфере сильно изменяются в зависимости от местности и времени суток. Однако существует достаточное число данных для того, чтобы оценить выбросы радона от этого источника значением  $4,44 \cdot 10^{18}$  Бк/год. Относительно малые количества (менее 0,2%) приходятся на долю деятельности по добыче урана и на долю отвалов переработанных руд, т.е. на деятельность, связанную с производством ядерной энергии. Средние концентрации радона и торона в воздухе составляют  $1-3 \cdot 10^{-13}$  и  $0,5 \cdot 10^{-13}$  кюри/л. В районах повышенной естественной радиоактивности эти значения могут быть выше в несколько десятков раз. Выход радона и торона из почвы в атмосферу (эксхалиция) колеблется от времени года. Так, эксхалиция радона в Павловске (под Петербургом) в среднем составляет весной, летом, осенью и зимой 2,6; 6,6; 7,7 и  $5,2 \cdot 10^{-10}$  кюри/м<sup>3</sup>\*ч соответственно.

Помимо содержания естественных радиоактивных элементов урана и тория в почве большое влияние на величину удельной концентрации радона и торона в атмосферном воздухе оказывают условия перемещения воздушных масс. Наибольшая концентрация изотопов радона наблюдается в приземном слое атмосферы, с увеличением высоты она уменьшается. Если концентрацию этих газов на уровне почвы принять за 100%, то на высоте 100 м концентрация радона 69%, а торона 25%. До 90% активности естественных радиоактивных изотопов, содержащихся в воздухе, сорбировано на частицах диаметром не более 5 микрон; при этом основная часть активности приходится на аэрозоли диаметром от 0,001 до 0,4 мк.

## 6. РАДИОНУКЛИДЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Все естественные источники пресной воды содержат в растворенном виде природные радионуклиды.

Общая естественная объемная *радиоактивность пресных вод* находится в пределах десятков-сотен Бк/м<sup>3</sup> (единиц-нескольких десятков пКи/л) и определяется разнонаправленными процессами выщелачивания и сорбции радионуклидов в горных породах и почвах, через которые протекают грунтовые воды, а также вымыванием радионуклидов из атмосферы метеорными водами. Среднее содержание калия-40 в грунтовых водах составляет 1850 (50), речных - 290 (7,7) и озерных - 480 Бк/м<sup>3</sup> (13 пКи/л). Диапазон концентраций радионуклидов семейств урана-радия и тория в пресных водах очень велик и для открытых водоемов по изотопам урана лежит в пределах 0,25-630 (0,007-17,0), радия-226 - 1-110 (0,03-3,0), свинца-210 и полония-210 - менее 3,7 Бк/м<sup>3</sup> (0,1 пКи/л).

Из подземных пресных вод наибольшей радиоактивностью обладают воды, связанные с кислыми магматическими породами, наименьшей - с осадочными. Последние чаще и используются для целей коммунального водоснабжения. Средняя концентрация радия-226 в воде водопроводов РФ составляет 37 Бк/м<sup>3</sup> (1,0 пКи/л). Содержание свинца-210 и полония-210 в метеорных водах - около 110 Бк/м<sup>3</sup> (3,0 пКи/л). Рубидий-87 в пресных водах находится в количествах, составляющих доли пКи/л (единицы Бк/м<sup>3</sup>). Органическая часть илов открытых водоемов содержит большое количество калия-40, что обуславливает и большую их радиоактивность по сравнению с водой и почвами.

*Радиоактивность морских вод* обусловлена в основном калием-40, концентрация которого зависит от степени ее солености и в открытом океане достигает  $1,3 \cdot 10^4$  Бк/м<sup>3</sup> (350 пКи/л). Другие природные радионуклиды содержатся в морских водах в значительно меньших количествах: изотопы урана - 26-45 (0,7-1,2), радий-226 - 0,25-11 (0,007-0,3), рубидий-87 - до 63

Бк/м<sup>3</sup> (17 пКи/л). Основное количество естественного трития находится в морской воде, объемная активность которой по этому радионуклиду равняется 220-900 Бк/м<sup>3</sup> (6,0-24,0 пКи/л).

Интенсивное вымывание радионуклидов из толщи горных пород приводит к образованию в некоторых районах радиоактивных вод, к которым относятся воды, содержащие радон-222 в количестве более  $1,85 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> ( $5 \cdot 10^9$  Ки/л), радий-226 - более  $1 \cdot 10^{-11}$  г/л или уран - более  $3 \cdot 10^{-5}$  г/л. Подземные радиоактивные воды широко используются при лечении ряда заболеваний костно-мышечной системы и ряда других. По преимущественному содержанию конкретных радионуклидов они подразделяются на радоновые (курорты Белокуриха, Железноводск, Пятигорск), радиевые (курорты Исти-Су, Кисловодск, Цхалтубо), радоно-радиевые (курорт Мацеста, Ильменские и Славянские источники), радоно-радиево-урановые, ураново-радиевые и урановые.

Из радионуклидов, потребляемых с питьевой водой, наиболее опасны  $\alpha$ -излучающие изотопы. Ниже приведены основные  $\alpha$ -излучатели и соответствующие эффективные дозы, которые может получить человек за год употребления воды, содержащей любой из этих  $\alpha$ -радионуклидов с уровнем радиоактивности 0.1 Бк/л.

**Табл. 10** Растворенные в воде радионуклиды -  $\alpha$ -излучатели.

Радионуклид	Обозначение	Годовая доза при уровне радиоактивности 0.1 Бк/л, мЗв
Полоний-210	<sup>210</sup> Po	0.045
Радий-224	<sup>224</sup> Ra	0.006
Радий-226	<sup>226</sup> Ra	0.016
Торий-232	<sup>232</sup> Th	0.130
Уран-234	<sup>234</sup> U	0.003
Уран-238	<sup>238</sup> U	0.003
Плутоний-239	<sup>239</sup> Pu	0.04

Из **Табл.10** видно, что только в случае <sup>232</sup>Th, при его содержании в воде на уровне  $\alpha$ -активности в 0.1 Бк/л будет превышена считающейся безопасной доза в 0.1 миллизиверт (мЗв) за год. Так как торий-232 обычно составляет лишь малую долю, общей альфа радиоактивности, то Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) сочла возможным рекомендовать величину 0.1 Бк/л в качестве предельного значения общей альфа активности для целей рутинного контроля радиологической безопасности воды.

В США, примерно в 13600 случаев смерти от онкологических легочных заболеваний связывают с облучением от радона воздуха и приблизительно 200 случаев от облучения радоном, находящегося в питьевой воде. Радон попадает в воду из окружающей почвы, а также гранитов, базальтов, песка с которыми соприкасаются водоносные слои. Поэтому концентрация радона в водах зависит от концентрации материнских элементов (тория, урана, радия) в горных породах (все горные породы содержат радий), омываемых ею, коэффициента эманирования, пористости или трещиноватости горных пород (коэффициент эманиции тем выше, чем выше трещиноватость пород) и скорости движения воды (расхода потока). Рыхлые или трещиноватые породы характеризуются повышенными концентрациями радона (зоны тектонических нарушений, кора выветривания и т.д.). Кристаллические породы обычно имеют более высокую концентрацию урана, чем средние осадочные породы. Примером пород, которые имеют повышенную концентрацию урана, являются граниты, сиениты пегматиты, кислые вулканические породы, а также кислые гнейсы. Только незначительная часть радона, который аккумулируется в воде, накапливается из радия в воде. Поэтому самые высокие уровни радона в воде встречаются в водах, омывающих кристаллические породы высокой трещиноватости с высоким содержанием радия, а также омывающих пески в которых произошло переотложение радия вымытого ранее из кристаллических пород. Подземная вода собирает радон с огромных массивов геологических пород. Эти факты определяют то, что количество радона в воде существенно выше количества радия, часто в десятки и сотни раз.

Подземные воды трещинных массивов кислых кристаллических пород обычно отличаются наиболее высокой концентрацией радона, достигающей 500 Бк/л и выше. Значительно ниже концентрация радона в водах основных изверженных пород. Трещинные воды известняков, песчаников, сланцев обычно имеют концентрацию радона в пределах 10-100 Бк/л. Однако, в отдельных случаях, и в этих породах могут встречаться повышенные концентрации радона. Подземные воды в горизонтах грунтовых вод, залегающих недалеко от поверхности, обычно имеют более низкую концентрацию радона, составляющую менее 50 Бк/л. В поверхностных водах концентрация радона, как правило, не превышает 2-5 Бк/л, главным образом, из-за того, что радон успевает распасться в течение существования воды в поверхностных условиях или уйти в атмосферу за счет аэрации.

В глубинных грунтовых водах радона заметно больше, чем в поверхностных водостоках и водоемах. Например, в подземных водах его концентрация может изменяться от 4-5 Бк/л до 3-4 МБк/л, то есть в миллион раз. В водах озер и рек концентрация радона редко превышает 0,5 Бк/л, а в водах морей и океанов - не более 0,05 Бк/л. Радон попадает из вод в атмосферу за счет процессов эксхалации-дегазации с выносом радона из воздушных пузырьков, содержащихся в воде, в атмосферу. Наиболее интенсивно этот процесс происходит при разбрызгивании, испарении и кипении воды.

Радиоактивные воды в зависимости от преобладания того или иного радиоэлемента подразделяются на радиевые, радоновые, радоно-радиевые, урано-радиевые, мезоториево-радиевые и т.д. Радоновые воды широко применяются в бальнеологии (Пятигорск, Цхалтубо, Белокуриха). Радиевые воды характерны для некоторых нефтяных районов и могут быть использованы для промышленной добычи радия.

Радон содержится во многих минеральных водах, используемых в медицинских целях (например, на бальнеологических курортах). Подземные воды, основным лечебным фактором которых является радон, пользуются большой популярностью во всем мире. Всемирно известные курорты Яхимов, Бромбах, Баден-Баден знамениты именно радоновыми водами. По существующим в нашей стране стандартам к радоновым минеральным водам относятся воды, содержание радона в которых превышает 185 Бк/л. Эта величина является довольно условной, так как необходимая интенсивность облучения может регулироваться временем. Об этом свидетельствует разнообразие норм, принятых в разных странах. Так, в Польше принята норма в 375 Бк/л, во Франции - 370, в Италии - 48, в Чехии - 1192, в Германии - 6885 Бк/л.

Все природные воды содержат в небольшом количестве радиоактивные вещества, но их суммарная естественная радиоактивность, обусловленная такими элементами, как радий, уран, торий и калий-40, обычно очень мала. Однако в последнее время наблюдается все больше зон, имеющих повышенную радиоактивность, вызванную антропогенными факторами. При этом основными носителями этой радиоактивности выступают изотопы с небольшим периодом полураспада. Это  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Zr}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ . В окружающую природу они поступают в основном в процессе производства и испытания ядерного оружия, из атомных электростанций, при авариях, при производстве и испытании приборов, содержащих радиоактивные изотопы, а также в случаях неправильной их утилизации. Наиболее опасной особенностью радиоактивных изотопов является то, что они по химическим и физическим свойствам не отличаются от своих безопасных собратьев. Это позволяет им встраиваться в биологические цепочки, накапливаться в организме, исподволь разрушая его. Одним из наиболее опасных техногенных изотопов является ( $^{90}\text{Sr}$ ), имеющий химическое сходство с кальцием, а значит и способность откладываться в костных тканях животных и человека.

Сильно загрязняет природные воды деятельность горно-обогатительных комбинатов. Например, добыча ПО "ФОСФОРИТ" в Ленинградской области фосфоритов, залегающих ниже диктионемовых сланцев, способствовала извлечению урана и его продуктов распада из диктионемовых сланцев. Создание хвостохранилищ на берегу р.Луги привела к тому, что речные воды сравнительно интенсивно выносят  $^{226}\text{Ra}$  в Лужскую губу, где он осаждается на органической фракции донных отложений и железо-марганцевых конкрециях. Деятельность ПО "Фосфорит" касается района долины реки Луга к северу от г.Кингисеппа.

Другой пример связан с добычей железной руды на месторождениях Курской магнитной аномалии. Анализы питьевой воды г. Губкин показали, что содержание в ней урана в 40 раз, а тория в 3 раза больше, чем в воде г. Санкт-Петербурга. Вероятной, но не единственной причиной установленного факта является влияние мощной депрессионной воронки и подпитка подземных вод загрязненными естественными радионуклидами дренажными и сточными водами. Проведенные параллельно с анализом питьевой воды исследования водных хвостов обогащения установили, что концентрация урана в них достигает  $579 \cdot 10^{-4}$  мг/л, радия -  $43 \cdot 10^{-4}$  мг/л, что в 100 раз превышает фон по урану и в 14 раз по радю. Проведенные расчеты, основанные на содержании ЕРН в отстойных водах хвостов и их объеме (порядка 70 млн м<sup>3</sup> в год), показали, что ежегодно из хвостохранилищ ЛГОКа и СГОКа в водную систему района выносятся 4 т урана и 35 т тория. Этот объем радиоэлементов относительно свободно достигает водоносных горизонтов в связи с тем, что хвостохранилища располагаются в пределах влияния зон повышенной проницаемости земной коры.

Особое значение имеет использование в лечебных целях минеральных вод, насыщенных радоном. Радоновые воды используются в виде водных и грязевых ванн, воздушных ингаляций, для эманаторов. Они применяются при лечении нервной, сердечно-сосудистой систем, органов дыхания и пищеварения, опорно-двигательного аппарата, болезней обмена веществ. Концентрация радона в минеральных водах колеблется в весьма значительных пределах. Так, в месторождении Барбанш-тейн (Австрия) концентрация радона достигает 2200, Баден-Баден (Германия) - 780, Яхимов (Чехия) - 6290 Бк/л. В российских месторождениях, в большинстве случаев приуроченных к районам развития докембрийских и палеозойских кристаллических пород или горноскладчатым сооружениям, установлены следующие концентрации: Железноводское - 314, Кисловодское - 248, Белокуриха - 926, Дарасун - 847, Вишневогорский (Урал) - 552 Бк/л.

По величине концентрации радона выделяют (в Бк/л):

Очень слабо радоновые 185 - 740;

Слабо радоновые 740 - 1480;

Радоновые средней концентрации 1480 - 7400;

Высокорадонные >7400.

Как правило, какой-либо связи между минерализацией и составом лечебных вод с одной стороны и концентрацией радона - с другой, нет. Радоновые минеральные воды обладают разным химическим и газовым составом. Среди радоновых вод наибольшую ценность представляют воды, обогащенные углекислотой, кремнием, другими биологически активными элементами.

В Ленинградской области широкой известностью пользуется Сестрорецкий курорт, использующий низкорадонные воды гдовского (нижнекотлинского) горизонта. В XIX веке непродолжительное время функционировал курорт на озере Лопухинка. Это уникальное радоновое озеро образовано рядом источников, содержание радона в которых достигает 400 Бк/л. На территории Ленинградской области есть еще много источников, пользующихся у населения известностью как целебные. Большинство из них обязано своей популярностью именно радону, который способствует длительному хранению воды. Много месторождений минеральных радоновых вод и в Карелии. К их числу, например, относятся месторождения Кошкары, Карташи, Питкяранта.

## 7. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

Примерно 2/3 эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с пищей, водой и воздухом, и создающих внутреннее облучение.

Естественная *радиоактивность растений и животных организмов* и, соответственно, *пищевых продуктов* зависит от содержания радионуклидов в почвах, на которых растения культивируются, способности некоторых организмов накапливать определенные радионуклиды, механизмов миграции последних по пищевым цепочкам и т.д.. Суммарная природная удельная активность большинства растительных и животных

организмов и пищевых продуктов равняется единицам-десяткам Бк/кг (единицам нКи/кг), лишь некоторые растения, например, мхи и лишайники имеют активность до  $3,7 \cdot 10^3$  Бк/кг (100 нКи/кг). Основной вклад в природную радиоактивность этих объектов вносит калий-40, содержание которого в большинстве продуктов составляет от одного до нескольких единиц-десятков Бк/кг (единиц нКи/кг), повышаясь до 340-740 Бк/кг (1-2-х десятков нКи/кг) у бобовых и снижаясь до единиц Бк/кг (десятых долей нКи/кг) у рафинированных продуктов (шлифованный рис, пшеничная мука высшего сорта и изделия из нее и другие).

Для обитателей почвы — микрофлоры, корней растений, почвенной фауны особенно велико значение радиоактивного изотопа калий-40. Соответственно заметно его участие во внутреннем облучении организма, его органов и тканей, поскольку калий является незаменимым элементом, участвующим в ряде метаболических процессов. Калий-40 содержится во всех животных и растительных продуктах и поступает в организм человека главным образом с пищей. Средняя массовая концентрация калия в организме мужчины составляет 2 г на 1 кг массы тела (в среднем  $136 \pm 28$  г). Попадая внутрь организма, калий-40 вызывает внутреннее облучение, достигающее 180 мкЗв (18 мбэр), или 8% всей годовой дозы. Определенное значение в формировании доз внутреннего облучения имеют рубидий-87, свинец-210, полоний-210, полоний-214, а из космогенных радионуклидов — углерод-14. Вклад космогенных нуклидов невелик и составляет 15 мкЗв или менее 1% от естественного радиационного фона.

Заметная часть эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, формируется от радиоактивных веществ, проходящих через сложную систему так называемых биологических цепочек. Радионуклиды, образующиеся под действием космического излучения, составляют незначительную (менее 20%) часть общего поступления. Большая часть поступления связана с радионуклидами ряда урана и тория, которые содержатся в почве. Следует учитывать, что до попадания в организм человека радиоактивные вещества проходят по сложным маршрутам в окружающей среде.

Совсем небольшая часть этой дозы приходится на радиоактивные изотопы типа углерода-14 и трития, которые образуются под воздействием космической радиации. Все остальное поступает от источников земного происхождения. В среднем человек получает около 180 мкЗв в год за счет калия-40, который усваивается организмом вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходимыми для жизнедеятельности организма. Однако значительно большую дозу внутреннего облучения человек получает от нуклидов радиоактивного ряда урана-238 и, в меньшей степени, от радионуклидов ряда тория-232. Некоторые из них, например, нуклиды свинца-210 и полония-210, поступают в организм с пищей. Они концентрируются в рыбе и моллюсках, поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, могут получить относительно высокие дозы облучения.

В районах Крайнего Севера нашей страны, США, Канады и в Скандинавских странах имеет место повышенное поступление в организм человека свинца-210 и полония-210 по пищевой цепочке «лишайники-олень-человек». Лишайники, имеющие высокую сорбционную способность и большую продолжительность жизни (почти 300 лет), концентрируют эти радионуклиды из воздуха, поскольку не имеют корневой системы. При этом содержание свинца-210 в 1 кг сухого вещества лишайника достигает 215-340 (5,8-9,2), а полония-210 - 215-370 Бк (5,8-7,3 нКи). Олень поедает до 4 кг лишайников в сутки, в результате чего в его мясе накапливается до 14 Бк/кг (360 пКи/кг) свинца-210 и до 1,4 Бк/кг (38 пКи/кг) полония-210. В организм местного населения, питающегося мясом оленей, в среднем поступает 3,7 Бк/сут (100 пКи/сут) полония-210, что в 10 раз превышает уровень поступления этого радионуклида в "нормальных" районах. Повышенное поступление РВ сопровождается усиленным накоплением их в органах и тканях. В костях коренных жителей Крайнего Севера концентрация полония-210 в среднем составляет 710 пКи/кг (21 Бк/кг), что обуславливает годовую поглощенную дозу несколько выше 1 мГр (100 мрад), которая примерно в 35 раз выше, чем в среднем по планете. Повышенное содержание полония-210, а следовательно, и более высокие лучевые нагрузки, отмечены и для других органов: гонад, легких, красного костного мозга.

В другом полушарии люди, живущие в Западной Австралии в местах с повышенной концентрацией урана, получают дозы облучения, в 75 раз превосходящие средний уровень, поскольку едят мясо и требуху овец и кенгуру.

Удельная активность изотопов урана в продуктах питания составляет десятые доли единицы Бк/кг (сотые-десятые доли нКи/кг). Типичное содержание радия-226 в пищевых продуктах колеблется в пределах 3,7-23 (0,1-6,1), а свинца-210 и находящегося с ним в равновесии висмута-210 - от 74 до 185 Бк/кг (2 - 5 пКи/кг). Полоний-210 содержится в растительных и животных организмах в количествах, равных 50-100% от содержания свинца-210. У крабов, моллюсков и других придонных организмов, а также в картофеле, корнеплодах отмечается тенденция к накоплению радионуклидов семейств урана-радия и тория. Особенно резко способность к накоплению радионуклидов выражена у мхов и лишайников.

В организме человека постоянно присутствуют радионуклиды земного происхождения, поступающие через органы дыхания и пищеварения. Наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ , и нуклиды рядов распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  (Табл.10). Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет 1.35 Зв/год. Наибольший вклад (около 3/4 годовой дозы) дают радон и продукты его распада. Поступив в организм при вдохе, он вызывает облучение слизистых тканей легких. Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но его концентрации в наружном воздухе существенно различаются для различных точек Земного шара.

Однако большую часть дозы облучения от радона человек получает, находясь в закрытом непроветриваемом помещении (жилом или служебном). В зонах с благоприятным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Источниками радона являются также строительные материалы. Так, например, большой удельной радиоактивностью обладают гранит и пемза, кальций-силикатрий, шлак и ряд других материалов. Радон проникает в помещение из земли и через различные трещины в межэтажных перекрытиях, через вентиляционные каналы и т.д. (Проблему радона в жилых помещениях мы рассмотрим в отдельной лекции). Источниками поступления радона в жилые помещения являются также природный газ и вода (Табл. 11).

**Табл. 11.** Среднегодовая эффективная эквивалентная доза внутреннего облучения

Радионуклид, тип излучения	Период полураспада	Среднегодовая эффективная эквивалентная доза мкЗв
$^{40}\text{K}$ ( $\beta, \gamma$ )	1.4 $10^9$ лет	180
$^{87}\text{Rb}$ (?)	4.8 $10^{10}$ лет	6
$^{210}\text{Po}$ ( $\alpha$ )	160 сут	130
$^{220}\text{Rn}$ ( $\alpha$ )	54с	170 - 220
$^{222}\text{Rn}$ ( $\alpha$ )	3.8 сут	800 - 1000
$^{226}\text{Ra}$ ( $\alpha$ )	1600 лет	13

Существенное значение имеет поступление радионуклидов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  в табачные растения из почвы. Полоний-210 и свинец-210 поступают в табачное растение по корневой системе из почвы. В результате концентрация полония-210 в легких у курящих на 30% больше по сравнению с некурящими. Поступление радионуклидов из объектов внешней среды в организм человека происходит по пищевым цепочкам с продуктами питания и питьевой водой, а также с вдыхаемым воздухом. Данные о средних уровнях суточного поступления и содержания в организме человека некоторых природных радионуклидов в «нормальных» областях земного шара приведены в Табл.12.

**Табл. 12.** Средние величины суточного поступления и содержания природных радионуклидов в организме человека.

Радионуклиды	Поступление, Бк, (пКи)	Содержание, Бк, (нКи)
Тритий	1,6 (43)	37 (1,0)
Углерод-14	89 (2,4•10 <sup>3</sup> )	2850 (77)
Калий-40	89 (2,4•10 <sup>3</sup> )	4070 (110)
Рубидий-87	-----	590 (16)
Полоний-210	0,11 (3,0)	26 (0,7)
Радий-226	3,7•10 <sup>-2</sup> (1,0)	3,7 (0,1)
Уран <small>ест.</small>	1,2•10 <sup>-2</sup> (0,33)	1,85 (0,05)

**Табл. 13.** Мощность излучения различных источников радона

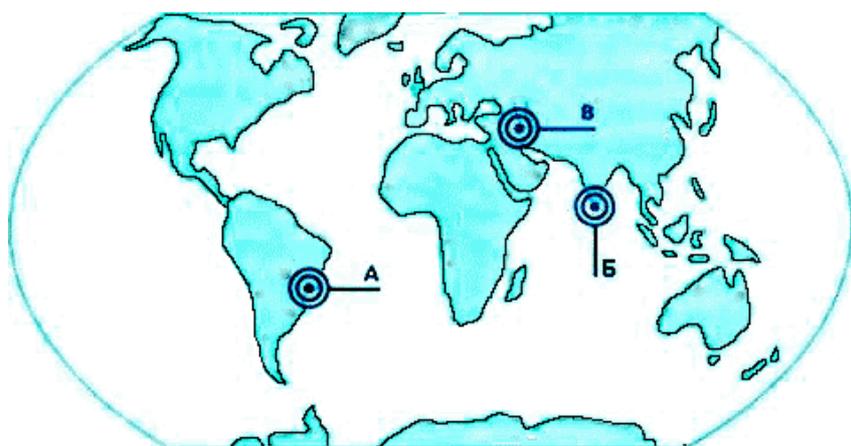
Источник радона	Мощность излучения, кБк/сут
Природный газ	3
Вода	4
Наружный воздух	10
Стройматериалы и грунт под зданием	60

Доля домов, внутри которых концентрация радона и его ядерных продуктов равна от  $10^3$  до  $10^4$  Бк/см<sup>3</sup>, составляет от 0.01 до 0.1% в различных странах. Это означает, что значительное число людей подвергаются заметному облучению из-за высокой концентрации радона внутри домов, где они живут.

Попавшие внутрь организма человека по пищевым цепочкам с продуктами питания и питьевой водой, а также с вдыхаемым воздухом, радионуклиды, как и стабильные изотопы, вступают в обменные процессы, могут избирательно накапливаться в критических органах (например, радий - в костях) либо более-менее равномерно распределяться по всему организму (как углерод, калий). Имеют значение скорость и пути выведения радионуклида, виды и энергетические характеристики излучения, образующегося при его распаде, длительность периодов полураспада и ряд других.

## 8. ГЕОГРАФИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

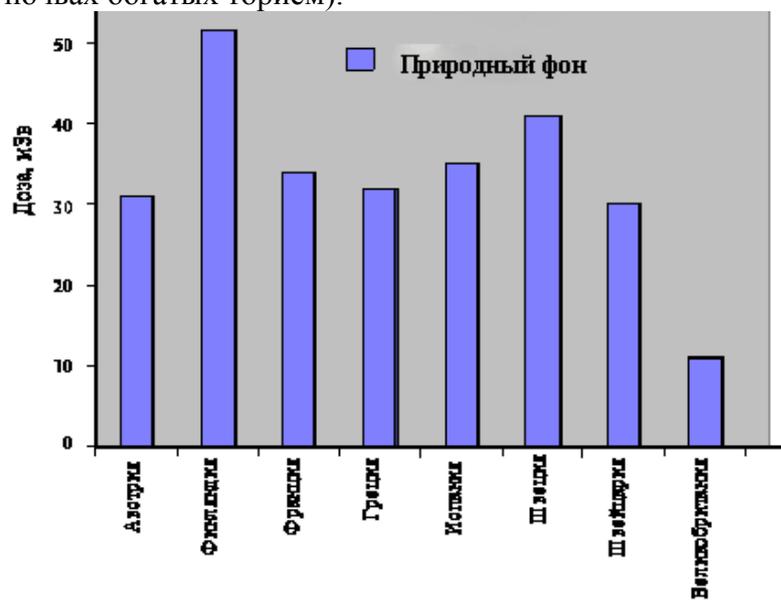
Природный радиационный фон меняется от местности к местности. Многие миллионы европейцев живут в местах, традиционно имеющих высокий радоновый фон, например, в Австрии, Финляндии, Франции, Испании, Швеции и получают в 10-20 раз большую природную дозу облучения по сравнению с жителями Нью-Йорка, где выделения радона пренебрежимо малы. В некоторых местностях, например, в Бразилии и Индии, природный радиационный фон в сотни раз превышает среднее значение по планете и более чем в миллион раз превышает дозу облучения от атомных станций (**Рис. 8**).



Замечание. Интересно отметить, что наиболее радиоактивные места на Земле совпадают с местами зарождения цивилизаций.

**Рис. 8.** Некоторые участки земной поверхности с высоким уровнем земной радиации: А - Посус-ди-Калдас и Гуарапари, Б - Керала и Тамилнад, В - Рамсер

Уровни земной радиации неодинаковы, поскольку зависят от концентрации радиоактивных изотопов на конкретном участке земной коры. В среднем дозы от земной радиации составляют от 0,3 до 0,6 мЗв в год. Однако, на Земле имеются области, где уровень радиации в сотни раз превосходит средний (до 250 мЗв в год в некоторых районах Бразилии, расположенных на почвах богатых торием).



**Рис. 9.** Средняя доза облучения за время жизни в разных странах

В местах проживания основной массы населения дозы от природных радионуклидов одного порядка. Так, согласно исследованиям, проведенным во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США, примерно 95% населения этих стран живет в местах, где мощность дозы облучения от земных источников радиации составляет в среднем от 0,3 до 0,6 мЗв в год. Но некоторые группы населения получают значительно большие дозы

облучения: около 3 % получает в среднем 1 мЗв в год, а около 1,5 % более 1,4 мЗв в год.

В некоторых районах земного шара содержание природных радионуклидов в подстилающих породах и, соответственно, в почвах, водах и других объектах природной среды повышено по сравнению с «нормальными» районами или средними уровнями радиоактивности этих объектов в 20-100 и даже 1000 раз. Естественно, что в таких местах уровни естественной радиации весьма высоки.

Неподалеку от города Посус-ди-Калдас в Бразилии, расположенного в 200 км к северу от Сан-Паулу, есть небольшая возвышенность. Как оказалось, здесь уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает 260 мЗв (26 бэр!) в год. По каким-то причинам возвышенность оказалась необитаемой. Лишь чуть меньшие уровни радиации были зарегистрированы на морском курорте, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности. Гуарапари – небольшой город с населением 12 тыс. человек – каждое лето становится местом отдыха примерно 30 тыс. курортников. На отдельных участках его пляжей зарегистрирован уровень радиации 175 мЗв в год. Радиация на улицах города оказалась намного ниже: от 8 до 15 мЗв в год, но все же значительно превышала средний уровень. Сходная ситуация наблюдается в деревушке Меаипе, расположенной в 50 км к югу от Гуарапари. Оба населенных пункта стоят на песках, богатых торием. Уровень облучения жителей и отдыхающих сравним с уровнями профессионального облучения.

На юго-западе Индии (штат Керала), 70 тыс. человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием (монацитовые или «чёрные пески», содержащие до 8,0-10,5% по массе тория-232 и продуктов его распада). Средняя ежегодная доза облучения жителей этих мест составляет 3,8 мЗв (380 мбэр) в год на человека. Из них более 500 человек получают свыше 8,7 мЗв в год. Около шестидесяти (6%) получают годовую дозу, превышающую 17 мЗв (0,17 бэра), что в 50 раз больше средней годовой дозы внешнего облучения от земных источников радиации. Около 2,5 тыс. человек получают дозы свыше 5 мЗв (0,5 Бэра) и около 0,7% - свыше 20 мЗв (2,0 бэра).

В Иране в районе г.Рамсер, где бьют ключи, богатые радием, зарегистрирована мощность дозы до 400 мЗв/год (40 бэр/год).

Известны и другие места на земном шаре с высоким уровнем радиации, например во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре, на Памире, Тибете, в Шри Ланке, Египте, Чехии и т.д. Есть они и в России, и в странах СНГ.

**Табл. 14.** Среднегодовые дозы внешнего фонового облучения в некоторых городах.

Город	Среднегодовая доза, мкГр
Алма-Ата	1600 ± 100
Астрахань	800 ± 60
Вильнюс	1000 ± 60
Ереван	750 ± 60
Кишинев	600 ± 20
Москва	900 ± 50
Новосибирск	800 ± 30
Рига	1100 ± 110
Санкт-Петербург	1200 ± 80
Таллин	900 ± 50
Якутск	700 ± 60

В некоторых местах стран СНГ (Боржоми, Хмельнике, Мироновке) в местах выхода на поверхность радиоактивных (радоно-радиевых) вод естественный радиационный фон довольно высок. Мощность поглощенной дозы достигает 10-30 мГр/год (1000-3000 мрад/год), местами – до 40-80 мГр/год (4-8 рад/год), т.е. превышает средний в десятки и более раз.

В районах с высоким уровнем естественной радиации обитает и произрастает богатая и разнообразная фауна и флора, издавна проживают люди. Многолетние тщательные исследования не выявили у местного населения отклонений в состоянии здоровья, сокращения продолжительности жизни, повышенной онкогенной и иной заболеваемости по сравнению с соседними районами с низким фоном. То же можно сказать и о высокогорных регионах, где население подвергается существенно большему облучению вследствие высокой интенсивности космического излучения, а также из-за более высокого содержания терригенных нуклидов в изверженных горных породах (гранит, базальт).