

## ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

С. С. БЕРДОНОСОВ, Ю. А. САПОЖНИКОВ  
 Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### IONIZING RADIATION AND ENVIRONMENT

S. S. BERDONOSOV,  
Yu. A. SAPOZHNIKOV

*Natural and technological sources of ionizing radiation in environment are described. The effect of small doses of ionizing radiation on human health is discussed.*

*Рассмотрены природные и техногенные источники ионизирующего излучения в окружающей среде. Обсуждено влияние малых доз ионизирующего излучения на здоровье человека.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

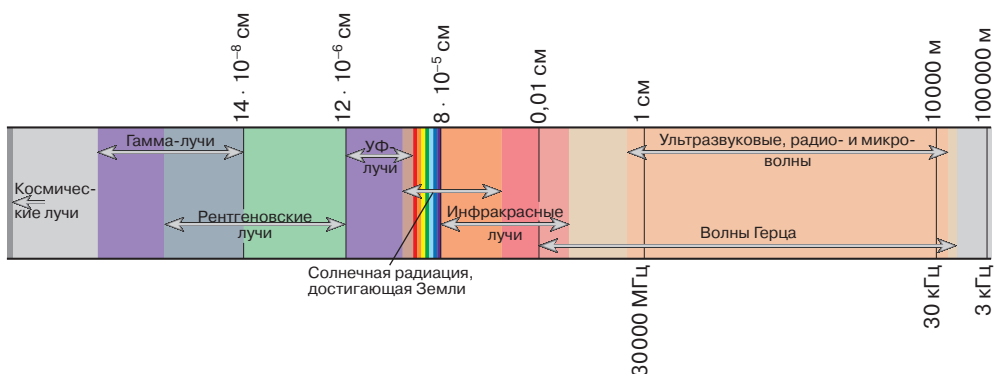
На каждого из нас постоянно действуют инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые (УФ) лучи. Их прохождение через воздух не сопровождается появлением в нем ионов, поэтому их не относят к ионизирующим излучениям. В спектре электромагнитного излучения (рис. 1) за УФ-лучами расположено рентгеновское излучение.

Чуть более 100 лет назад было открыто существование в природе радиоактивных атомов. В сопровождающем распад ядер этих атомов излучении были обнаружены  $\alpha$ -частицы ( $\alpha$ -лучи) – ядра гелия-4 ( ${}^4_2\text{He}$ ). Их испускают, например, ядра атомов урана  ${}^{238}\text{U}$  и  ${}^{235}\text{U}$ , а также тория  ${}^{232}\text{Th}$ . Другие радиоактивные ядра, например ядра природных атомов калия  ${}^{40}\text{K}$  и искусственно получаемых атомов стронция  ${}^{90}\text{Sr}$ , испускают при распаде  $\beta$ -частицы – электроны. Электроны  $e$  возникают в ядрах при превращении одного из нейтронов  $n$  в протон  $p$ :  $n = p + e + \bar{\nu}$ ;  $\bar{\nu}$  будет объяснено позже.

$\alpha$ - и  $\beta$ -Распады часто сопровождаются испусканием  $\gamma$ -лучей ( $\gamma$ -квантов), относящихся к электромагнитному излучению и обладающих еще большей проникающей способностью, чем лучи Рентгена. Прохождение через газ, в том числе и через воздух,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, а также рентгеновского и  $\gamma$ -излучения сопровождается ионизацией (в разной степени) молекул газов. Поэтому эти виды излучения относят к ионизирующему излучению.

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

Источником ионизирующих излучений могут служить различные радионуклиды. Напомним, что нуклид – это вид атомов с определенным числом протонов и нейтронов в ядре. Если ядра атомов нуклида радиоактивны, то его называют радионуклидом. К числу радионуклидов в окружающей среде принадлежат атомы таких тяжелых химических элементов, как уран  $\text{U}$  и торий  $\text{Th}$ . Распадаются уран и торий очень медленно. Скорость распада характеризуют периодом полураспада  $T_{1/2}$  – временем, за которое распадается половина из имевшихся первоначально ядер радионуклида. Для



**Рис. 1.** Спектр электромагнитного излучения. Чем левее на этом спектре находится положение излучения, тем большей проникающей способностью оно обладает

природных радионуклидов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  значения  $T_{1/2}$  равны соответственно  $4,47 \cdot 10^9$ ;  $7,04 \cdot 10^8$  и  $1,4 \times 10^{10}$  лет.

Возникающие при радиоактивном распаде этих материнских ядер дочерние ядра, например  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , и  $^{222}\text{Rn}$ , обладают значительно меньшими значениями  $T_{1/2}$  (вплоть до десятитысячных долей секунды). Дочерние радионуклиды вместе с материнскими образуют радиоактивные ряды, конечные продукты которых – стабильные атомы свинца. Хотя значения  $T_{1/2}$  дочерних радионуклидов и невелики, они постоянно образуются при распаде предшественников и с постоянной скоростью распадаются, так что в земной коре все они содержатся в неизменных, правда в значительно меньших, чем материнские, количествах.

Подвижность многих дочерних радионуклидов (например, радона) в земной коре значительно выше, чем материнских. Поэтому эти радионуклиды оказываются вездесущими и в рассеянном состоянии присутствуют практически всюду. Ионизирующее излучение дочерних радионуклидов вносит заметный вклад в радиационный фон (фон ионизирующего излучения) Земли. Особенно велика роль в радиационном воздействии на человека входящего в ряд  $^{238}\text{U}$  радионуклида  $^{222}\text{Rn}$ .

Наряду с радионуклидами тяжелых элементов в природе существуют и радионуклиды некоторых элементов середины Периодической системы Д.И. Менделеева. Наибольшее значение среди них имеет  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1,29 \cdot 10^9$  лет), входящий в смесь природных изотопов калия. На долю  $^{40}\text{K}$  в ней приходится 0,012%. Калий – один из самых распространенных элементов земной коры. Растения усваивают необходимый для их питания калий (и, следовательно,  $^{40}\text{K}$ ) из почвы. Далее по пищевым цепям  $^{40}\text{K}$  попадает в организмы животных и человека.

Содержание радионуклида в объекте характеризуют через его активность. Единица активности – 1 беккерель (1 Бк), 1 Бк отвечает одному распаду в 1 с. Ранее единицей активности было 1 кюри (1 Ки),  $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10}$  Бк. Сведения о средней активности  $^{40}\text{K}$  в воде, почве и некоторых продуктах питания приведены ниже

### Удельные активности по $^{40}\text{K}$ воды, почвы и некоторых продуктов питания

	Бк/л или Бк/кг
Вода питьевая	0,1–0,3
Морская вода	6–12
Почвы Нечерноземья	350–450
Пшеница	90–110
Молоко	35–45
Корнеплоды и клубни картофеля	100–150
Фрукты	50–100
Овощи	40–240
Мясо	80–120
Рыба	90–110

Естественные радиоактивные изотопы обнаружены не только у калия, но и у таких элементов, как рубидий ( $^{87}\text{Rb}$ ), индий ( $^{115}\text{In}$ ), лантан ( $^{138}\text{La}$ ), у некоторых лантаноидов, у гафния ( $^{174}\text{Hf}$ ), тантала ( $^{180}\text{Ta}$ ) и платины ( $^{190}\text{Pt}$ ). Значения  $T_{1/2}$  этих радионуклидов, как правило, велики и составляют  $10^{12}$ – $10^{14}$  лет. Поэтому радиоактивность веществ, содержащих эти элементы, очень низкая, и их ионизирующее излучение практически не влияет на живые организмы. Так что можно совершенно не беспокоиться, например, о вреде для здоровья платинового ювелирного изделия, всегда содержащего радионуклид  $^{190}\text{Pt}$ .

Указанные естественные радионуклиды имеют земное происхождение (их называют терригенными).

Однако существуют и естественные радионуклиды, образующиеся под действием постоянно попадающего на Землю космического излучения, поступающего как из глубин космоса, так и от Солнца. Эти радионуклиды называют космогенными.

В состав первичного космического излучения входят протоны высоких энергий и ядра некоторых легких элементов. При взаимодействии этого 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, достигающее поверхности Земли. С участием нейтронов вторичного космического излучения в атмосфере возникают, например, радиоактивные ядра  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730$  лет), а также тритий  $^3\text{H}$  и  $^{32}\text{P}$ . 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. Излучение терригенных и космогенных радионуклидов, а также само космическое излучение постоянно воздействует на все живое нашей планеты.

В 40-х годах XX века в результате освоения энергии атомного ядра были созданы ядерные реакторы, в которых происходит расщепление ядер  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$  на ядра более легких элементов. При работе ядерных реакторов образуются не существующие в природе радионуклиды более 40 элементов Периодической системы (эти радионуклиды называют техногенными). С 1945 года до начала 60-х годов такие страны, как США, СССР, Великобритания, а позже Франция и Китай, провели большое число испытаний ядерного оружия, что привело к загрязнению техногенными радионуклидами окружающей среды в глобальном масштабе. К попаданию радионуклидов в окружающую среду привела и работа предприятий так называемого ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Эти предприятия включают добычу урановых руд и извлечение из них урана, изготовление тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), собственно ядерные реакторы, а также заводы по переработке отработанных ТВЭлов, извлечению из них радиоактивных отходов и регенерации ядерного топлива.

Конечно, ядерные реакторы конструируют так, чтобы предотвратить попадание техногенных радионуклидов в окружающую среду. Но даже при безаварийной работе реакторов в окружающую среду поступают радиоактивный газ криптон (радионуклид  $^{85}\text{Kr}$ ), а

также небольшие количества  $^{131}\text{I}$ , трития и некоторых других радионуклидов.

В результате произошло загрязнение окружающей среды техногенными радионуклидами, особенно такими, как  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ , а также радионуклидами некоторых трансурановых элементов (табл. 1).

**Таблица 1.** Важнейшие природные и техногенные радионуклиды, обуславливающие радиационный фон на поверхности Земли

Природные радионуклиды		Техногенные радионуклиды
терригенные	космогенные	
$^{40}\text{K}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{222}\text{Rn}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ и др.	$^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{32}\text{P}$ и др.	$^3\text{H}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{85}\text{Kr}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{144}\text{Ce}$ , $^{239}\text{Pu}$ и др.

Можно отметить, что к загрязнению атмосферы радионуклидами приводит и работа тепловых электростанций, сжигающих каменный уголь. Он всегда содержит небольшие примеси урана, тория и продуктов их распада, и при сжигании топлива эти радионуклиды частично переходят в аэрозоли и попадают в атмосферу. К загрязнению почвы радионуклидами может приводить даже использование фосфорных минеральных удобрений. Примеси урана и тория всегда есть в исходном сырье (например, в апатите), которое используют при производстве этих удобрений. При переработке сырья радионуклиды частично переходят в удобрения, а из них и в почву.

К загрязнению техногенными радионуклидами океана привело и то, что в некоторых странах высокорadioактивные отходы ЯТЦ длительное время сбрасывали в океан в специальных контейнерах (США) или по трубам (Великобритания). Из-за этого некоторые моря, особенно Ирландское и Северное, подверглись заметному радиоактивному загрязнению. Загрязнение Мирового океана может неблагоприятно сказаться прежде всего на жизнедеятельности фитопланктона, от нормального существования которого во многом зависит жизнь на Земле. Поэтому в настоящее время введены строгие ограничения на сброс в океан радиоактивных отходов.

Если попавший в окружающую среду  $^{239}\text{Pu}$  прочно фиксируется почвами и практически не переходит в пищевые цепи, то такие радионуклиды, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  и особенно  $^{90}\text{Sr}$ , по различным пищевым цепям могут оказаться в организме человека. Так как некоторые радионуклиды способны концентрироваться в определенных органах человека (например,  $^{90}\text{Sr}$  в костях, а  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе), то их накопление в этих органах может привести к тяжелым заболеваниям (например, раку щитовидной железы).

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ С ЖИВЫМИ ОРГАНИЗМАМИ

Установлено, что различные виды ионизирующего излучения воздействуют на организмы по-разному. Характер воздействия в значительной степени зависит от того, находится ли радионуклид внутри организма (то есть организм подвергается внутреннему облучению) или он расположен вне организма (внешнее облучение).

Рассмотрим сначала, в чем состоит воздействие на организм  $\alpha$ -частиц.  $\alpha$ -Частицы (ядра  ${}^4_2\text{He}$ ) из-за своего сравнительно большого заряда (+2) и большой массы испытывают частые столкновения с молекулами и атомами среды и растрачивают всю энергию на небольшом пути. Поэтому длина пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе не превышает 10 см, а путь, который они проходят в тканях человека, составляет десятые доли миллиметра. Понятно, что если источник  $\alpha$ -частиц расположен, например, на расстоянии 1 м от человека, то до него они просто не долетят, как бы ни была велика активность источника. Поэтому роль  $\alpha$ -радиоактивных нуклидов во внешнем облучении организма ничтожна.

Но если такой радионуклид попал внутрь организма (с воздухом, водой или пищей), то вся энергия  $\alpha$ -частиц будет израсходована на небольшом отрезке, причем встретившиеся на их пути молекулы будут разрушены (превратятся в ионы или нейтральные химически очень активные частицы, свободные радикалы). Свободные радикалы вступают в новые химические реакции с молекулами, составляющими организм. Эти реакции носят цепной характер. В результате в организме накапливаются заметные количества чужеродных, часто сильно ядовитых веществ. Конечно, прохождение через организм одной или даже десяти  $\alpha$ -частиц вреда не принесет — слишком мало число образовавшихся при этом свободных радикалов и ионов. Но если число попавших в организм ядер  $\alpha$ -радионуклида велико, может наступить его серьезное поражение — лучевая болезнь.

Важное значение имеет и то, что при прохождении  $\alpha$ -частиц через клетки организма (впрочем, похожее воздействие оказывают  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи) в них могут происходить нежелательные нарушения (мутации) наследственных структур. Эти нарушения могут стать причиной онкологических и наследственных заболеваний.

Вредное воздействие на организм  $\beta$ -частицы могут оказать как при внутреннем, так и при внешнем облучении (когда радионуклид находится вне организма). Длина пробега  $\beta$ -частиц в тканях организма значительно больше, чем  $\alpha$ -частиц. При этом разрушенные молекулы располагаются не так близко друг к другу, как в случае воздействия  $\alpha$ -частиц, и поэтому при одинаков-

вом числе прошедших через организм частиц обоих видов и их равной исходной энергии вред от воздействия  $\beta$ -частиц меньше.

$\gamma$ -Лучи обладают намного более высокой проникающей способностью. Они проходят через ткани тела на значительно большие расстояния, чем  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы. Поэтому, если  $\gamma$ -излучатель находится внутри организма, испускаемое им  $\gamma$ -излучение поглощается в организме обычно только частично (производя в нем при поглощении те же разрушения, что и  $\alpha$ - или  $\beta$ -излучение). Частично же  $\gamma$ -излучение покидает организм. Разумеется, эта его часть вредного воздействия на организм не оказывает. Вред от  $\gamma$ -излучения в большой степени может проявиться при внешнем облучении, даже тогда, когда источник  $\gamma$ -излучения расположен от организма на большом расстоянии и находится, например, за бетонной стеной.

Из сказанного понятно, что вредное воздействие ионизирующего излучения вызвано тем, что его энергия передается организму. А если излучение проходит через организм, не оставляя в нем своей энергии, то никакого вредного воздействия оно не оказывает. Так ведут себя нейтрино  $\nu$  и их аналоги — антинейтрино  $\bar{\nu}$ , возникающие при превращениях нейтронов в протоны. По современным представлениям каждого из нас постоянно пронзают мощные потоки нейтрино и антинейтрино, но абсолютно никакого воздействия на живые организмы они не оказывают.

## ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Для того чтобы охарактеризовать воздействие ионизирующего излучения на организм, используют понятие дозы. Доза ионизирующего излучения — это энергия, которую излучение передает тому телу, через которое оно проходит. Единица поглощенной дозы  $D_{\text{полгл}}$  1 грей (1 Гр), 1 Гр отвечает поглощению 1 Дж в 1 кг вещества.

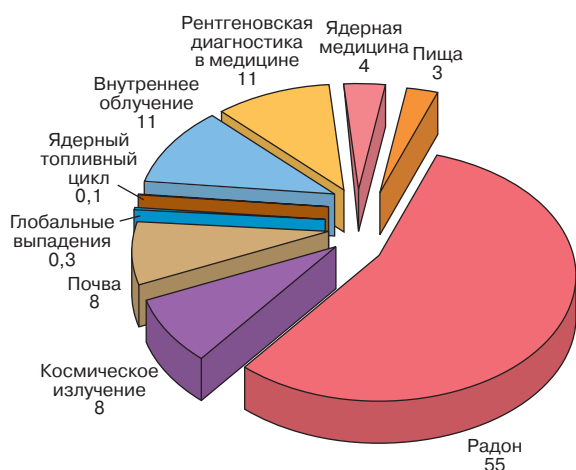
Парадокс состоит в том, что энергия, отвечающая поглощению организмом человека, например, дозы в 1 Гр, сама по себе очень мала, а вот вредное воздействие она оказывает значительное (возможно даже появление лучевой болезни). Между тем с точки зрения поглощенной энергии доза в 1 Гр отвечает, например, тому, что человек выпил чайную ложку воды с температурой около 55°C. Понятно, что температура тела при этом практически не изменится и никакого вреда человеку не принесет.

Ученые объяснили, почему в случае воздействия на организм даже небольших доз возможны тяжелые последствия: все дело в образующихся под действием излучения ионах, и особенно свободных радикалах. Вредное воздействие поглощенного ионизирующего излучения зависит от того, каким типом излучения

обусловлена доза. Вредный эффект поглощенной дозы в 0,1 Гр от  $\alpha$ -радионуклида значительно сильнее, чем от такой же дозы, связанной с поглощением  $\beta$ -,  $\gamma$ - или рентгеновского излучения. Для характеристики различий воздействия на организм ионизирующего излучения разных типов используют понятие эффективной дозы  $D_{\text{эфф}}$ .  $D_{\text{эфф}} = W_R \cdot D_{\text{полгл}}$  (коэффициент  $W_R$  отражает эффективность биологического воздействия излучения). Значение  $W_R$  для  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения равно 1, а для  $\alpha$ -излучения – 20. Единица эффективной дозы – 1 зиверт (1 Зв).

Согласно принятым в нашей стране нормам [1], предельно-допустимая доза для жителей России равна не более 5 мЗв за год. Отметим, что годовая доза, отвечающая среднему по нашей стране естественному фону ионизирующего излучения, составляет чуть менее 1 мЗв. Для отдельных участков поверхности Земли естественный фон колеблется от 0,5 до 2 мЗв. Так, естественный фон на территории Франции значительно выше, чем в России, а особенно высок он в отдельных регионах Индии и Бразилии. Составляющие, из которых складывается средняя годовая доза излучения, получаемая человеком, живущим в средних широтах России, показаны на рис. 2.

Для работников предприятий ЯТЦ значение предельно-допустимой дозы составляет не более 50 мЗв за год. Вопрос о том, что такое предельно-допустимая доза и на основании чего она установлена, довольно сложен и будет кратко рассмотрен далее.



**Рис. 2.** Составные компоненты средней годовой дозы (в %) от натурального (естественного) фона. Приведенные на диаграмме значения доз могут отличаться от данных, которые имеются в работах других авторов. Такие различия вызваны сложностью и условностью разделения составляющих естественного фона на отдельные компоненты

Из-за того, что абсолютные значения энергий, при которых уже проявляется вредное действие излучения на организм, довольно малы, измерить их довольно сложно. Поэтому используют понятие так называемой экспозиционной дозы  $D_{\text{эксп}}$ . При этом речь идет не об измерении энергии, поглощенной организмом, а о характеристике излучения по вызываемому им эффекту ионизации воздуха. Для измерения возникающей электропроводности газа созданы довольно простые приборы (например, счетчик Гейгера–Мюллера).

Если измерить число ионов, возникших при прохождении излучения через воздух, то можно сделать вывод о значении экспозиционной дозы  $D_{\text{эксп}}$ . Внесистемная единица экспозиционной дозы 1 рентген (1 Р). При экспозиционной дозе в 1 Р в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха, находящегося при 0°С и 0,1 МПа, за счет прохождения  $\gamma$ - или рентгеновского излучения возникает  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов. Экспозиционной дозе в 1 Р для человеческого тела соответствует эффективная доза примерно в 0,01 Зв, так что по измерениям экспозиционной дозы можно ориентировочно судить и об эффективной дозе.

Вопрос о том, какая максимальная доза ионизирующего излучения допустима для человека, очень сложен и не имеет однозначного ответа. Установлено, что воздействие на организм в течение года дозы в несколько зивертов (а это по сравнению с естественным фоном очень большая доза) приводит к увеличению вероятности появления у облученного различных заболеваний, и чем больше полученная доза, тем выше вероятность их появления.

Но ведь все мы постоянно подвергаемся воздействию малых доз радиации, причем колебания естественного радиационного фона в несколько раз ни на продолжительности жизни, ни на частоте заболеваний не сказываются. Как же обстоит дело с вредом от малых доз? Надежных данных о том, какое воздействие оказывают малые дозы радиации (на уровне от нескольких миллизивертов до 20–50 мЗв в год) на частоту появления заболеваний, нет.

Некоторые ученые считают, что зависимость «доза – вредный эффект» имеет пороговый характер, вред возможен только с определенных значений доз. Если вреда обнаружить до определенного значения дозы не удастся, то такая максимальная доза может рассматриваться как предельно-допустимая. Другие полагают, что существует пропорциональная зависимость: чем больше доза (сколь бы мала она ни была), тем выше частота возможных онкологических заболеваний в течение жизни человека.

Наконец, как ни странно, существует и такая точка зрения: малые дозы, даже в 5–10 раз большие естественного фона, полезны для организма и способствуют

увеличению продолжительности жизни. У сторонников каждой точки зрения есть аргументы в пользу своих представлений. Так как однозначного вывода сделать нельзя, в настоящее время принято считать, что, чем меньше получаемая человеком доза ионизирующего излучения, тем лучше. Поэтому стараются всячески снижать дозу, получаемую организмом (например, ограничивая число медицинских рентгеновских обследований).

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ

По разным причинам на одних участках земной коры содержание природных радионуклидов более высокое, на других – более низкое. Из-за этого фон по поверхности Земли заметно меняется. Кроме природных радионуклидов в результате испытаний ядерного оружия, работы предприятий ЯТЦ и происходивших на ядерных объектах аварий по всей поверхности Земли, включая поверхность океанов, распространились и техногенные радионуклиды.

Рассмотрим кратко, в чем состоят, например, причины загрязнения радионуклидами окружающей среды даже при нормальной (безаварийной) работе предприятий ЯТЦ. Сначала из недр Земли извлекают урановую руду. Затем ее дробят. Используемые в настоящее время урановые руды часто содержат менее 0,5% урана. Добиться полного извлечения урана из таких бедных руд нельзя. В результате на поверхности Земли возникают огромные отвалы переработанных руд, так называемые хвосты. Для работы ядерного реактора мощностью в 1 ГВт в течение года требуется переработать столько руды, что объем образовавшихся хвостов превышает  $3 \times 10^5 \text{ м}^3$ . По имеющимся данным, общий объем урановых хвостов в США уже превышает  $0,14 \text{ км}^3$ !

Для окружающей среды плохо не только то, что уран при этом оказывается на поверхности Земли и становится возможным воздействие его излучения на человека, но и усиливается переход опасного дочернего  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферу. При ветровой эрозии уран попадает в виде аэрозолей в воздух, вымывается дождями (особенно сильно современными кислотными) и попадает на те участки поверхности, где его раньше не было. К тому же в хвостах после извлечения урана оказывается большая часть дочерних продуктов распада урана – серьезных загрязнителей окружающей среды.

Даже при нормальной (штатной) работе ядерных реакторов в атмосферу постоянно поступает радионуклид  $^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 10,72$  года). Криптон – инертный газ, его трудно удалить, связав в какое-либо химическое соединение, и образующийся  $^{85}\text{Kr}$  смешивается с атмо-

сферным воздухом. Кроме  $^{85}\text{Kr}$  при штатной работе реактора в окружающую среду попадают тритий  $^3\text{H}$ , радиоидод  $^{131}\text{I}$  и некоторые другие радионуклиды.

Распространению техногенных радионуклидов по поверхности Земли способствует и отсутствие стопроцентно надежных способов захоронения радиоактивных отходов, образующихся на предприятиях ЯТЦ. Хотя высокорadioактивные отходы и переводят для безопасного хранения в удобные формы, например смешивая с цементом с образованием твердого бетона, полностью предотвратить переход радионуклидов из этих материалов в окружающую среду не удается.

К особенно тяжелым последствиям с точки зрения распространения техногенных радионуклидов по поверхности Земли приводят аварии, которые происходили на ядерных реакторах (например, авария в Уиндскейле, Великобритания, 1957 год, авария на Трехмильном острове в США, 1979 год, и особенно авария на Чернобыльской АЭС в СССР в 1986 году), или аварии в местах хранения радиоактивных отходов (Кыштым, СССР, 1957 год).

В результате Чернобыльской аварии, которая имела характер глобальной катастрофы, большие площади Украины, Белоруссии и России (главным образом в Брянской области) оказались сильно загрязненными радионуклидами. Всего в атмосферу тогда попало около 300 различных радионуклидов, в том числе  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ . След от аварии протянулся от Финляндии и Швеции до Грузии и Турции. Какова сейчас ситуация с радионуклидами, попавшими в окружающую среду в результате этой аварии?

Разумеется, все перешедшие в окружающую среду сравнительно короткоживущие радионуклиды ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ) уже полностью распались. Основные количества долгоживущих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с тальми водами, потоками дождевой воды частично перешли в реки и оказались в донных отложениях.  $^{137}\text{Cs}$  подвержен миграции по поверхности Земли значительно слабее, чем  $^{90}\text{Sr}$ , он оказывается прочно связанным с почвой, илом, глиной. Значительно лучше мигрирует в почвах  $^{90}\text{Sr}$  (из-за образования растворимого в воде гидрокарбоната  $\text{Sr}(\text{HCO}_3)_2$ ). Поэтому в настоящее время наибольшую опасность представляет попадание с пищевыми продуктами в организм человека именно  $^{90}\text{Sr}$ , хотя в отдельных местах сохраняются и опасные уровни загрязненности по  $^{137}\text{Cs}$ .

Изучением распределения радионуклидов по поверхности Земли и выявлением связи этого распределения с воздействием ионизирующего излучения на живые организмы занимается радиоэкология – наука, развившаяся в последние десятилетия на стыке биологии, физики и радиохимии [3].

## РАДИАЦИЯ И ЖИЗНЬ

Когда речь заходит о радиации и ее влиянии на все живое на Земле, в настоящее время господствует мнение, что от радиации одни неприятности. Конечно, при неумелом обращении с источниками ионизирующих излучений, природными и техногенными радионуклидами здоровью и каждого отдельного человека и человечеству в целом может быть нанесен существенный урон.

Но вместе с тем нельзя не учитывать и того, что мутации, обусловленные природными радионуклидами, которые наблюдались в ходе развития жизни на Земле, способствовали эволюции видов. Имеется и такая точка зрения, что само возникновение жизни на Земле было бы невозможно без воздействия ионизирующих излучений.

Земные организмы адаптировались к колебаниям естественного фона. Например, на продолжительности жизни людей, живущих в регионах Земли с заметно различающимся фоном ионизирующего излучения, значимые колебания фона никак не сказываются, более того, в некоторых местах с повышенным фоном средняя продолжительность жизни оказывается заметно больше, чем людей, живущих в регионах с низким естественным фоном. В настоящее время вклад техногенных радионуклидов в значение средней эффективной дозы незначителен и составляет несколько процентов от общей дозы, он значительно меньше, чем вклад только от природного  $^{222}\text{Rn}$ .

Нужно подчеркнуть, что вред для здоровья от всех техногенных радионуклидов для жителей России неизмеримо меньше того вреда, который приносит такая вредная привычка, как табакокурение. Можно надеяться, что в дальнейшем будут разработаны менее опасные, чем сегодня, процессы получения ядерной энергии и

более надежные способы обращения с высокорadioактивными отходами, так что даже потенциальный вред от использования радионуклидов будет практически исключен.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). М.: Центр сан.-эпидемиол. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
2. Холл Э.Дж. Радиация и жизнь: Пер. с англ. М.: Медицина, 1989. 256 с.
3. Сапожников Ю.А., Бердоносков С.С. Радиоэкология // Химическая энциклопедия. М.: БРЭ, 1995. Т. 4. С. 173.

*Рецензент статьи* Г.В. Лисичкин

\* \* \*

Сергей Серафимович Бердоносков, кандидат химических наук, доцент кафедры радиохимии химического факультета МГУ, руководитель и преподаватель химической школы при химфаке МГУ, зав. лабораторией химического образования Московского института развития образовательных систем. Лауреат Государственной премии СССР. Область научных интересов – изучение гетерогенных процессов с участием твердых дисперсных фаз. Автор и соавтор более 150 научных работ, нескольких учебников и учебных пособий для студентов-химиков, учителей и учащихся средних школ.

Юрий Александрович Сапожников, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета МГУ. Область научных интересов – распределение радионуклидов по поверхности Земли, измерение малых активностей радионуклидов. Автор и соавтор более 120 научных работ, научной монографии, пособия для студентов-радиохимиков.