

Природные источники ионизирующих излучений и их воздействие на организм человека

Введение

Воздействие ионизирующих излучений на человека является одной из наиболее значимых и актуальных современных проблем экологии и гигиены.

На протяжении достаточно долгого периода, с 30-х и по конец 70-х годов XX века проблема радиационной безопасности населения связывалась, главным образом, с воздействием ионизирующих излучений от искусственно созданных человеком (техногенных) препаратов и изделий:

- рентгеновского излучения при медицинском обследовании;
- излучения препаратов радия при их использовании в потребительских целях (например, при изготовлении и применении светящихся циферблатов часов, содержащих краску с солью радия);
- радиоактивных выбросов от радиохимических предприятий и атомных электростанций (АЭС), поступающих в окружающую среду при их штатной работе. Данный источник облучения населения являлся предметом беспокойства главным образом в первое десятилетие становления атомной отрасли в США, СССР, Англии, Франции. В последующие годы штатная работа радиохимических предприятий и АЭС была стабилизирована и ее безопасность в настоящее время не вызывает сомнений;
- продуктов ядерных испытаний, проводимых первыми ядерными державами (США, СССР, Англия, Франция) на земле, под водой и в атмосфере, вплоть до их запрещения Международным договором 1963 года;
- радиоактивных выбросов при авариях на радиохимических предприятиях и АЭС. К сожалению, данный источник поступления радионуклидов в окружающую среду остается непредсказуемым, поскольку в значительной мере связан с человеческим фактором;
- ионизирующего излучения от специализированных источников, используемых в медицине (для диагностики и лечения заболеваний) и в промышленности (например, в дефектоскопии различных изделий).

В последние годы произошел переход к более широкому пониманию проблемы радиационной безопасности населения, как необходимости ограничения и снижения облучения населения совокупно от всех источников ионизирующих излучений – природных, медицинских и техногенных. Это понимание проблемы нашло свое отражение в Федеральном законе Российской Федерации «О радиационной безопасности населения» и Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009. Такой подход основан на очевидном

факте, что биологические эффекты ионизирующего излучения конкретного радионуклида не зависят от его происхождения, поэтому присутствие больших концентраций природных радионуклидов в окружающей среде столь же неприемлемо, как и ее загрязнение искусственно полученными радионуклидами.

В 2000 году Правительство Российской Федерации приняло Федеральную целевую программу «Ядерная и радиационная безопасность России» (ФЦП ЯРБ) на 2000-2006 годы, одной из подпрограмм которой является «Снижение уровня облучения населения и техногенного загрязнения окружающей среды природными радионуклидами». В настоящее время действует ФЦП ЯРБ на 2008-2015 годы.

Прежде, чем мы более детально рассмотрим вопрос о природных источниках ионизирующих излучений и об особенностях их воздействия на организм человека, ознакомим читателя с используемой в статье терминологией и некоторыми общими понятиями по данной тематике.

1. Используемые термины, условные обозначения, сокращения, единицы измерения.

Радиоактивный распад – самопроизвольный внутриядерный процесс, сопровождающийся превращением ядра в другой вид с одновременным испусканием альфа-, бета-, гамма-излучения; свойство атомных ядер испытывать превращение в другое, более устойчивое, состояние с одновременным испусканием ионизирующего излучения.

Ионизирующее излучение – любой вид излучения, вызывающего ионизацию в среде его распространения. Различают электромагнитное и корпускулярное ионизирующее излучение. Электромагнитным ионизирующим излучением являются рентгеновские и гамма-лучи. Корпускулярное ионизирующее излучение может состоять из потока высокоэнергетических электронов, протонов, нейтронов, ядер атома гелия и некоторых других частиц.

Радионуклиды – обобщенное название атомных ядер, обладающих свойством радиоактивного распада. Нуклид – синоним термина «атомное ядро». Радиоактивный распад каждого радионуклида происходит с определенной скоростью. Эту скорость принято характеризовать периодом полураспада ($T_{1/2}$), то есть временем, за которое распадается половина всех ядер данного вида.

Изотоп химического элемента. Каждый химический элемент имеет определенное число протонов в атомном ядре, совпадающее с номером элемента в периодической системе Д.И.Менделеева. При этом число нейтронов в ядре может быть различным, что не влияет на химические свойства элемента. Вид атомов химического элемента с одинаковым числом

нейтронов в ядре называют изотопом. Большинство химических элементов состоит из смеси изотопов. При написании конкретного изотопа принято указывать сумму протонов и нейтронов в ядре (массовое число изотопа), например: уран-235, радон-222. Некоторые изотопы имеют специальное наименование. Так, водород-3 называют тритием, водород-2 дейтерием, водород-1 протием или просто водородом.

Альфа-излучение – поток альфа-частиц, испускаемый при радиоактивном распаде. Альфа-частица представляет собой ядро атома гелия. Альфа-излучение обладает большой ионизирующей и малой проникающей способностью, оно полностью задерживается листом бумаги и не способно проникнуть в организм человека через неповрежденную кожу. Однако при попадании внутрь организма (с пищей, воздухом, через рану) радиоактивные вещества, испускающие альфа-частицы, представляют наибольшую опасность в силу большого локального выделения энергии при взаимодействии альфа-частиц с тканью.

Бета-излучение – поток электронов, испускаемых при радиоактивном распаде. Бета-частицы могут проникать в ткани организма на значительную глубину, поэтому они опасны при наружном воздействии на близком расстоянии.

Гамма-излучение – поток высокоэнергетического электромагнитного излучения, испускаемого при радиоактивном распаде. Рентгеновские лучи также относятся к этому виду ионизирующего излучения. Гамма-излучение обладает небольшой ионизирующей, но большой проникающей способностью. Для защиты от этого излучения используют толстые слои материалов большой плотности (свинец, содержащее свинец стекло, бетон).

Беккерель (Бк) – единица измерения радиоактивности в системе СИ; 1 Бк соответствует одному акту радиоактивного распада в секунду. Также широко используется внесистемная единица измерения радиоактивности – Кюри; $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Зиверт (Зв) – единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения. С использованием этой меры сравнивают количество энергии, поглощенное биологической тканью при воздействии на нее ионизирующего излучения. В первом приближении (без учета специально введенных коэффициентов) можно считать, что $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Техногенные источники ионизирующего излучения – радионуклиды, являющиеся продуктом технологической деятельности человека. Это могут быть как специализированные источники, содержащие определенный радионуклид и созданные для полезного применения ионизирующего излучения, так и радионуклиды, распространившиеся в окружающей среде вследствие различной технологической деятельности человека, (ядерные испытания, работа предприятий атомной отрасли, аварии на ядерных объектах).

Медицинские источники ионизирующего излучения – источники рентгеновского излучения и специализированные источники, содержащие определенные радионуклиды и

применяемые для диагностики и лечения заболеваний. Медицинские источники также имеют техногенное происхождение. По мере совершенствования аппаратуры дозы от медицинских обследований постоянно уменьшаются.

Природные источники ионизирующего излучения включают космическое излучение, и радионуклиды, присутствующие в составе земной коры и поступающие в минеральные воды, воздух подземных шахт, атмосферный воздух, воздух помещений. В естественной среде обитания на открытых пространствах основными источниками ионизирующих излучений являются изотопы уран-238, уран-235, торий-232 и продукты их радиоактивного распада. Эти радионуклиды содержатся практически во всех геологических слоях оболочки земли.

2. Общие сведения о природных источниках ионизирующих излучений

2.1. Космическое излучение

Космическое излучение представляет собой поток высокоэнергетических частиц, падающий на Землю из Космоса. Первичное космическое излучение состоит из протонов (~92 %), α -частиц (~7 %), ядер Li, Be, C, N, O (~0,8 %) и ядер с более высоким массовым числом (~0,2 %). Космическое излучение является следствием различных ядерных процессов, происходящих в недрах звезд и в ядрах галактик. Определенная часть потока космического излучения обусловлена процессами на Солнце. При увеличении солнечной активности интенсивность космического излучения возрастает.

При взаимодействии первичного космического излучения с атомами земной атмосферы образуется вторичное космическое излучение, состоящее из гамма-излучения, электронов, протонов и мезонов. По мере приближения к поверхности Земли интенсивность первичного космического излучения уменьшается, а интенсивность вторичного излучения возрастает, достигает максимума на высотах 20–30 км и затем снижается из-за преобладания процессов поглощения излучения над процессами его генерирования. На уровне моря вторичное космическое излучение состоит в основном из электронов и мезонов.

С ростом атмосферного давления интенсивность вторичного космического излучения снижается (барометрический эффект).

Отметим, что космическое излучение является одним из главных источников формирования природного гамма-фона у поверхности земли. Другим определяющим его источником являются радионуклиды, входящие в состав земной коры и продукты их радиоактивного распада.

2.2. Радионуклиды, образующиеся в атмосфере под воздействием космического излучения

В атмосфере Земли в результате ядерных реакций, протекающих под воздействием космического излучения непрерывно образуются радиоактивные изотопы, главными из которых по воздействию на человека являются углерод-14 и тритий (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики радиоактивных изотопов водорода и углерода.

Химический элемент	Радиоактивный изотоп элемента	Период полураспада, лет	Удельная активность, Ки/г
Водород	Тритий (3_1H)	12,26	$9,8 \cdot 10^3$
Углерод	Углерод-14 (${}^{14}_6C$)	5568	4,4

2.3. Радионуклиды, входящие в состав земной коры

Сохранившиеся на нашей планете радиоактивные элементы условно могут быть разделены на три группы:

2.3.1. Долгоживущие изотопы урана и тория: уран-238, уран-235, торий-232 (табл. 2). Радиоактивный распад этих изотопов приводит к образованию трех радиоактивных семейств – трех рядов последовательно распадающихся радионуклидов различных элементов. Каждый радиоактивный ряд заканчивается стабильным (нерадиоактивным) изотопом свинца.

Таблица 2. Характеристики природных изотопов урана и тория.

Химический элемент	Радиоактивный изотоп элемента	Период полураспада, лет	Удельная активность, Ки/г
Уран	Уран-238 (${}^{238}_{92}U$)	$4,5 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
	Уран-235 (${}^{235}_{92}U$)	$7,13 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
Торий	Торий-232 (${}^{232}_{90}Th$)	$1,39 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$

2.3.2. Долгоживущие радиоактивные изотопы, генетически не связанные с радиоактивными семействами урана и тория. Такими изотопами являются: калий-40, кальций-48, рубидий-87, лантан-132 (табл. 3). Из этих изотопов наибольший вклад в облучение человека вносит калий-40, поскольку калий является биологически активным химическим элементом, участвующим в обмене веществ.

Таблица 3. Характеристики радиоактивных изотопов калия, кальция, рубидия, лантана.

Химический элемент	Радиоактивный изотоп элемента	Период полураспада, лет	Удельная активность, Ки/г
Калий	Калий-40 ($^{40}_{19}K$)	$1,31 \cdot 10^9$	$6,8 \cdot 10^{-6}$
Кальций	Кальций-48 ($^{48}_{20}Ca$)	$2 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-13}$
Рубидий	Рубидий-87 ($^{87}_{37}Rb$)	$6,5 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Лантан	Лантан-132 ($^{132}_{57}La$)	$7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$

2.3.3. Радионуклиды, входящие в состав радиоактивных семейств урана и тория. К наиболее значимым радионуклидам этой группы относятся: торий-230, торий-228, радий-226, радон-222, радон-220, полоний-210. Именно эти радионуклиды являются основным природным источником облучения населения. Более того, излучение именно этих радионуклидов формирует основную часть поглощенной дозы облучения населения, полученной от всех видов источников ионизирующего излучения – природных и техногенных (включая медицинские источники). Из данной группы радионуклидов основной вклад в облучение населения вносят изотопы радона.

Природные источники ионизирующего излучения относятся к категории повсеместно и постоянно действующих физических факторов окружающей среды, оказывающих влияние на здоровье человека. При этом важно отметить, что в результате хозяйственной и иной деятельности человека наблюдается устойчивая тенденция к возрастанию уровней облучения людей от природных источников.

3. Природный фон гамма-излучения

Итак, мы знаем, что вторичное космическое излучение и совокупное излучение радионуклидов земной коры создают у поверхности земли естественный радиационный фон, который является специфическим для каждой местности.

Средний уровень природного радиационного фона на территории России изменяется в диапазоне 0,08-0,14 мкЗв/ч. В местах с близким к поверхности залеганием глинозема, горных пород (в особенности гранита), монацитов, урановых руд радиационный фон, как правило, выше. В горах он может достигать значений до 1,2 мкЗв/ч.

Некоторые горные породы, в частности, гранит не рекомендуется использовать для строительства жилых и общественных зданий. Минералы, входящие в состав гранита,

содержат в своем составе радиоактивные элементы – калий-40, уран, торий, продукты радиоактивных семейств урана и тория, что обуславливает повышенный гамма-фон вблизи поверхности гранита (до $\sim 1,0$ мкЗв/ч). Поэтому гранит целесообразно использовать в основном при создании скульптур и памятников.

При этом следует отметить, что при строительстве современных зданий практически всегда используются такие природные материалы, как песок, щебень и глина, которые также содержат естественные радиоактивные элементы и являются по этой причине источником ионизирующего излучения.

Получаемая человеком доза облучения во многом зависит от образа жизни. Пребывание человека большую часть времени внутри помещения, герметизация помещений, постоянное использование газа на кухне при отсутствии вытяжного устройства, купание в некоторых минеральных источниках, полеты на самолетах и т.п. – все эти факторы увеличивают дозу облучения человека.

Чтобы успокоить читателя, отметим, что в некоторых местах нашей планеты величина природного гамма-фона достигает 4 мкЗв/ч, и этот уровень ионизирующего излучения практически не влияет на здоровье коренного населения, по-видимому, вследствие генетической адаптации людей, постоянно проживающих в этих местах, к повышенному радиационному фону.

4. Вклад различных источников ионизирующего излучения в совокупную дозу облучения населения

Человек подвергается облучению двумя способами: внешним и внутренним.

Внешнее облучение человека обусловлено воздействием вторичного космического излучения и излучения от радионуклидов, присутствующих вовне человека – в почве, воздухе, воде. К этому виду следует отнести также облучение рентгеновскими лучами при различного рода медицинских обследованиях.

Внутреннее облучение обусловлено радионуклидами, находящимися внутри организма человека. Радиоактивные вещества поступают внутрь человека с воздухом, водой, пищей. Большая часть радионуклидов выводится из организма, не претерпев распада, но некоторая их часть распадается внутри организма человека с испусканием ионизирующего излучения.

Специальными методами исследования показано, что в организме человека содержится целый «букет» природных радионуклидов. Такие долгоживущие радионуклиды, как калий-40, уран-238, уран-235, торий-232, поступают в организм в основном с пищей. Однако доза облучения от этих радионуклидов очень мала и, как правило, не превышает: для

урана и тория 0,01 мкЗв, для калия-40 – 0,02 мкЗв. Химический элемент калий биологически активный элемент, поэтому концентрация калия-40 в тканях организма сильно зависит от вида органа, возраста человека и ряда других факторов.

Соотношение доз облучения населения за счет различных источников ионизирующего излучения приблизительно выглядит так: ~75 % дозы обусловлено воздействием природных источников, ~15 % приходится на долю медицинских источников, и только ~10 % обусловлено совокупным вкладом всех техногенных источников, включая радиоактивные выпадения после ядерных испытаний и радиационных аварий на радиохимических предприятиях и АЭС. Наглядно это показано на рисунке 1.

Таким образом, природные источники ионизирующего излучения вносят значимый вклад в дозу облучения населения и представляют наибольший потенциальный риск негативных последствий для здоровья населения. Защита от воздействия природных источников ионизирующего излучения является одной из приоритетных, проблем в области обеспечения радиационной безопасности населения.

Из природных источников ионизирующего излучения безусловным лидером по воздействию на организм человека является радон (рис. 2).

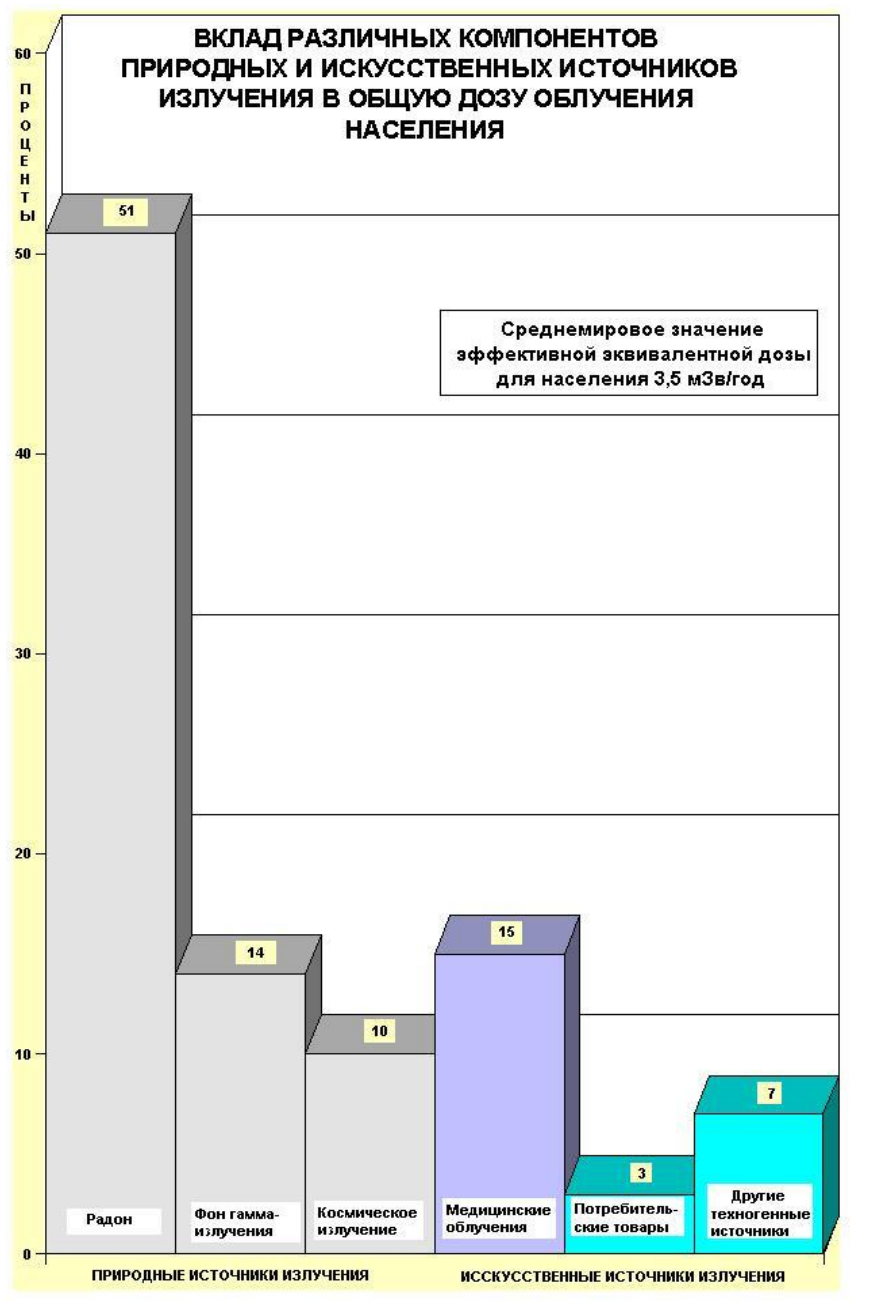


Рис. 1.

Вклад различных источников ионизирующего излучения в дозу облучения населения.

**Вклад различных компонентов
в общую дозу облучения населения
природными источниками ионизирующих
излучений**

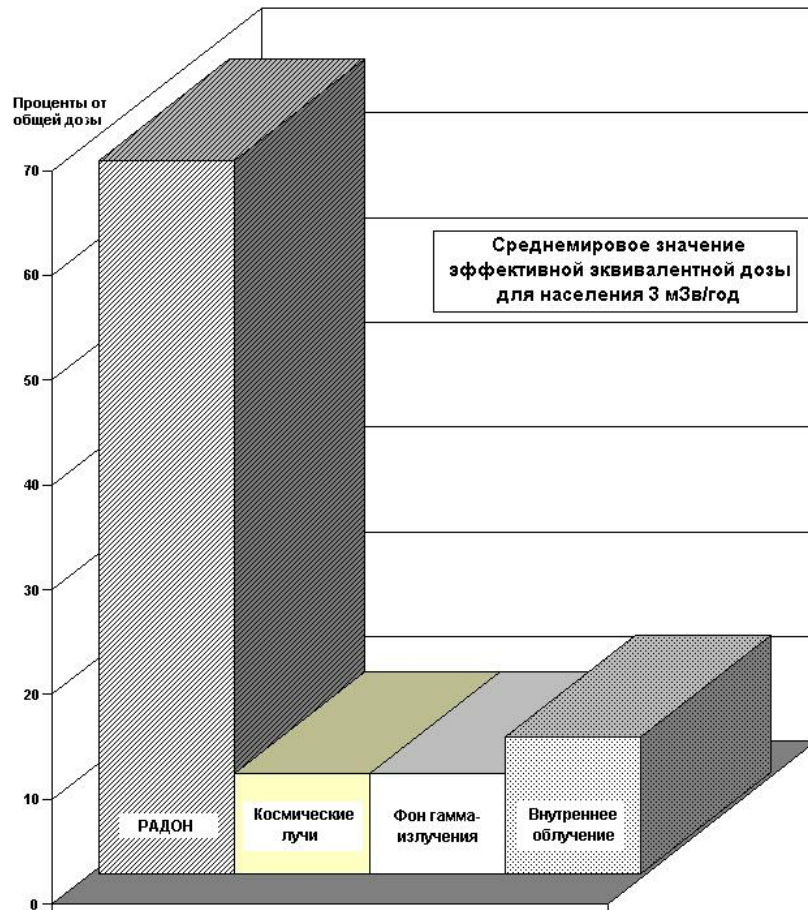


Рис. 2.

Вклад компонентов природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) в дозу облучения населения, в процентах от доли, обусловленной воздействием всех ПИИИ

5. Изотопы радона и их поступление в окружающую среду

Основной запас содержащихся в земной коре природных радионуклидов сосредоточен в горных породах, которые являются главным их хранителем и, соответственно, главным источником их поступления в окружающую среду.

В составе горных пород имеются долгоживущие изотопы урана и тория. Радиоактивный распад урана-238, урана-235, тория-232 приводит к образованию трех рядов последовательно распадающихся радионуклидов различных элементов. Одними из продуктов этой цепи распадов являются изотопы радона.

Радон-222 ($T_{1/2} = 3,825$ сут) образуется в составе радиоактивного семейства урана-238 как продукт распада радия-226 ($T_{1/2} = 1620$ лет).

Радон-220 ($T_{1/2} = 54,5$ сек) образуется в составе радиоактивного семейства тория-232 как продукт распада радия-224 ($T_{1/2} = 3,64$ сут).

Радон-219 ($T_{1/2} = 3,9$ сек) образуется в составе радиоактивного семейства урана-235 как продукт распада радия-223 ($T_{1/2} = 11,2$ сут).

Наиболее долгоживущий изотоп радон-222 принято называть просто радоном, изотоп радон-220 имеет историческое название «торон», изотоп радон-219 имеет историческое название «актинон».

Радон – инертный химический элемент, образующий одноатомный газ. Этот газ не имеет цвета и запаха, его плотность в $\sim 7,5$ раз превышает плотность воздуха.

Радон самый редкий из всех существующих на Земле газов. Содержание (по массе) радона в атмосфере оценивается цифрой $7 \cdot 10^{-17}$ %. Если принять, что масса атмосферы Земли $\sim 5 \cdot 10^{18}$ кг, то масса радона в атмосфере составляет всего $\sim 0,35$ кг.

Являясь инертным и газообразным веществом, радон через трещины в горных породах покидает место своего «рождения» и поступает в верхние слои почвы, водные источники, атмосферу, повсеместно распространяясь в окружающей среде. С воздухом радон попадает в легкие человека.

Дополнительным источником поступления радона в места обитания человека являются строительные материалы, используемые при возведении зданий – естественный камень, песок, глина, кирпич, бетон, шлаки.

6. Радон в помещениях

На открытом пространстве (в наружном воздухе) радон содержится в такой низкой концентрации, что обычно не вызывает беспокойства. Однако внутри зданий может происходить накопление радона. Согласно выполненным измерениям содержание радона внутри помещений в 8-10 и более раз превышает его содержание в наружном воздухе. В

непрветриваемых помещениях концентрация радона в воздухе может достигать очень больших значений.

Поскольку основная часть радона поступает в воздух из горных пород и верхних слоев почвы, то главным источником поступления радона в здание является, как правило, его грунтовое основание. Поэтому максимальная концентрация радона, поступающего из почвы, обычно наблюдается в подвальных помещениях и на первых этажах зданий.

Радон поступает в помещения здания из почвы через грунтовый пол, трещины в бетонном полу, места ввода коммуникаций, через водостоки и т.д. Источником радона являются также строительные материалы, используемые при возведении здания.

Другой источник поступления радона в помещения – это используемые для бытовых целей природный газ и вода артезианских скважин. Содержание радона в глубинных водных источниках, как правило, выше, чем в водах рек и водоемов. При интенсивном использовании больших объемов воды (в душевых, прачечных, парной и т.п.) значительная доля растворенного в воде радона попадает в воздух.

7. Чем обусловлен вред радона для организма человека?

При попадании в легкие радон химически не взаимодействует с тканями организма. Воздействие радона заключается в том, что за тот небольшой промежуток времени, когда этот газ находится внутри легких, некоторая часть его атомов претерпевает радиоактивный распад, испуская альфа-частицу. Образующиеся при этом радиоактивные атомы полония остаются в легочной ткани и дают начало последовательной цепочке радиоактивных распадов (рис. 3), происходящих уже непосредственно в ткани легких.

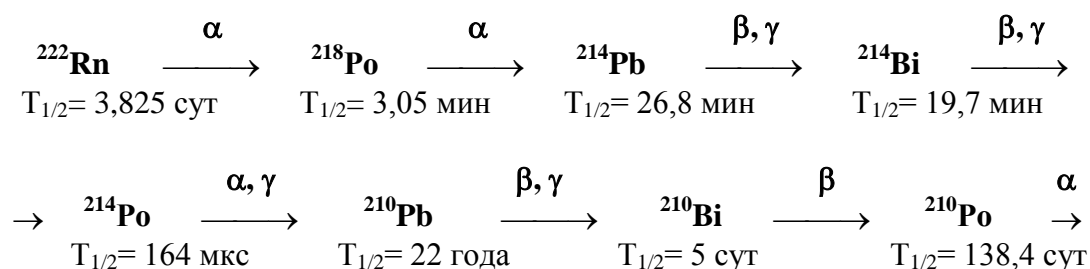


Рис. 3.

Цепочка радиоактивного распада радона-222

Представленная на рисунке 3 схема показывает цепочку радиоактивного распада, начинающуюся с радона-222. Это наиболее долгоживущий изотоп радона. Вклад радона-222 в дозу облучения населения приблизительно в 20 раз больше по сравнению с вкладом радона-220 (торон).

Третий изотоп радона – радон-219 (актинон) имеет период полураспада всего 3,9 секунды и, как следствие, дает столь незначительный вклад в дозу облучения, которым можно пренебречь.

Медицинские последствия облучения населения от природных радионуклидов выражаются главным образом в приросте онкологических заболеваний, и этот прирост прямо связан с величиной дозы облучения.

Поскольку основной вклад в дозу облучения обусловлен воздействием радона и продуктов его распада на ткань легких, то указанный прирост онкологических заболеваний приходится именно на заболевание легких.

В сочетании с воздействием выхлопных газов автомобилей и табачного дыма онкогенный эффект действия радона возрастает в 2-10 раз и, что особенно важно, сокращается скрытый период развития рака легких.

В детском возрасте риск развития заболевания легкого в результате воздействия радона значительно выше, чем у взрослого населения.

8. Защита от радона

Согласно НРБ-96/2009 для существующих зданий принято нормативное значение среднегодовой объемной активности изотопов радона в помещениях – 200 Бк/м³, а для вновь строящихся – 100 Бк/м³. При более высоких значениях объемной активности радона должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений.

Эти мероприятия зависят от источников поступления радона и его концентрации в воздухе помещений.

Поступление радона из стен уменьшается до 10 раз при облицовке стен пластиковыми материалами или после покрытия стен несколькими слоями масляной краски.

При поступлении радона с водой и газом наиболее эффективным способом снижения его концентрация в воздухе является вентиляция. В некоторых случаях при предельно высоких концентрациях радона в воде необходима замена источников водоснабжения.

При поступлении радона в помещения из грунта и строительных материалов вентиляция также является наиболее простым и эффективным способом защиты. Интенсивность поступления радона в помещения изменяется в несколько раз в течение суток, максимум обычно отмечается в ночные и предутренние часы. Поэтому рекомендуется проводить обязательное проветривание жилого помещения перед сном и в предутренние часы.

В заключение хотелось бы отметить, что каждый человек и каждая семья уже сейчас имеют мощный резерв в борьбе с заболеванием легких. Речь идет о курении. На курящих радон действует в 10 раз сильнее, чем на некурящих. Два этих фактора (радон и курение) не просто складываются, а многократно усиливают друг друга. Для некурящего человека концентрация радона в воздухе как бы в 10 раз меньше, чем для курящего. Из тысячи курящих людей, которые живут всю жизнь при концентрации радона в помещении 100 Бк/м³, погибнут от онкологического заболевания легких 50 человек, а из тысячи некурящих – только 5.

Что касается радона в помещении – то всё не так страшно. Если в результате обследования выяснилось, что содержание радона в помещении выше нормативного значения, то специалисты практически всегда могут предложить достаточно экономичные меры по существенному улучшению ситуации.

докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией

А.М.Маренный

канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник

В.И.Астафуров