

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ПОСЛЕДИПЛОМНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»

Кафедра гигиены и медицинской экологии

**В. И. ТЕРНОВ**

**РАДОН В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ:  
ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И  
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

Учебно-методическое пособие

Минск, БелМАПО  
2022

УДК 614.7:546.296(075.9)

ББК 51.26+24.121.86я78

Т 35

Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия  
НМС Государственного учреждения образования  
«Белорусская медицинская академия последипломного образования»  
протокол № 6 от 20.06.2022

**Автор:**

*Тернов В.И.*, профессор кафедры гигиены и медицинской экологии  
ГУО «Белорусская медицинская академия последипломного образования»,  
доктор медицинских наук, профессор

**Рецензенты:**

*Ключенович В.И.*, заведующий отделением социально-гигиенического  
мониторинга ГУ «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и  
общественного здоровья», к.м.н., доцент  
*Кафедра* радиационной медицины и экологии УО «Белорусский  
государственный медицинский университет»

**Тернов В.И.**

Т 35

Радон в окружающей среде: эколого-гигиенические и медико-  
биологические аспекты : учеб.-метод. пособие / В.И. Тернов. – Минск:  
БелМАПО, 2022. – 21 с.

ISBN 978-985-584-790-9

В учебно-методическом пособии приводятся современные данные о гигиенической значимости присутствия в окружающей среде радона и его дочерних продуктов распада. В системном виде рассматриваются общая характеристика радона, его распространенность в окружающей среде различных стран и Республики Беларусь, даётся описание физико-химических свойств и особенностей биологического действия. Описываются основные методы радиометрии и дозиметрии радона и дочерних продуктов распада, описываются принципы защитных мероприятий.

Предназначено для слушателей повышения квалификации из числа врачей-гигиенистов, и врачей других специальностей, экологов.

УДК 614.7:546.296(075.9)

ББК 51.26+24.121.86я78

ISBN 978-985-584-790-9

© Тернов В.И., 2022

© Оформление БелМАПО, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Физико-химические свойства и источники радона.....	6
2. Радон в окружающей среде.....	7
3. Биологическая активность и гигиеническая значимость радона.....	13
4. Методы радиометрии и дозиметрии радона и его ДПР.....	16
5. Защита от воздействия радона + ДПР.....	18
6. Заключение.....	20
Литература.....	21

## ВВЕДЕНИЕ

Еще 50 лет тому назад бытовало устойчивое мнение о том, что естественный радиационный фон – это природная данность, знать о которой необходимо, но не пытаться каким-либо образом повлиять на нее. Существовало своеобразное теоретическое обоснование этому. Полагали, что если этот фактор природного происхождения, то он не может нести какую-либо угрозу биоте, а, возможно, является необходимым и полезным в эволюционном развитии живого на Земле.

Однако по прошествии определенного периода времени стали накапливаться факты, свидетельствующие о том, что существует связь между биотой и естественной радиацией и это взаимодействие носит сложный характер: в одних обстоятельствах радиационный фон причастен к такому полезному с точки зрения явлению как гормезис, а с другой – может выступать одним из факторов риска нарушения биологического равновесия, выявляемого как на индивидуальном (организменном), так и популяционном уровне.

При более пристальном рассмотрении земной радиации относительно давно было установлено, что среди естественных источников радиации наиболее биологически значимым является радон и дочерние продукты его распада (Rn и ДПР), на долю которых приходится около 50% той дозовой нагрузки, которую получает биота от всех остальных источников радиации земного происхождения. Такой факт мог бы считаться незамеченным, если бы не стало известно, что у горнорабочих урановых рудников ещё в доядерную эпоху (середина 19 века) уровень развития рака лёгкого был существенно выше, чем у шахтёров других производств. Долгое время точные причины появления такой патологии оставались не выясненными. Полагали, что это результат воздействия свинца. И лишь с развитием знаний по ядерной физике и, в частности, радиометрии и дозиметрии, уже в середине 20 века позволили доказать, что рак лёгкого у шахтёров урановых рудников – следствие влияния Rn и ДПР. Прошло ещё некоторое время и «радоновая проблема» шахтёров урановых рудников в буквальном и переносном смысле вышла на поверхность. Оказалось, что Rn и ДПР повсеместно присутствуют не только на открытой поверхности земли, но и в помещениях. Причем концентрации его в окружающей среде колеблется в широких пределах и достаточно часто превышают те, которые обнаруживаются в урановых шахтах.

Результаты радонового мониторинга, очень быстро достигшие масштабов глобального, свидетельствуют о том, что радон и ДПР действительно являются факторами риска повышенного уровня развития рака лёгкого. Причем по самым

скромным оценкам на «совести» Rn+ДПР может оказаться до 15% всей лёгочной онкопатологии.

Такие знания заставили гигиеническую науку и практику обратить внимание на этот источник облучения и развернуть ширококомасштабные работы, направленные на минимизацию радоновых рисков.

В последние годы в Республике Беларусь радоновый мониторинг находится в стадии реализации. Получаемые в ходе этого мониторинга данные позволяли с осторожностью прогнозировать, что по геофизическим характеристикам почвенного покрова и более глубоких слоев земли большая часть территории республики может быть отнесена к категории радоноопасной. Основой для такого прогноза явилось выявление на территории неглубоко залегающих пород, которые могут быть поставщиками Rn+ДПР на поверхность.

В ходе реализации «радонового проекта» складывается впечатление, что прогнозы геофизиков далеко не всегда совпадают с результатами натурных исследований радона и ДПР, полученными на разных территориях республики.

Так, суммируя полученные на сегодня данные можно констатировать, что концентрации радона в зданиях достаточно редко превышают установленные гигиенические нормативы (до 200 Бк/м<sup>3</sup>), среднегодовые эффективные дозы на легочную ткань не превышают 4-5 мкЗв/год, не достигая уровня неприемлемого риска (10 мкЗв/год). В таких случаях, меры защиты населения от влияния радона не носят срочного характера и должны проводиться в рамках существующей методологии защиты с реализацией основного принципа – принципа оптимизации.

Развитие радонового мониторинга в республике должно привести к тому, что проблема войдет в нормальное практическое русло повседневной работы по системной радоновой экспертизе отводимых на строительство территорий, текущей ситуации по содержанию изотопа в помещениях с постоянным пребыванием населения и реализации в некоторых случаях недорогих и эффективных мер по минимизации присутствия в среде обитания Rn+ДПР, рассматривая последний в качестве фактора риска, который легко поддается регулированию.

Освещению современного состояния «радоновой проблемы» и посвящено данное учебно-методическое пособие.

## 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИСТОЧНИКИ РАДОНА

Радон – бесцветный, не имеющий вкуса и запаха инертный газ, примерно в 7,5 раза тяжелее воздуха. Образуется в процессе радиоактивного распада урана и тория.

В природе радон встречается в двух основных формах: в виде радона-222 ( $Rn-222$ ) – члена радиоактивного ряда, образуемого продуктами распада урана-238 и в виде радона-220 ( $Rn-220$ ) – члена радиоактивного ряда тория-232. Имеется еще и радон-219.

Полагают, что  $Rn-222$  примерно в 20 раз важнее, чем  $Rn-220$ , а  $Rn-219$  практически не учитывается из-за очень малого количества и очень короткого периода полураспада:  $T_{1/2}$   $Rn-219$  равен 4 секундам, при этом этот же показатель у  $Rn-222$  равен 3,8 дня, а  $Rn-220$  – 55 секунд.

На практике, когда речь заходит о радоне предполагается, что под этим понимаются сумма  $Rn-222 + Rn-220$  плюс дочерние продукты их распада (ДПР).

Это важно иметь в виду, поскольку большая часть облучения исходит именно от ДПР, а не от самих изотопов радона. ДПР – это ряд радиоактивных элементов, которые образуются при распаде изотопов радона. Согласно схемам распада к дочерним продуктам радона-222 относятся полоний-218, свинец-214, висмут-214 и др. Цепочка распада  $Rn-219$  включает полоний-215, свинец-211, висмут-211 и другие изотопы. Полагают, что  $Rn-222$  и ДПР его создают наибольшую лучевую нагрузку на биоту: до 90% такой нагрузки создает  $Rn-222$  и ДПР его, а остальные 10% соответственно  $Rn-220$  и  $Rn-219$  со своими ДПР. При этом вклад  $Rn-219$  и его ДПР представляется незначительным настолько, что реально может не учитываться как источник облучения человека.

Все изотопы радона являются «чистыми»  $\alpha$ -излучателями, а продукты распада, кроме альфа-частиц, часто являются источниками бета-излучения.

Заслуга открытия радона принадлежит английскому ученому Э. Резерфорду, который в 1899 году отметил, что препараты тория, помимо  $\alpha$ -частиц, испускают и неизвестное вещество, от чего воздух вокруг препарата становится радиоактивным. Это явление ученый предложил назвать «эманация» и присвоить ему символ «Em». Такая же эманация была вскоре обнаружена в присутствии препарата радия, причем эта эманация оказалась по природе радиоактивным инертным газом.

В 1900-е годы был открыт  $Rn-222$  (Ф. Дорн и независимо А. Дебьерн).  $Rn-219$  был открыт в 1903 году А. Дебьерном. Атомный вес у этого газа оказался равным 86. В 1923 этот газ получил окончательное название «радон» и символ «Rn».

В химическом отношении радон из всех благородных газов обладает относительно более высокой активностью и может при высоких температурах образовывать некоторые соединения (в частности, со фтором).

Радон хорошо растворим в воде (460 мл/л), органических растворителях. В жировой ткани растворимость радона в десятки раз выше, чем в воде. Газ легко просачивается сквозь полимерные пленки, легко адсорбируется активированным углем и силикагелем. Радиоактивность радона сопровождается флюоресценцией. При этом газообразный и жидкий радон флюоресцирует голубым светом, а твердый радон (изотоп, охлажденный до температуры жидкого азота) меняет цвет сначала на желтый, а потом на красно-оранжевый.

Практическое использование радона невелико. Наиболее широко он используется в медицине (радонотерапия), реже в сельском хозяйстве (для активации кормов домашних животных), металлургии (индикатор определения скорости газовых потоков в доменных печах). В геологии измерение содержания радона в воздухе и воде проводится для поиска месторождений урана и тория, в гидрогеологии – для исследования взаимодействия грунтовых и поверхностных вод, сейсмологии – может применяться для прогноза землетрясений.

## 2. РАДОН В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Ядро радона постоянно возникает в природе при радиоактивном распаде ядер материнских изотопов. Равновесное содержание радона в земной коре оценивается как  $7 \cdot 10^{-16}$  по массе. Ввиду химической инертности радон относительно легко покидает кристаллическую решетку «родительского» минерала, попадает в подземные воды, природные газы и воздух. Поскольку наиболее долгоживущим из природных изотопов радона является Rn-222 именно его содержание в природных средах максимально. Он может диффундировать на относительно большие расстояния (несколько сантиметров), практически распадаясь в месте образования. Отсюда концентрации этих изотопов в среде обитания (по сравнению с Rn-222) пренебрежимо малы.

Основными источниками поступления радона в окружающую среду являются: грунт, строительные материалы, грунтовые воды, природный газ, уголь, рудники, отвалы, образующиеся при добыче полезных ископаемых (в частности, фосфатов), растения, геотермальные источники тепла и электроэнергии, предприятия ядерно-топливного цикла.

Наиболее значимыми источниками поступления радона в среду обитания, а следовательно, и в организм человека являются почва и грунтовые воды. Полагают, что средняя концентрация радона в почве, а вернее в почвенном воздухе, составляет 6-7 Бк/л. И эта концентрация на несколько порядков выше,

чем в атмосферном воздухе (около  $4,4 \cdot 10^{-3}$  Бк/л). В процессе выделения и распределения радона решающая роль отводится диффузии, конвекции, а также наличию геомеханических явлений. Показано, что на интенсивность выделения (эксгаляции) радона в окружающую среду влияют метеорологические условия (дождь, снег, мороз, барометрическое давление, температура, скорость ветра и др.). Так, дождь, снег, мороз и повышение атмосферного давления снижают интенсивность эксгаляции, а повышение температуры и увеличение скорости ветра, наоборот, вызывают её усиление. Наблюдаются и суточные колебания радона в атмосфере: максимум концентрации его наблюдается в ночные часы, а минимум – днём.

Эколого-гигиенический мониторинг радона начал своё развитие в конце 60-х годов прошлого века, когда пришло понимание того, что во-первых среди природных источников радиации радону и ДПР принадлежит «ведущая» роль среди всех других источников естественного происхождения, а во-вторых, данные многолетних эпидемиологических наблюдений за состоянием здоровья горняков, занятых добычей урановых руд, которые доказали, что шахтный радон является значимым фактором риска развития у рабочих рака лёгкого.

Этим и можно объяснить тот факт, что «радоновая проблема» именно в этот период времени в буквальном и переносном смысле вышла на поверхность, и, как показали дальнейшие события, вполне закономерно. Уже первые исследования по радоновому мониторингу выявили факты присутствия радона в среде обитания в концентрациях, которые нередко превышали таковую в урановых рудниках.

Объёмы проводимого в ряде стран мира радонового мониторинга окружающей среды поражают своей масштабностью. Обобщенные результаты такого мониторинга показывают, что в ряде развитых стран, таких, как США, Швеция, Великобритания, Финляндия, Норвегия и др. такая работа началась более 30 лет тому назад, и за этот период выполнена не одна государственная программа. Только по мониторингу радона в воздухе помещений США провели около 3 млн. исследований, в Швеции – около 500 тыс., в Великобритании – более 450 тыс., в России – около 1,9 млн. Наибольшее число исследований из расчета на 1 млн. населения проведено в Швеции (около 56 000), в Финляндии (около 14000) и в России (около 13000).

Радоновый мониторинг, как и любой другой, в своей реализации преследует цель: получить более или менее точную картину присутствия радона в окружающей среде (атмосферный воздух, воздух помещений), оценить гигиеническую и медицинскую значимость полученных результатов; принять в необходимых случаях меры по минимизации рисков здоровью, связанных с радоном.

В достижении первой цели необходимы широкомасштабные исследования радона как на территориях, так и в помещениях. Такой подход оправдан, так как строгой зависимости между содержанием радона в атмосферном воздухе и в помещениях может и не быть. Поэтому, как правило, такой мониторинг проводится по двум более или менее самостоятельным линиям: мониторинг атмосферного (почвенного) радона и мониторинг помещений, где источниками радона могут быть не только диффузия его из почвы, на которой стоит помещение, но и строительные конструкции здания, вода, поступающая для хозяйственно-питьевых нужд, использование газа и т.д.

Вторая цель радонового мониторинга достигается через сопоставление полученных данных с соответствующими гигиеническими регламентами, оговаривающими допустимые уровни присутствия радона в помещениях (референтные уровни).

И наконец, третья составляющая цели такого мониторинга – оценить уровень радиационного риска присутствия радона в среде обитания и предложить (по необходимости) меры по снижению его до приемлемо низкого уровня, основанные на реализации принципа оптимизации (ALARA).

Следует сказать, что по показателям содержания радона в атмосферном воздухе и в помещениях «радоновая» ситуация в разных странах колеблется в очень широких интервалах. Отсюда такие конкретные данные имеют для нас весьма ограниченную значимость. Более важным представляются обобщенные данные о содержании радона в помещениях и соотношении фактической концентрации принятым национальным референтным (допустимым) уровням.

Нам удалось найти сведения, что среди европейских стран максимальные среднегодовые уровни радона обнаружены в зданиях на территории Сербии и Черногории (144 Бк/м<sup>3</sup>), Чехии (140 Бк/м<sup>3</sup>), Финляндии (120 Бк/м<sup>3</sup>), Люксембург (115 Бк/м<sup>3</sup>), Словакии и Швеции (108 Бк/м<sup>3</sup>).

В большинстве европейских стран допустимые (референтные) уровни содержания радона в помещении – 200 Бк/м<sup>3</sup>. Такой и выше уровень радона зафиксирован в Швейцарии (около 17%), в Швеции (около 14%), в Финляндии (около 12%), Норвегии (около 9%). Средняя концентрация радона в помещениях в интервале 200-400 Бк/м<sup>3</sup> отмечены в Австрии (около 4% в помещении), в Норвегии и Люксембурге (около 3%), Ирландии (около 1,5%). В других странах Европы процент проб с превышением референтного уровня (200 Бк/м<sup>3</sup>) находятся в диапазоне 0,1-1,0%.

Радон в помещениях в первую очередь может оказаться в результате диффузии из грунта, на котором стоит здание. Другим достаточно значимым поставщиком радона в помещениях являются применённые строительные материалы.

Практически во всех известных и широко применяемых строительных материалах на минеральной основе содержится определенное количество естественных радиационных материалов – родоначальников радона и ДПР (кирпич, фосфогипс, цемент, бетон, песок, гравий, щебень, каменноугольные шлаки, аглопорит, керамзит и т.п.). Наиболее экологически чистым по радону считаются материалы из дерева, однако и здесь в обязательном порядке присутствуют естественные радиоактивные изотопы (калий 40, семейство урана-радия, тория и т.д.). В мировой строительной практике отмечены случаи, когда в качестве строительных материалов использовались даже отвалы урановых рудников. Среди источников радона в помещениях следует иметь в виду и воду, добываемую из недр. По некоторым оценкам (НКАДАР ООН) около 1% жителей Земли потребляют воду с первоначальной радиоактивностью, превышающей  $10^6$  Бк/м<sup>3</sup>, а ещё 10% - с исходной концентрацией радона более  $10^6$  Бк/м<sup>3</sup>. Однако следует иметь в виду, что из воды радон достаточно быстро улетучивается, отчего можно предположить, что фактически уровни его в употребляемой питьевой воде значительно ниже исходных величин. Летучесть радона резко возрастает при кипячении (нагреве) воды. Отсюда становится понятным, почему в ваннных комнатах концентрации радона могут достигать максимума для данного дома. Полагают, что концентрация радона водного происхождения в ванной комнате (во время приёма душа и ванны) может быть в 40 раз выше, чем в жилых комнатах, и в 3 раза выше, чем на кухне с газовой плитой. В этом случае разница между жилыми помещениями и кухней может объясняться появлением на кухне радона, источником которого будет природный газ. Сравнительный вклад отдельных источников поступления радона в типичном (жилом) доме даёт таблица 1.

Таблица 1. Удельный вес отдельных источников радона в помещениях дома

Источник	Доля от общего поступления, %	Источник	Доля от общего поступления, %
Почва под зданием	~70	Вода	5
Внешний воздух	13	Природный газ	4
Строительные материалы	7	Другие источники	~2

В целом можно отметить, что концентрация радона и его ДПР в воздухе помещений определяется:

- степенью активной или пассивной диффузии его из грунта;
- интенсивностью эксгаляции радона из строительных материалов и изделий, примененных при строительстве зданий;

- возможностью эксгаляции радона из артезианской воды и газа;
- климатом, погодой, образом обитания человека и эффективностью вентиляции в помещении.

К сожалению, в Республике Беларусь до сих пор полномасштабный радоновый мониторинг не проведен, отчего цельной картины по этой проблеме нет.

В Беларуси работы по оценке радиационной обстановки, обусловленной присутствием в среде обитания изотопов радона и ДПР начались ещё в начале 90-х годов прошлого века. Согласно радиометрическим изысканиям геофизической экспедиции ПО «Белгеология» из исследованных территорий республики около 40% отнесены к разделу радоноопасных. Полагают, что это связано с неглубоким залеганием гранитных пород и с широким распространением активных зон тектонических нарушений, дренирующих глубинные зоны эманирования. При этом наиболее потенциально радонозначимыми являются: на юге – зоны, связанные с Микашевичско-Житковичским горстом и выступами Украинского кристаллического щита, а на западе – территории, связанные с Белорусским кристаллическим массивом. В 1996 гг. этой же экспедицией было выявлено высокое содержание радона в почвенном воздухе в Скидельском, Рогачевском, Дубровенском районах и в Горецко-Шкловском разломе. Здесь концентрация радона составляла 15-20 кБк/м<sup>3</sup>, при средней арифметической около 1 кБк/м<sup>3</sup>.

Зоны активных разломов почвы имеются и в городе Минске. Они пересекают территорию с юго-запада на северо-восток (Минский разлом) и с юго-востока на северо-запад (Ошмянский разлом). К концу 90-х годов к работе по оценке присутствия радона на территории Республики Беларусь подключилась и санитарно-эпидемиологическая служба, в обязанности которой входило ведение надзора за содержанием «почвенного радона», осуществляемого в рамках предупредительного надзора при отводе участков при строительстве, а также за концентрациями радона как в помещениях старой постройки, так и в новостройках. При этом акцент делался на помещении, предназначенное для проживания. Кроме того, в республике ведется мониторинг за радиоактивностью строительных материалов, который так или иначе сопряжены с радоновой проблемой.

Более того, 21 век начался в республике с попыток организовать полномасштабный радоновый мониторинг, который бы позволил объективно оценить радон как потенциальный фактор риска здоровью и разработать на этой основе программу минимизации влияния этого фактора на здоровье населения. Лишь в последние годы работа такого рода проводится в рамках

государственной программы, в которой задействованы многие министерства и ведомства, в том числе НАН РБ, Минздрав и др.

В настоящее время в рамках соответствующей государственной программы по ядерным и радиационным технологиям с 2005 года и по настоящее время радоновый мониторинг в жилищах проводится государственным научным учреждением «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси по специально разработанной методике. По результатам исследований среднегодовая объёмная активность радона (ОА радона) в Беларуси составила 84 Бк/м<sup>3</sup> (47 Бк/м<sup>3</sup> – Брестская область, 88 Бк/м<sup>3</sup> – Витебская область, 98 Бк/м<sup>3</sup> – Гродненская область, 99 Бк/м<sup>3</sup> – Минская область, 86 Бк/м<sup>3</sup> – г. Минск, 98 Бк/м<sup>3</sup> – Могилевская область, 62 Бк/м<sup>3</sup> – Гомельская область).

Получены данные о среднегодовой объёмной активности радона в жилищах, рассчитаны ЭРОА радона и торона в помещениях и среднегодовые дозы облучения населения от радона. Наибольшие среднегодовые уровни ЭРОА радона зафиксированы в Минской (84 Бк/м<sup>3</sup>, Витебской (76 Бк/м<sup>3</sup>), Гродненской (66 Бк/м<sup>3</sup>), Могилевской (57 Бк/м<sup>3</sup>) областях, наименьшие в Гомельской (35 Бк/м<sup>3</sup>) и Брестской (31 Бк/м<sup>3</sup>) областях. Усредненное значение ЭРОА радона по всем регионам Беларуси составило 57 Бк/м<sup>3</sup>, что значительно выше среднемирового значения, равного 16 Бк/м<sup>3</sup>, и среднего значения ЭРОА радона для России (27 Бк/м<sup>3</sup>), что возможно связано как с особенностью геологического строения территории, так и конструктивной особенностью жилищ в сельской местности Беларуси и методическими подходами в определении ЭРОА. Расчёты показали, что в среднем по Беларуси доза облучения за счёт радона составляет 3,6 мЗв/год, при вариации в отдельных областях от 2,0 до 5,3 мЗв/год. Максимальная доза зарегистрирована в одном из зданий г. Минска (86,9 мЗв/год). Таким образом, данные ОА радона в жилищах Беларуси сопоставимы с результатами оценки ОА радона в странах Европы с горной местностью, которая отличается более высоким выходом радона на поверхность.

Анализ двух массивов измерений ОА радона в Беларуси показывает, что средняя объёмная активность радона в Могилевской области в 1,6 раза выше значений, полученных по данным скрининга радона в 1992 году. Значения ЭРОА радона и ЭРК радона, которые определялись в 1992 году не сравнивались, так как были получены с использованием различных методик. Вместе с тем, удельный вес зданий, в которых ЭРОА радона и торона и ЭРК выше норматива 200 Бк/м<sup>3</sup> сопоставимы, а по отношению к нормативу 100 Бк/м<sup>3</sup> в последних исследованиях процент жилых домов значительно выше (3,8% и 12,4 %).

Кроме того, начиная с 2000 года по настоящее время учреждениями санэпидслужбы Могилевской области было обследовано 5000 вновь

построенных, реконструируемых и после капитального ремонта жилых домов. Максимальная ЭРОА радона и торона в зданиях не превышала норматив 100 Бк/м<sup>3</sup>. В целом, существующие технологии в проектировании и строительстве обеспечивают выполнение установленного гигиенического норматива радона в зданиях, что позволяет оптимизировать коллективные и индивидуальные риски от воздействия радона для населения области.

### **3. БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАДОНА**

Радон и ДПР являются источниками внутреннего облучения организма, причем критическим органом, который подвергается наибольшему облучению, являются лёгкие, а точнее эпителиальный слой, выстилающий альвеолярную часть.

Биологическая активность радона обусловлена в первую очередь тем, что все изотопы его являются альфа-излучателями, то есть излучением, имеющим самую высокую опасность. А это означает, что интенсивность облучения легочной ткани может достигать таких интенсивностей, которые способны приводить даже к явлению «лучевой ожог», когда эпителиальные клетки погибают по законам «радиационного апоптоза», замещаясь в последующем соединительной тканью. Другой возможный исход взаимодействия радона с клеткой – это её малигнизация, с последующим развитием онкологического поражения лёгких. Как уже указывалось, предположение, что радон может быть причастен к развитию рака лёгких возникло тогда, когда стала очевидна связь этой патологии с работой на урановых рудниках.

Согласно современной радиобиологической науке, рак лёгкого радиационного генеза – это стохастический, вероятностный процесс, носящий случайный характер. Иными словами, рак лёгкого радонового генеза – это явление, которое может развиваться лишь с неопределенной частотой, которая может быть оценена только через расчет уровня риска, полученного только по теоретическим (математическим) моделям. Мерой оценки уровня риска может выступать только средняя эффективная (как правило, годовая) доза, которая формируется в лёгких и величина которой может быть рассчитана по уровню содержания изотопа во вдыхаемом воздухе.

Хорошо известно, что развитие рака лёгкого, как прочем и других видов опухолей, может провоцироваться различными факторами эндогенной и экзогенной природы. При этом радиогенный рак морфологически, цитогенетически не имеют специфических отличий от раков другого генеза. В этом случае единственной возможностью связать (или не связать) случай

радиогенного рака можно с определенной долей вероятности, опираясь на данные дозиметрии.

Сам по себе факт присутствия радона и его ДПР в среде обитания мало о чем говорит с точки зрения биологической значимости его для конкретного организма. Крайне важно знать о тех уровнях облучения, которые создает изотоп в организме человека и, в частности, в лёгких. Речь идет о расчете поглощенной дозы, которая может сформироваться при внутреннем облучении радоном окружающих тканей выраженном в Грехах (Гр). Основой для внутренней дозиметрии радона и его ДПР служат реальные концентрации в воздухе и знания о его радиотоксикологических особенностях, среди которых следует в первую очередь отметить характер распада. Альфа-излучение радона с позиции радиобиологии обладает наивысшей степенью опасности при ситуации внутреннего облучения, обладая наибольшей биологической эффективностью (ОБЭ) по сравнению с рентгеновским, бета- и гамма-излучениями, у которых ОБЭ в 20 раз ниже. Иными словами, радон по степени биологической активности многократно выше, чем изотопы, испускающие редко ионизирующие излучения. Вот почему даже относительно небольшие количества радона, попавшего в легкие, может приводить к существенному облучению клетки органа и системы. А если при этом иметь в виду длительное, а иногда и постоянное поступление радона в лёгкие, можно говорить о хроническом  $\alpha$ -облучении органа, и постоянно существующем риске реализации такого взаимодействия излучения с тканью, которое может сопровождаться как развитием пневмосклероза, так и канцерогенного процесса.

Для того, чтобы правильно оценить биологическую степень опасности радона, необходимо было изучить причинно-следственную связь между дозой облучения и вероятностью (риском) возникновения рака лёгкого. Этому направлению и посвящено огромное количество исследований, конечной целью которых было установление уровня радона в среде обитания, которое можно было бы отнести к категории «пренебрежимо малого риска», «приемлемого уровня риска» и, наконец, «неприемлемого уровня риска».

Основой для выработки такой градации присутствия радона в окружающей среде послужили в основном материалы эпидемиологического исследования за состоянием здоровья рабочих, занятых на урановых разработках, где одним из ведущих факторов риска развития рака лёгких являются радон и ДПР.

Полученные результаты неоднократно подвергались глубокой экспертной оценке на уровне таких международных организаций как НКРЗ, НКДАР ООН, МАГАТЭ, ВОЗ и др.

Результаты таких оценок биологической активности радона и его ДПР свидетельствуют о том, что несмотря на стохастический (беспороговый)

характер ответной реакции на облучение, существует определенный диапазон доз, который можно отнести к разряду безусловно высокого уровня риска развития онкологии, а какие можно считать пренебрежимо малыми, когда угроза негативного влияния его практически не определяется. Согласно оценкам верхним пределом годовой дозы внутреннего облучения легких радоном и ДПР признается уровень порядка 10 мЗв и выше. При таких уровнях облучения меры защиты обязательны.

Нижний предел годовой дозы, при котором меры защиты могут быть применены, лежит на уровне 3 мЗв. Исходя из этих посылок для оперативного контроля и оценки присутствия Rn и ДПР рекомендуется устанавливать референтные уровни. Так, МКРЗ рекомендует для жилых помещений установить референтные уровни в диапазоне 200-600 Бк/м<sup>3</sup>, а для рабочих (производственных) помещений 500-1500 Бк/м<sup>3</sup>.

В 103-й публикации МКРЗ (2007 год) верхние значения объемной активности Rn + ДПР равны: для жилых помещений – 600 Бк/м<sup>3</sup> и для производственных – 1500 Бк/м<sup>3</sup>. МАГАТЭ в последней редакции документа «Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности (Вена, 2015г.)» придерживается мнения, что для жилых помещений и других строений с высокой заполняемостью лицами из населения, референтный уровень должен составлять 300 Бк/м<sup>3</sup>, а для производственных – 1000 Бк/м<sup>3</sup>. Следует пояснить, что указанные уровни не являются обязательными для установления в отдельных странах и носят сугубо рекомендательный характер. Согласно санитарного законодательства Республики Беларусь референтные уровни применительно к населению: для новых (и реконструируемых) зданий – 100 Бк/м<sup>3</sup>, а уже эксплуатируемых – 200 Бк/м<sup>3</sup>.

Здесь уместно разъяснить, что такое референтный уровень. Согласно глоссарию МАГАТЭ, ситуация существующего облучения, к которой относится и ситуация с облучением Rn + ДПР – это уровень дозы, риска или концентрации активности, выше которого планировать допустимое облучение неприемлемо, а ниже которого следует продолжать оптимизированные меры защиты и безопасности. В документах МАГАТЭ прошлых лет референтный уровень обозначался как «контрольный уровень» (КУ). Рекомендованный референтный уровень Rn + ДПР, равный 300 Бк/м<sup>3</sup>, получен, исходя из допущения, что среднегодовая концентрация изотопа на этом уровне будет соответствовать годовой эффективной дозе в легких, равной 10 мЗв, т.е. верхней границе ещё приемлемого риска. Из этого следует, что с определенной долей достоверности можно считать, что удельная объемная активность радона, равная 30 Бк/м<sup>3</sup>, при

условии постоянного вдыхания воздуха создает в лёгких годовую эффективную дозу в 1 мЗв.

Освещая проблемы биологической и гигиенической значимости присутствия Rn+ ДПР в среде обитания, следует обратить внимание ещё на один аспект проблемы: увеличение риска возникновения рака легкого с одновременным воздействием Rn + ДПР и курения. Эпидемиологическими исследованиями показано, что у курильщиков, при равных условиях, облучением Rn + ДПР риск развития рака лёгкого увеличивается как минимум в 4 раза по сравнению с некурящей когортой.

#### **4. МЕТОДЫ РАДИОМЕТРИИ И ДОЗИМЕТРИИ РАДОНА И ЕГО ДПР**

Выбор аппаратуры для радиометрии (определения) содержания естественных радиоактивных элементов окружающей среды производится с учетом её эффективности, чувствительности и уровня фонового (реального) присутствия радионуклидов. Сегодня фоновая эффективность регистрации составляет: для гамма-детекторов 1-7%, бета-датчиков – близка к 100%, а альфа-детекторов – в пределах 10-40%. Минимально измеренное количество естественных радионуклидов в жидких и твердых пробах составляет для ряда Ra – 226 и Th – 228 порядка 20 Бк/кг,л.

Минимальное измеренное количество радиоактивных газов, в том числе и радона-222 при разовом отборе пробы составляет 3,7 Бк/м<sup>3</sup>.

При использовании интегральных детекторов радона (время экспозиции от нескольких суток до 6 месяцев) минимальное измеряемое содержание его в воздухе составляет 20 Бк/м<sup>3</sup>. Минимально измеряемое количество дочерних продуктов Rn-222 и Rn-220 по альфа-активности на фильтре с применением полупроводниковых детекторов составляет 4 Бк/м<sup>3</sup>.

В целом процедура радиометрии радона представляется достаточно сложной, поскольку основную радиационную значимость представляют продукты распада Rn и Th, иначе необходимо учитывать суммарную энергию альфа-излучения от каждого из продуктов распада (Ra А,В,С; Th А,В,С;). Это так называемая «скрытая энергия». На практике величина «скрытая энергия» выражается в единицах ЭРОА (эквивалентная равновесная объемная активность):

$$\text{ЭРОА Rn} = F \cdot C_{\text{Rn}}, \quad \text{где:}$$

F - коэффициент суммарного сдвига, рассчитываемый отдельно и выражаемый в относительных величинах;

$$C_{\text{Rn}} - \text{концентрация Rn в воздухе, Бк/м}^3.$$

При проведении радонового мониторинга есть общие рекомендации к выбору методик: нижний предел измерения  $R_n$  в атмосферном воздухе не должен быть на уровне от  $2 \text{ Бк/м}^3$ , а для воздуха помещений – от  $10 \text{ Бк/м}^3$ .

Методы радиометрии радона, занимая важное место в системе соответствующего мониторинга, тем не менее не являются определяющими, поскольку несут «обслуживающую функцию», которая может очень важна для оперативной гигиенической оценки «радоновой» ситуации по показателям ЭРАО и сопоставления этой концентрации с принятыми регламентами. Вместе с тем для более корректной оценки гигиенической значимости радона и его ДПР в среде обитания, а следовательно обоснования оптимизации и принятия (или непринятия) защитных мер необходимо идти дальше – оценивать дозы облучения, а также риски. Делать это необходимо в целях получения достоверных, репрезентативных данных по уточнению коэффициентов риска смерти от рака лёгких, этиологически связанного с воздействием радона + ДПР. Проблема не такая простая, как может показаться на первый взгляд.

Применяемая в настоящей методике расчета доз внутреннего облучения от  $R_n$  + ДПР с позиции дозиметрии имеет существенный (иногда неприемлемый) уровень консервативности (неопределенности).

«Типичная» формула для расчета средней годовой эффективной дозы (СГЭД) внутреннего излучения для взрослых жителей населенного пункта выглядит следующим образом:

$$E_{\text{вн}R_n} = 9,0 \cdot 10^{-6} \cdot 8800 \cdot (0,2 \cdot \bar{A}_{\text{эkv.ул}} + 0,8 \cdot \bar{A}_{\text{эkv.здан}}) = 0,01584 \cdot (\bar{A}_{\text{эkv.ул}} + 4 \cdot \bar{A}_{\text{эkv.здан}}) \text{ мЗв/год, где:}$$

-  $9,0 \cdot 10^{-6}$  – дозовый коэффициент для  $R_n$ , выраженный в мЗв/час;

-  $\bar{A}_{\text{эkv.}}$  – соответственно среднее значение ЭРАО радона в воздухе и в здании;

- 8800 – стандартное число часов в году;

- 0,8 и 0,2 – доля времени нахождения людей в помещениях и на улице.

Данная методика не может считаться идеальной для использования в эпидемиологических исследованиях, поскольку в разных странах разработаны свои модели для расчета доз и оценки на этой основе уровня радиационного риска. Так, в США и странах Европейского союза для оценки зависимости «доза-эффект» (ЗДЭ) используется модель BEIR и «Висмут». При этом следует отметить на постсоветском пространстве до сих пор отсутствуют официально утвержденные методики оценки риска для здоровья населения от воздействия радона, включая такую важную часть этой методики, как модель ЗДЭ.

Первая попытка создания такой модели в России была предпринята в 2011 году, а последняя в 2013. В итоге модель ЗДЭ, получившая название «Радон-2013», предлагается в качестве официальной модели расчета ЗДЭ. Причем такая

методика может быть применена как для оценки риска воздействия радона на здоровье как горнорабочих, так и населения. Однако официального утверждения та методика пока не имеет, отчего использование ее является неправомерным для практического применения.

Исходя из сказанного, приведенная выше формула расчета, а главное получаемые с помощью ее данные по дозам облучения  $R_n + ДПР$  не могут быть использованы для принятия каких-либо управленческих решений, связанных с защитой человека от воздействия  $R_n + ДПР$ .

Для того, чтобы изменить ситуацию в республике необходимо провести экспертную оценку существующих методов расчета ЗДЭ и предложить вариант его для утверждения в качестве официального. В противном случае вся экспертная работа по радоновому мониторингу может оказаться в тупике без должного практического выхода.

## **5. ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ $R_n + ДПР$**

Сказанное выше в отношении методики оценки ЗДЭ вовсе не означает, что уже сегодня следует обосновывать и проводить меры по защите населения от чрезмерного присутствия  $R_n + ДПР$  в окружающей среде. Сами по себе данные радиометрии изотопа на территориях и в помещениях, исходя из принципа оптимизации могут и должны быть использованы для целей защиты. Напомним, что один из коренных принципов радиационной защиты и безопасности, принцип оптимизации (ALARA) означает, что уровень облучения человека должен поддерживаться на столь низком уровне, который можно достичь с учётом социальных и экономических факторов.

Опираясь на этот принцип, и принятые в стране референтные уровни содержания радона в помещениях, где могут находиться люди, и на территориях суши, сегодня можно и нужно разворачивать работу по минимизации присутствия этого природного фактора прежде всего в помещениях, где могут находиться люди. При этом ориентирами в такой работе должны стать данные радонового мониторинга, фрагменты которого в Республике Беларусь уже получены. Эту задачу облегчает то обстоятельство, что защитные меры по радону хорошо разработаны и эффективны, а главное не требуют значительных финансовых затрат.

Напомним общие направления действий о минимизации присутствия радона в помещениях и в целом в среде обитания.

Насколько актуальна проблема защиты населения говорят данные (далеко неполные), которые получают в результате проводимого в республике радонового мониторинга.

Меры, направленные на снижение концентрации радона в воздухе помещения, сводятся к следующему:

- тщательная изоляция жилых помещений от почвенного слоя;
- обычная покраска или оклеивание обоями стен;
- улучшение вентиляции жилых помещений и активная вентиляция цокольных этажей, погребов, подвальных помещений;
- использование строительных и отделочных материалов, отвечающих требованиям радиационной безопасности;
- внимание к подземным источникам водоснабжения помещений как возможным «поставщикам» радона;
- радиационно-гигиеническая экспертиза земельных участков, отводимых под строительство новых зданий (особенно жилого предназначения).

Некоторые из этих защитных мер требуют пояснения.

Изоляция помещения от почвенного слоя необходима, поскольку чаще всего повышенная концентрация радона в помещениях образуется в результате почвенной диффузии радона через неплотности перекрытий дома, прилежащих к грунту.

Окраска помещений (лучше масляными красками) может снизить поступление радона, содержащегося в строительных материалах до 80%. Обои, особенно плотные, также являются «защитниками» от  $\alpha$ -излучающих изотопов.

Строителям, особенно возводящих жилье самостоятельно, что во всех без исключения строительных материалах в тех или иных количествах присутствуют естественные радиоактивные вещества, в том числе Rn + ДПР. С целью уменьшить возможность влияния этих источников радиации на население все строительные материалы подлежат сертификации по уровню радиационной безопасности.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные в пособии данные о степени гигиенической значимости радона и его ДПР при пристальном рассмотрении представляют определенный интерес, как с точки зрения науки, так и практических шагов по снижению в среде обитания этого фактора риска. Эпидемиология радона и ДПР неоспорима указывает на то, что радиационный риск от воздействия радона и ДПР может вносить существенный «вклад» в развитие рака лёгкого: этот риск находится на втором месте вслед за табакокурением. Это и предопределяет необходимость развертывания в Республике Беларусь широкомасштабных эпидемиологических исследований с последующей разработкой и реализацией государственной программы.

Важными составными частями такой программы должно стать составление радоновой карты республики и разработка на этой основе стратегии и тактики минимизации важных негативных последствий влияния Rn + ДПР на здоровье населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону/ под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина // Перевод публикации 115 МКРЗ. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013. – 92 с.
2. Коломиец, Л.В. Риск заболевания раком легких с облучением дочерними продуктами распада радона внутри помещений: Доклад группы экспертов международной комиссии по радиологической защите // Перевод публикации 50 МКРЗ. М. : Энергоатомиздат; 1992. – 85 с.
3. Радиологическая защита от облучения радоном/ под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева // Перевод публикации 126 МКРЗ. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. – 92 с.
4. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344с.
5. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения / С.М. Киселев [и др.] // Гигиена и санитария. – 2018, - № 2 (97). С. 17-21.
6. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / И. К. Романович [и др.]; под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. – 432 с.
7. Ильин, Л.А. Радиационная гигиена: учебник / Л.А. Ильин, И.П. Коренков, Б.Я. Наркевич. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 416 с.: ил.
8. Чунихин, Л.А. Карта радоновой опасности территории Республики Беларусь / Л.А.Чунихин, А.Л. Чеховский, Д.Н. Дроздов // Радиационная гигиена. – 2016. - № 4 (9). – С. 25-29.
9. Радон и дочерние продукты его распада в воздухе зданий на территории Беларуси / А.К. Карабанов [и др.] // Природопользование: сб. науч. Трудов / Ин-т природопользования НАН Беларуси; под ред. А.К. Карабанова. – Минск, 2015. – Вып. 27. – С. 49-53.
10. Липницкий, Л.В. Естественные радионуклиды в грунтах на территории Могилёвской области / Л.В. Липницкий, С.В. Нечай, С.В. Бездникова // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. Тр. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь. Науч.-практ. центр гигиены; гл. ред. С.И. Сычик – Минск: РНМБ, 2010. – Вып.: 22 – С. 66-70.

Учебное издание

**Тернов Владимир Иванович**

**РАДОН В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ: ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И  
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 20.06.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать ризография. Гарнитура «Times New Roman».

Печ. л. 1,31. Уч.- изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 194.

Издатель и полиграфическое исполнение –  
государственное учреждение образования «Белорусская медицинская академия  
последипломного образования».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/136 от 08.01.2014.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1275 от 23.05.2016.

220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 3, корп. 3.

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ПОСЛЕДИПЛОМНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»

Кафедра гигиены и медицинской экологии

**В. И. ТЕРНОВ**

**РАДОН В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ:  
ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И  
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

Минск, БелМАПО  
2022

