

РАДОН: ВРАГ, ВРАЧ и ПОМОЩНИК

Курс лекций

Лекция 4. РАДОН В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Содержание

1. ПОСТУПЛЕНИЕ РАДОНА В ЖИЛЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ	2
1.1 Поступление радона с атмосферным воздухом.	3
1.2 Поступление радона из почвы	7
1.3 Поступление радона с водой и энергоносителями	7
1.4 Выделение радона из строительных материалов	10
2. РАДОН В ПОМЕЩЕНИИ	12
3. РАДОНОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	13
4. КОНЦЕНТРАЦИЯ РАДОНА В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ: НАЦИОНАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ.	14
5. РАДОНОЗАЩИЩЕННЫЕ ЖИЛИЩА	15
6. РАДОНОВАЯ ПРОГРАММА РОССИИ	19

Первые же исследования радиологического воздействия радона на население показали, что концентрация радона в воздухе жилых домов, особенно одноэтажных, часто превышает даже уровень предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для работников урановых рудников, где служба безопасности традиционно борется за снижение накопления радиологически опасных концентраций радона. Дело в том, что радий в незначительных количествах содержится во всех типах почв, грунтах, минералах и, следовательно, строительных материалах. Относительно большой период полураспада радона ($T=3,82$ сут) и высокая способность к диффузии позволяют ему распространяться по порам и трещинам в почве, через щели в фундаменте зданий поступать из подвалов в помещения и при отсутствии вентиляции накапливаться там в значительных концентрациях. Сейчас очевидно, что просачивающийся сквозь неплотности в перекрытиях радон представляет собой главный источник радиоактивного облучения населения в закрытых помещениях.

Оказалось, что все население земного шара непрерывно облучается непосредственно в жилищах и служебных помещениях излучением от изотопов радона и продуктов их распада. Вредное действие таких излучений приходится учитывать при оценке дозовой нагрузки на население. Дело дошло до того, что во многих странах цены на жилье формируются с учетом величины концентрации радона в помещениях. Поэтому мониторинг радона в местах обитания человека и разработка мер по снижению поступления в них радона представляет собой актуальную проблему.

Как уже упоминалось в предыдущих лекциях, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th - три природных актиноида, сохранившиеся до наших дней в значительных количествах, медленно трансформируются в стабильные изотопы свинца. При этом цепочки распада включают целый ряд нестабильных нуклидов. За единственным исключением все они являются нелетучими элементами. Этим исключением является радон, благородный газ, способный к активному перемещению в окружающей среде как путем диффузии, так и конвекции после выделения из матрицы твердого тела. Он, следовательно, может поступать в жилище из почвы, с водой из артезианских скважин, с природным газом или из других источников. Изотопы радона, таким образом, являются основными субстанциями, ответственными за транспорт радиоактивности в жилые помещения и за загрязнение вдыхаемого людьми воздуха радиоактивными элементами. За распадом атома радона следует распад короткоживущих дочерних продуктов. Экспозиция легких в радоне и продуктах его распада приводит к дозам, составляющим 40% от среднего эффективного дозового эквивалента в 2,4 мЗв/год, получаемого населением от всех

радиационных источников. Другие естественные источники радиации включают космические лучи (12%), гамма-излучение земли (15%) и радионуклиды в организме человека (15%).

С радиологической точки зрения опасен не сам радон, а набор генетически связанных радионуклидов, им порождаемый (так называемый «активный налет»). Поэтому при исследовании дозовой обстановке в жилище основное внимание следует уделять оценке состояния равновесия между радоном и продуктами его распада.

1. ПОСТУПЛЕНИЕ РАДОНА В ЖИЛЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Интенсивности поступления в жилые дома радона от различных источников иллюстрирует **Рис.1, 2** и **Табл.1**. Пути поступления радона в сельские дома схематически представлены на **Рис. 3 и 4**, а в городскую квартиру – на **Рис. 5**.

Радон попадает в атмосферу помещений различными путями: а) из наружного воздуха б) из грунтового основания здания; в) выделяется из строительных материалов или ограждающих конструкций, изготовленных с применением горных пород; г) воды из системы внутреннего водоснабжения здания; д) сжигаемого в здании топлива (бытовой газ, каменный уголь, торф, горючие сланцы).

Мощность излучения различных источников радона



Рис.1. Интенсивность поступления радона в жилые помещения от различных источников

Радон постоянно образуется в глубинах Земли, накапливается в горных породах, а затем постепенно по трещинам перемещается к поверхности Земли. Радон проникает в дом из грунта - сквозь трещины в фундаменте и через пол - и накапливается в основном на нижних этажах жилых и производственных построек. Но известны случаи, когда жилые дома и производственные корпуса возводят непосредственно на старых отвалах горнодобывающих предприятий, где радиоактивные элементы присутствуют в

значительных количествах. Если в строительстве производстве применяют такие материалы как гранит, пемза, глинозем, фосфогипс, красный кирпич, кальциево-силикатный шлак, источником радоновой радиации становится материал стен. Природный газ, используемый в газовых плитах (особенно сжиженный пропан в баллонах) - тоже потенциальный источник радона. А если воду для бытовых нужд выкачивают из глубоко залегающих водяных пластов, насыщенных радоном, то высокая концентрация радона в воздухе достигается даже при стирке белья.

Табл. 1. Мощности излучения различных источников радона

Источник радона	Мощность излучения, Бк/сут
Природный газ	3000
Вода	4000
Наружный воздух	10000
Стройматериалы и грунт под зданием	60000

Содержание радона в воздухе помещений зависит от его содержания в почве и подстилающих породах, их эманулирующей способности, климатических условий, конструкции здания и системы его вентиляции (например, кратностью воздухообмена в помещении). Концентрации и потоки радона крайне неравномерны - они изменяются в очень широких пределах для различных регионов и видов зданий. По оценкам Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) индивидуальная суммарная доза облучения варьирует от 0,5 до 100 от модального значения дозы. Она превышает не только предел дозы для ограниченной



части населения от искусственных ИИИ (1 мЗв/год), но и предел дозы для профессионалов (20 мЗв/год).

Рис.2. Интенсивность поступления радона

1.1 Поступление радона с атмосферным воздухом.

Радон может попасть в жилое помещение вместе с атмосферным воздухом, окружающим здание. Радон проникает при проветривании помещения (например, при открытых окнах), при работе притяжной системы вентиляции, засасывающий наружный воздух и т.п.

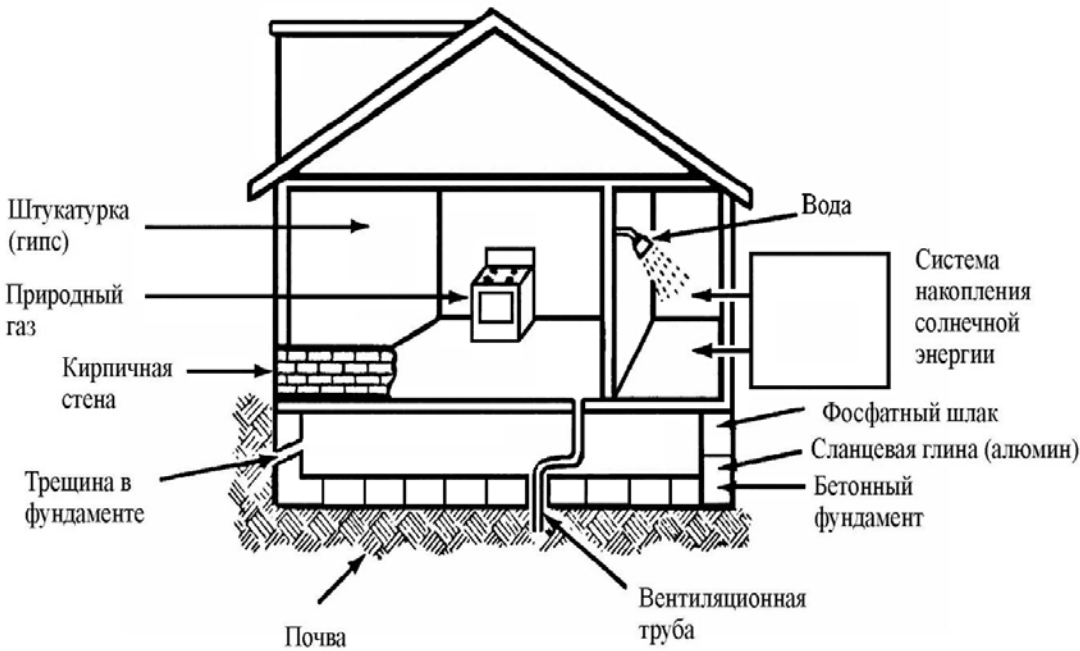


Рис.3. Пути поступления радона внутрь дома

Интенсивность поступления радона зависит от его содержания в атмосфере района проживания, особенностях местного климата, менталитета обитателей, типа и скорости вентиляции в жилом помещении, и других факторов.

Концентрация радона в атмосферном воздухе вне здания зависит от содержания его (или его материнского изотопа – радия) в местных почвах и грунтах, в водах природных водоемов (реки, озера, пруды), от способности радона к миграции по районам проживания, от периода полураспада изотопа радона и от газопроницаемости веществ, из которых он выделяется.

Рис.4. Радон в сельском доме

В проблеме радона в жилище основным изотопом является ^{222}Rn . Его время жизни ($T = 3,82$ дня) - достаточно короткое, чтобы ограничить его транспорт путем диффузии небольшими

Курение в доме

Нагрев Вентиляция Кондиционирование воздуха

Каменный фундамент

Каменный фундамент

Трещины

Пол и возраст

Радий в почве источник радона
Радон, диффундирующий из почвы в дом

Радон в сельском домике (К оценке риска рака легких)

Экспозиция	Отклик
Обнаружение геологических горячих пятен	Обследование населения (не шахтеров)
Улучшение измерительных методов	Эпидемиология населения
Понимание взаимосвязи между флюктуациями радона в окружающей среде и в доме	Доза/эффект
Механизм поступления радона	Генетическая восприимчивость
Поведение и судьба радона, продуктов распада и комнатных аэрозолей	Исследование: животное, молекула, клетка
	Дозиметрия
	Влияние других загрязнителей, процессов приготовления пищи и курения

расстояниями, но и достаточно большое, чтобы обеспечить как возможность выделения части радона из почвы, так и возможность миграции (по конвективному механизму) на несколько сот метров в воздухе (обычно полагают, что почвенный радон-222 за время своей жизни способен подняться на высоту до 1000 м, хотя его концентрация с ростом высоты уменьшается по экспоненциальной зависимости) или на несколько метров по стоячей воде. Период полураспада изотопа радона, генерируемого в ряду ^{235}U , - ^{219}Rn (актинона) составляет всего 3,96 сек.

Радон в разных помещениях



Расстояние, на которое способен переместиться этот изотоп за время его жизни - несколько миллиметров.

Рис.5. Радон в городской квартире

Поэтому ^{219}Rn практически не достигает жилых помещений. В ряду ^{232}Th -газообразным является ^{220}Rn (торон, $T=55,6$ сек). Из-за малого периода полураспада только малая

доля торона может покинуть пористую почву или выделиться из грунтовых вод, где его миграция ограничивается несколькими сантиметрами. Считается, что почвенный торон способен подниматься на высоту до 10 метров. За исключением регионов, обогащенных торием, концентрации ^{219}Rn и ^{220}Rn в атмосфере пренебрежимо малы по сравнению с концентрацией ^{222}Rn . Однако активный налет от торона с радиобиологической точки зрения намного опаснее продуктов распада радона (он к тому же более долгоживуч чем ^{222}Rn).

Распределение радия – материнского изотопа – в грунтах крайне неравномерно. Обычно концентрация радия не слишком велика (чем больше глины – тем больше радия), но иногда она достигает аномально высокие значения (в тысячи раз превышающее фоновый уровень). Такие аномалии в распределении радия получили название «горячие геологические пятна». В подмосковье они обычно связаны с гравийными карьерами. Варьируется не только концентрация элемента радия, но и его изотопный состав.

Как уже упоминалось, уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка. Так, согласно исследованиям, проведенным во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США, примерно 95% населения этих стран живет в местах, где мощность дозы облучения в среднем составляет 0,3 до 0,6 миллизиверта (тысячных зиверта) в год. Но некоторые группы населения получают значительно большие дозы облучения: около 3% получает в среднем 1 мЗв/год, а около 1,5% - более 1,4 мЗв/год. Есть однако, такие места, где уровни земной радиации намного выше.

Неподалеку от города Посус-ди-Калдас в Бразилии, расположенного в 200 м к северу от Сан-Паулу, есть небольшая возвышенность. Как оказалось, здесь уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает 250 мЗв/год. Лишь чуть меньшие уровни радиации были зарегистрированы на морском курорте, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности. Гуарапари - небольшой город с населением 12000 человек - каждое лето становится местом отдыха примерно 30000 курортников. На отдельных участках его пляжей зарегистрирован уровень радиации 175 мЗв/год. Радиация на улицах города оказалась намного ниже - от 8 до 15 мЗв/год, - но все же значительно превышала средний уровень. Сходная ситуация наблюдается в рыбацкой деревушке Меаипе, расположенной в 50 км к югу от Гуарапари. Оба населенных пункта стоят на песках, богатых торием. На юго-западе Индии, 70000 человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием. Исследования, охватившие 8513 человек из числа проживающих на этой территории, показали, что данная группа лиц получает 3,8 мЗв/год на человека. Из них 500

человек получают свыше 8,7 мЗв/год. 60 получают годовую дозу, превышающую 17 мЗв, что в 50 раз больше средней годовой дозы внешнего облучения от земных источников радиации. Эти территории в Бразилии и Индии являются наиболее хорошо изученными "горячими точками" нашей планеты. В Иране в районе городка Рам-сер, где бьют ключи, богатые радием, были зарегистрированы уровни радиации 400 мЗв/год. Известны и другие места на земном шаре с высоким уровнем радиации, например во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре.

Непосредственно связанные с земными недрами источники поступления радона представляют две группы:

- 1) источниками являются сами горные породы, и радон поступает в дома за счет высокого геохимического фона радона в породах (например, сланцы, граниты, сиениты). Этот повышенный местный геохимический фон (например, при концентрации радона в грунтах более 50-100 Бк/л) может создать значительные по площади радононосные участки, в пределах которых концентрация радона практически повсеместно может превышать ПДК в десятки раз (до 1000 Бк/м³);
- 2) источником являются радононосные тектонические зоны, которые характеризуются резко аномальными (во много раз превышающими местный геохимический фон) концентрациями радона, четко выраженными линейными размерами (как правило, ширина таких зон составляет десятки-первые сотни метров при протяженности во многие сотни и тысячи метров). Концентрация радона в атмосфере домов, располагающихся над такими зонами, может достигать ураганно-высоких значений до десятков тысяч Бк/м³.

Выделение (эксхалиция) радона из почвы осуществляется двумя механизмами: за счет отдачи и за счет диффузии. Поступление радона в поры почвы за счет эффекта отдачи определяется энергией распада материнского нуклида, величиной площади внутренней поверхности пор, развитостью рельефа пор и влагонасыщенностью пор почвы. Эффект отдачи не зависит от температуры. Эксхалиция за счет диффузии осуществляется путем миграции радона по веществу почвы (обычно вкладом от этого процесса можно пренебречь) и диффузией по порам.

Уголь, подобно большинству других природных материалов, содержит ничтожные количества первичных радионуклидов. Последние, извлеченные вместе с углем из недр земли, после сжигания угля попадают в окружающую среду, где могут служить источником облучения людей. Хотя концентрация радионуклидов в разных угольных пластах различается в сотни раз, в основном уголь содержит меньше радионуклидов, чем земная кора в среднем. Но при сжигании угля большая часть его минеральных компонентов спекается в шлак или золу, куда в основном и попадают радиоактивные вещества. Большая часть золы и шлаки остаются на дне топки электросиловой станции. Однако более легкая зольная пыль уносится тягой в трубу электростанции. Количество этой пыли зависит от отношения к проблемам загрязнения окружающей среды и от средств, вкладываемых в сооружение очистных устройств.

Облака, извергаемые трубами тепловых электростанций, приводят к дополнительному облучению людей, а, оседая на землю, частички могут вновь вернуться в воздух в составе пыли. Согласно текущим оценкам, производство каждого гигаватт-года электроэнергии обходится человечеству в 2 чел.-Зв ожидаемой коллективной эффективной облучения. Например, в 2000 году расчетная коллективная эффективная доза от всех работающих на угле электростанций во всем мире составила более 2000 чел.-Зв.

На приготовление пищи и отопление жилых домов расходуется меньше угля, но зато больше зольной пыли летит в воздух в пересчете на единицу топлива. Таким образом, из печек и каминов всего мира вылетает в атмосферу зольной пыли, возможно, не меньше, чем из труб электростанций. Кроме того, в отличие от большинства электростанций жилые дома имеют относительно невысокие трубы и расположены обычно в центре населенных пунктов, поэтому гораздо большая часть загрязнений попадает непосредственно на людей. До последнего времени на это обстоятельство почти не обращали внимания, но по весьма предварительной оценке из-за сжигания угля в домашних условиях для приготовления пищи и обогрева жилищ во всем мире ожидаемая коллективная эффективная доза облучения населения Земли возросла на 100000 чел.-Зв.

Еще один источник облучения населения – это термальные водоемы. Некоторые страны эксплуатируют подземные резервуары пара и горячей воды для производства электроэнергии и отопления домов. Один такой источник вращает турбины электростанции в Лардерелло в Италии с начала нашего века. Измерения эмиссии радона на этой и еще на двух, значительно более мелких, электростанциях в Италии показали, что на каждый гигаваатт-год вырабатываемой ими электроэнергии приходится коллективная эффективная доза 6 чел.-Зв, то есть в три раза больше аналогичной дозы облучения от электростанций, работающих на угле. Однако, поскольку в настоящее время суммарная мощность энергетических установок, работающих на геотермальных источниках, составляет всего 0,1% мировой мощности, геотермальная энергетика вносит ничтожный вклад в радиационное облучение населения. Но этот вклад может стать весьма весомым, поскольку запасы этого вида энергетических ресурсов очень велики.

Во многих странах мира ведется и добыча фосфатов, которые используются, главным образом, для производства удобрений. Большинство разрабатываемых в настоящее время фосфатных месторождений содержит уран, присутствующий там в довольно высокой концентрации. В процессе добычи и переработки руды выделяется радон, да и сами удобрения радиоактивны, и содержащиеся в них радиоактивные изотопы проникают из почвы в пищевые культуры. Радиоактивное загрязнение в этом случае бывает обычно незначительным, но возрастает, если удобрения вносят в землю в жидком виде или если содержащиеся фосфаты вещества скормливают скоту. Такие вещества широко используются в качестве кормовых добавок, что может привести к значительному повышению содержания радиоактивности в молоке. Все эти аспекты применения фосфатов дают за год коллективную эффективную дозу, равную примерно 6000 чел.-Зв. Кроме того, фосфаты используют и для производства строительных материалов. В результате, коллективная эффективная доза из-за использования в строительстве фосфогипса, полученного только в 1997 году, составила около 300 000 чел.-Зв.

Напомним, что средние годовые эффективные дозы облучения населения Земли составляют немногим более 2,4 мЗв. За счет освобождаемых при получении электроэнергии и производстве удобрений природных радионуклидов происходит обогащение биосферы радиоактивными веществами и дополнительное облучение человека в дозах, которые, если их отнести к общей численности населения Земли, составят 0,001 мкЗв в год на 1 человека, что не превышает 1 % естественного облучения от инкорпорированных природных радионуклидов. Уровни дополнительного облучения населения крупных промышленных центров, вблизи электроцентралей и заводов по переработке руд могут быть существенно выше, но все же соизмеримы с природным радиационным фоном.

В некоторых регионах заметное количество радона поступает в комнаты через окна, двери и кондиционеры. Особенно, если система вентиляции в здании создает в помещении некоторое разрежение по сравнению с окружающей средой.

Источником радона может служить окружающая дом почва, но радон может приноситься ветром из других регионов (с гор или "горячих пятен"). Поступление радона связано с менталитетом населения (например, с привычкой спать с открытыми окнами или пользоваться кондиционерами). В неподвижном воздухе тяжелый радон обычно прижат к почве и его концентрация наибольшая на первых этажах. За время миграции из почвы к верхним этажам радон успевает распасться. Концентрация радона в атмосфере существенно зависит от температуры. Поскольку температура в течение суток изменяется периодически, то и концентрация радона снаружи здания также циклически изменяется. Подобные колебания концентрации радона происходят не только в атмосфере, но и почвах, особенно на малых глубинах. На колебания концентрации радона в атмосфере существенное влияние оказывают температура (среднее значение и амплитуда колебания, разность температур почвы и атмосферы), атмосферное давление, тип (снег, дождь, туман) и интенсивность осадков.

С точки зрения поступления радона в жилье через окна и вентиляционные каналы важное значение имеет направление и сила ветра, а также геометрия здания и застройки, задающие локальные потоки радона вокруг жилья. При этом следует учитывать эффект Бернулли - при течении некоторого флюида в нем создается разрежение, вовлекающее в поток

другую субстанцию. Ветер может извлекать из почвы дополнительное количество радона и переносить его к окнам. Поступление радона из окружающей среды в помещение определяется величиной разности давлений внутри помещения и в атмосфере, которая зависит от типа и режима работы системы вентиляции, конвективной диффузии, возникающей из-за разности температур, и эффекта Бернулли при обдувании дома ветром.

1.2 Поступление радона из почвы

Рассмотрение процессов поступления радона в жилое помещение обычно начинают с анализа его эксхалации (выделения) из грунта и почвы под жильем. В первую очередь определяют содержание урана, тория и радия в почве. С этой целью проводят как качественный (рассчитываются вклады разных изотопов), так и количественный анализ источников радона и осуществляют их пространственную локализацию. Особенно опасными являются так называемые горячие пятна - небольшие скопления радия в геологических структурах жилой застройки. Обнаружить, локализовать и оконтурить их достаточно трудно, но необходимо для избежания будущих неприятностей.

Основным источником поступления радона в воздух помещений является геологическое пространство под зданием. Радон легко перемещается по проницаемым зонам земной коры. Здание с газопроницаемым полом, построенное на земной поверхности, может увеличивать поток радона, выходящего из земли, до 10 раз за счет перепада давления воздуха в помещениях здания и атмосфере. Этот перепад оценивается в среднем величиной около 5 Па и обусловлен двумя причинами: ветровой нагрузкой на здание (разрежение, возникающее на границе газовой струи) и перепадом температур между комнатным воздухом и атмосферой (эффект дымовой трубы).

В жилье радон может поступать четырьмя путями: через разломы в фундаменте, с системой жизнеобеспечения (вода, газ, уголь), из строительных материалов и через окна. Радон из почвы просачивается сквозь фундамент и накапливается в подвальных помещениях или непосредственно под полом. Известны случаи, когда в производственных подвальных помещениях, снабженных вытяжной вентиляцией, за счет которой происходит подсос радона из почвы, объемная концентрация радона достигала $8000-10000 \text{ Бк/м}^3$, что превышало нормы в 40-50 раз. Существенное значение имеет наличие трещин в фундаменте, особенно если они находятся в непосредственном соседстве с разломами в геологических структурах. Проветривание подвалов или наличие бокового сноса вдоль пола существенно понижает поток радона из почвы в жилье. Непосредственно в жилье радон поступает через отверстия в полу и в межэтажных перекрытиях. При расчете поступления радона необходимо оценить число и размеры дефектов в строительных конструкциях, наличие и тип связи между разрывами в грунте и в фундаменте, разность давлений между наружным и внутренним воздухом.

1.3 Поступление радона с водой и энергоносителями

Дополнительным источником радона может быть водопроводная вода. Высокая подвижность благородного газа приводит к существенному повышению концентрации радона в воде, по сравнению со слабо растворимыми в воде материнскими нуклидами радона. Основными источниками радона являются фосфатные удобрения, природный газ, тепловые электростанции на угле и выделения из урановых шахт и комбинатов по переработке урана.

Радон может поступать с водопроводной водой, особенно в сельской местности, где артезианские скважины или колодцы пробиты в содержащих радий породах.

В зависимости от геологических и гидрогеологических условий в различных районах земли создаются условия для формирования широкого спектра фоновых концентрации радона. В мире содержание радона в воде колеблется от 100 рКи до 1000000 рКи на литр (Ки - кюри, радиоактивность 1 грамма радия; р - пико, приставка 10^{-12}). Наряду с районами с пониженными фоновыми концентрациями радона в водах имеются территории с весьма высокими, "ураганными" содержаниями радона. Такие территории обнаружены в Бразилии, Индии, Канаде. В Иране известны родники с высокими концентрациями радона. Повышенными фоновыми концентрациями радона характеризуются скандинавские страны. Многочисленные

зоны с высокой концентрацией радона в водах выявлены в США. В России выявлены зоны с концентрацией радона в воде в 300-400 Бк/л.

В США уровень содержания радона в грунтовых водах колеблется от 10 до 100 Бк/л, в отдельных районах доходя до сотен и даже тысяч Бк/л. По данным на 1974 г. в подземных водах России концентрация ^{222}Rn составила до $200 \cdot 10^{-12}$ кюри/л (2 эмана); в водах источников и ручьев - до $3 \cdot 10000 \cdot 10^{-12}$ кюри/л; в речных водах - $0,2-0,3 \cdot 10^{-12}$ кюри/л.

Замечание. В настоящее время общепринятым является выражение концентрации радионуклида в Бк/л. Ранее (а иногда и сейчас) для этой цели применялись специальные единицы – эман и махе. **Эман** – внесистемная единица концентрации радиоактивных веществ (например, в минеральных водах), обозначается Е. 1 Эман равен концентрации радиоактивного вещества, имеющего активность 10^{-10} Ки на 1 л раствора. **Махе** – устаревшая внесистемная единица концентрации радиоактивных веществ. Иногда применяется в дозиметрии минеральных вод, лечении грязей и т.п. Названа по имени австрийского физика Г.Махе (Н.Махе). 1 махе = 3,64 эман = $3,64 \cdot 10^{-10}$ Ки/л.

Табл.2. Радон в грунтовых водах разных стран

Регион	Бк/м ³
Ханкок (США)	1400
Сев. Каролина	100
Хельсинки (Финляндия)	1200
Зальцбург (Австрия)	1,5

Опасность высоких концентраций радона в воде вызвана следующими причинами:

1) непосредственное потребление воды с повышенной концентрацией радона и продуктами его распада; 2) переход в воздух значительной части радона при использовании воды в бытовых целях; 3) переход всего радона в воздух закрытых помещений при использовании воды в банях, душе и.п.

В обычно используемой воде его концентрация чрезвычайно мала, но в глубоких артезианских скважинах создаются условия для накопления чрезвычайно больших количеств радона - до 100 МБк/м³. По оценкам НКДАР ООН, в настоящее время 10% населения Земли пьют воду с содержанием активности по радону 0,1 МБк/м³ и 1% - 1 МБк/м³. Иногда суммарная доза радиации при использовании воды с повышенной концентрацией радона может быть очень высокой. Так, по данным шведских ученых, более 60000 шведов ежедневно потребляют воду с содержанием радона выше 1000 Бк/л, что приводит к 50 случаям заболеваний раком легких в год.

Растворенный в воде радон поступает через пищеварительный тракт в организм человек, но в этом количестве радон неопасен, потому что из вытекающей из крана воды он практически весь и сразу же переходит в воздух. Поэтому потребителям водопроводной воды централизованного водоснабжения не следует волноваться по поводу наличия в ней радона. Сельским жителям рекомендуется кипячение воды, т.к. при кипячении воды или приготовлении горячих блюд радон в значительной степени улетучивается. Но даже при поступлении с некипяченой водой радон очень быстро выводится из организма.

Растворенный в воде радон действует двояко. С одной стороны, он вместе с водой попадает в пищеварительную систему, а с другой стороны, люди вдыхают выделяемый водой радон при ее использовании. Дело в том, что в тот момент, когда вода вытекает из крана, радон выделяется из нее, в результате чего концентрация радона в кухне или ванной комнате может в 30-40 раз превышать его уровень в других помещениях. Второй (ингаляционный) способ воздействия радона считается более опасным для здоровья.

Мгновенный риск для здоровья от потребления воды, содержащей невысокую активность радона, невелик. Основное воздействие радона из воды на человека связано с его ингаляционным поступлением. Установлено, что коэффициент перехода радона из воды в воздух помещения $(0.5-1.0) \cdot 10^{-4}$. Если количество радона в воде соответствует нормативу 60 Бк/л это дает дополнительное количество радона в воздух помещения равное 6 Бк/м³, что меньше фонового содержания радона в жилых помещениях. Только при значительном превышении норматива по радону в воде, его вклад в дозу облучения может быть сравнимым с вкладом радона, который поступает из почвы и / или строительных материалов.

При высоком содержании радона в воде он может накапливаться в ванной комнате и на кухне в больших количествах. Так, при обследовании ряда домов в Финляндии, было выяснено, что концентрация радона в ванной комнате в три раза выше, чем на кухне и в 40 раз выше, чем в жилой. Всего за 22 минуты пользования душем концентрация радона достигает величины, которая в 55 раз превышает предельно допустимую концентрацию. Исследования, проведенные в Канаде, показали, что все семь минут, в течение которого был включен теплый душ, концентрация радона в ванной комнате быстро возрастала (примерно в 37 раз) и в течение последующих 1,5 часов возвращалась к норме.

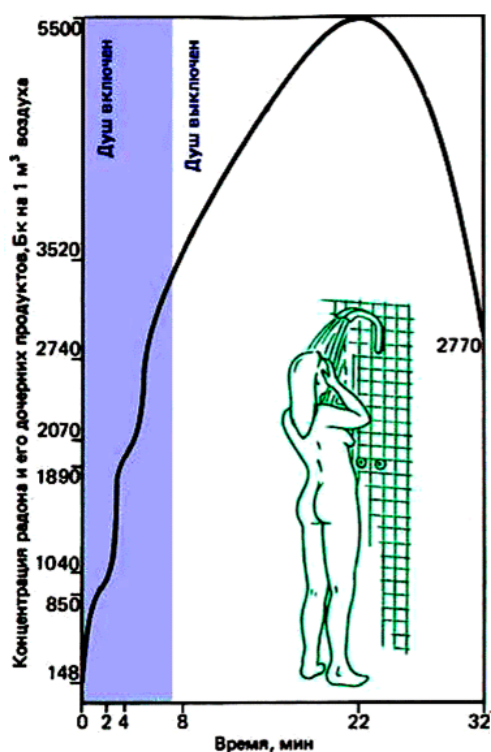


Рис.6. Радон при пользовании душем

В Швеции возникла острая проблема, связанная с проведением кампании за экономию энергии и тщательной герметизацией зданий: с 50-х до 70-х годов скорость вентилирования в домах уменьшилась более чем вдвое, а концентрация радона внутри домов увеличилась более чем в три раза! (Рис.7). Поэтому Санитарные Правила рекомендуют такие профилактические процедуры как качественное проветривание помещений, особенно кухни и душевых, установление кухонной вытяжки с отведением воздуха в вентиляцию. Другая профилактическая мера предлагает бросить курить в помещениях. Табачный дым усиливает отрицательное действие радона. Поэтому у курильщиков риск заболевания раком легких в 10-20 раз выше, чем у обычных людей.

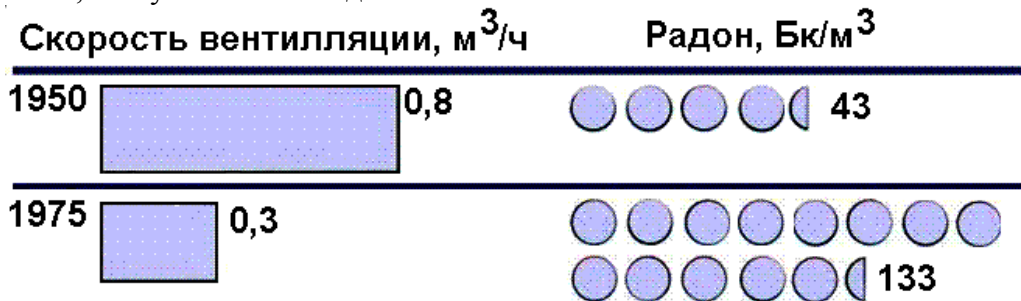


Рис. 7. Связь между экономией энергии на вентиляцию и концентрацией радона в помещении

Из-за разнообразия условий радононакопления в водах в разных странах приняты различные величины предельно допустимых концентраций радона, которые ограничивают использование вод с высоким содержанием радона. Так, в Финляндии предельно допустимые концентрации установлены на уровне 300 Бк/л, в Швеции - 300 Бк/л, в Ирландии - 200 Бк/л. Агентство по охране окружающей среды США (USEPA) рекомендует в качестве рекомендованной предельную величину содержания радона в воде на уровне 300 пКи/л (11.1 Бк/л), что однако не нашло пока отражения в американском национальном стандарте качества воды (этот параметр не нормируется). В недавно вышедших российских Нормах Радиационной Безопасности (НРБ-99) предельный уровень содержания радона в воде, при котором уже требуется вмешательство, установлен на уровне 60 Бк/кг при отсутствии в воде других радиоактивных веществ (на Украине – 100 Бк/л). До этого «Санитарные правила и нормы для централизованного водоснабжения» разрешали пользоваться водой с содержанием радона до 120 Бк/л.

Обнаружить радон в питьевой воде довольно непросто, для этого нужна специальная аппаратура. Но если в используемой воде содержится много радона, то есть несколько простых способов снижения радона в используемой воде. Один из наиболее доступных и эффективных

промышленных методов - аэрация - используется в процессе водоподготовки на городских очистных сооружениях, когда пузырьки воздуха пропускаются через толщу воды, насыщаются, в частности, радоном и возвращаются опять в воздух (эта процедура обычно снижает концентрацию радона в воде на порядок). Если же питьевая вода добывается из индивидуальных скважин, то заметно снизить концентрацию можно при использовании фильтров из активированного угля. Как известно, активированный уголь обладает огромной адсорбирующей способностью (количество угля размером с горошину имеет активную поверхность равную половине футбольного поля). Такие фильтры удаляют до 99.7% радона. Правда со временем этот показатель падает до 79%. Использование же перед угольным фильтром умягчителя воды на ионообменных смолах позволяет повысить последний показатель до 85%. Но самый простой метод - кипячение! Обычно люди потребляют большую часть воды в виде горячих напитков и блюд (супы, чай, кофе). При кипячении воды или приготовлении пищи радон в значительной степени улетучивается.

Замечание. Обычно скважины не бурятся на глубину тех геологических горизонтов, которые содержат большое количество радия. Тем не менее радон может наблюдаться в заметных количествах даже в неглубоких скважинах и колодцах, что говорит о необходимости проведения исследований. При повышенных концентрациях радона, системы очистки могут оказаться в этом случае относительно дорогими. Для каждой системы водоснабжения, в которой уровень радона превышает гигиенические нормативы, должны быть определены лучшие профилактические меры для ее ситуации. Корректирующие методы включают - комбинированное применение воды из более чем одного источника (скважин), использование нового источника воды, или извлечение радона обработкой воды - аэрация.

В природный газ радон проникает под землей, поэтому при отсутствии достаточной вентиляции в кухне при использовании газовой плиты концентрация его в воздухе быстро нарастает. При наличии вытяжки, которая сообщается с наружным воздухом, пользование газом практически не влияет на содержание радона в помещении. С природным газом радон поступает только в тех случаях, когда газ перед подачей потребителю не выдерживался в искусственных хранилищах (т.е. вне контакта с геологическими структурами) в течение месяца (Одного месяца вполне достаточно для распада любых изотопов радона). Так как каменный уголь часто содержит большое количество радия, то печи и камины могут быть эффективными источниками радона, особенно при возможности задымления помещения.

1.4 Выделение радона из строительных материалов

Большинство строительных материалов (за исключением древесины, стекла и стали) содержат значительные количества урана и тория и, следовательно, радия - материнского изотопа радона.

Известно, что в некоторых регионах радон в жилье поступает не столько из почвы, сколько из строительных материалов. Так, например, обстоит дело в Москве. Почвы Москвы относительно бедны радием, старые дома (Москва белокаменная) построена из малоактивных известняков. Однако стены домов, построенных из железобетона или облицованных гранитом, иногда содержат довольно много радия. Особенно это относится к гранитам, привезенным с Алтая. Пески и гравий некоторых карьеров содержат адсорбированный радий (фильтрация природных обогащенных радием вод). Например, гранитный щебень из подмосковных карьеров характеризуются повышенной радиоактивностью (200 - 700 Бк/кг). Соответственно и бетон, приготовленный из таких компонентов, содержит радий.

Уже само по себе наличие радионуклидов в стенах и других конструкционных материалах здания достаточно неприятно, поскольку гамма-излучение продуктов распада ториевого и уранового рядов достигает обывателя. Кроме того, из материнских нуклидов эманации генерируется сравнительно подвижный компонент – газ радон. Выход радона из строительного материала в атмосферу жилья зависит от эманационной способности стен, которая определяется пористостью, температурой, перепадом давлений. С точки зрения поступления радона в жилые помещения пористые бетоны весьма опасны, особенно изготовленные из шлаков угольных электростанций, эманационная способность которых приближается к 100%. В этом смысле граниты менее опасны: хотя радия в них и больше, но эманационная способность составляет доли процента. Поэтому радон из гранитов в жилое

помещение практически не поступает. Наличие штукатурки обычно понижает поступление радона из стен. Исключение составляет штукатурка японских традиционных домов, отличающаяся повышенным содержанием радия-224. Во многих регионах Японии поток радона-220 (торона) весьма высок и достаточно опасен. В Подмоскowie и ленинградской области радоноопасными являются глины, используемые для штукатурки стен срубов или кладки печей. Например, глина карьера “Красный Бор” имеет радиоактивность - 150-300 Бк/кг. Поступление радона существенно подавляет покрытие стен обоями (особенно - специально разработанными для блокировки радона), красками и лаками на эпоксидной основе. Хорошие результаты дает применение композитных покрытий.

Отметим, что самые распространенные строительные материалы – дерево, кирпич и бетон – выделяют относительно немного радона. Гораздо большей радиоактивностью обладают гранит и пемза, а еще более опасны в этом отношении глиноземы, фосфогипс и кальций-силикатный шлак. В воздух помещений радон поступает также из строительных конструкций. Данные по удельной радиоактивности строительных материалов ряда стран представлены ниже.

Табл.3. Радиоактивность некоторых строительных материалов.

Строительные материалы	Удельная радиоактивность, Вк/кг (за счет радия и тория)
Дерево (Финляндия)	1,1
Природный гипс (Англия)	29
Песок и гравий (ФРГ)	34
Портланд-цемент (ФРГ)	45
Кирпич (ФРГ)	126
Гранит (Англия)	170
Зольная пыль (ФРГ)	341
Глинозем (Швеция)	496-1367
Фосфогипс (ФРГ)	574
Кальций-силикатный шлак (США)	2140
Отходы урановых предприятий (США)	4625

Наиболее в этом плане неблагоприятны: кальций-силикатный шлак, фосфогипс, глинозем, гранит, пемза, красный кирпич, меньше всего радия и тория содержится в дереве, природном гипсе, песке и гравии. Высокое содержание радона наблюдается в зданиях, если они стоят на грунте с большим содержанием радия или если при его постройке использовались материалы с повышенной радиоактивностью, причем возрастание концентрации радона в зданиях объясняется, с одной стороны, герметизацией помещений с целью утепления, поскольку при этом затрудняется выход радиоактивного газа из помещения, с другой, - толщиной и целостностью межэтажных перекрытий, независимо от материала, т.к. даже деревянные прохудившиеся перекрытия не будучи сами источниками радона, способствуют проникновению радона в помещения из грунта. В последние годы во многих странах мира все чаще регистрируются высокие концентрации радона во внутренних помещениях домов, в 100-5000 раз превышающие таковую в наружном воздухе. Концентрация радона в верхних этажах многоэтажных домов, как правило, ниже, чем на первом этаже. При этом содержание радона в деревянных домах нередко оказывается выше, чем в кирпичных, хотя дерево выделяет ничтожное количество радона по сравнению с другими материалами. Это объясняется тем, что

деревянные дома, как правило, имеют меньшую этажность, чем кирпичные, и, следовательно, помещения находятся ближе к земле - основному источнику радона.

2. РАДОН В ПОМЕЩЕНИИ

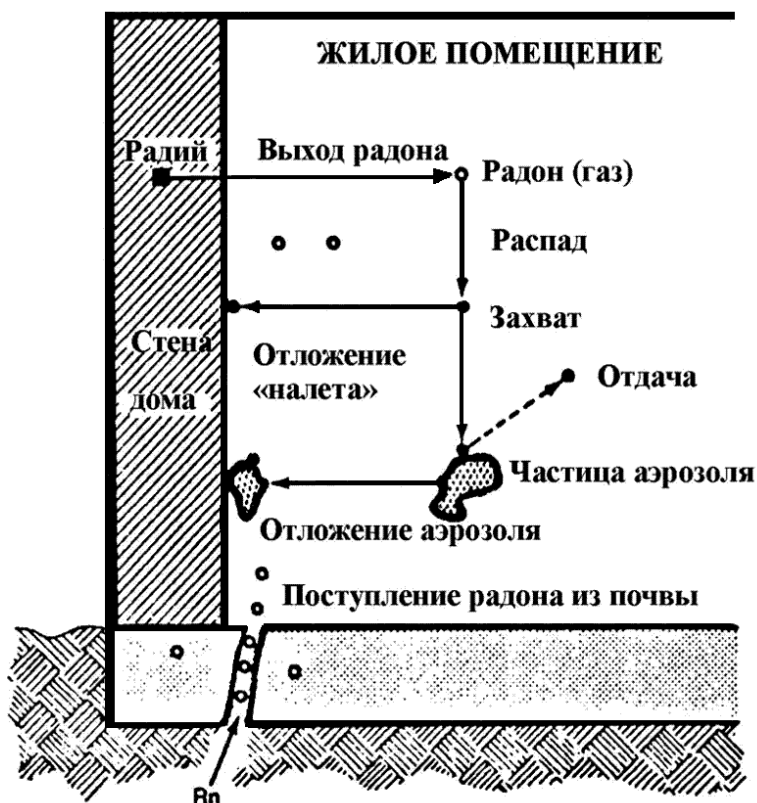
Большую часть дозы облучения от радона человек получает вместе с вдыхаемым воздухом, находясь в закрытом непрветриваемом помещении. В зонах с благоприятным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Для тропических стран подобные измерения не проводились; можно, однако, предположить, что, поскольку климат там гораздо теплее и жилые помещения намного более открытые, концентрация радона внутри их ненамного отличается от его концентрации в наружном воздухе.

Если человек находится в помещении, доза внешнего облучения изменяется за счет двух противоположно действующих факторов:

- 1) Экранирование внешнего излучения зданием.
- 2) Облучение за счет естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которого построено здание.

В зависимости от концентрации изотопов ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в различных строительных материалах мощность дозы за счет внешнего облучения в домах изменяется от $4 \cdot 10^{-8}$ до $12 \cdot 10^{-8}$ Гр/ч. В среднем в кирпичных, каменных и бетонных зданиях мощность дозы в 2-3 раза выше, чем в деревянных. Более существенной является доза от внутреннего облучения, создаваемого радоном.

Опасен не сам радон, а нелетучие продукты его распада. На их концентрацию в воздухе помещения существенное влияние оказывает наличие аэрозолей: их концентрация, физико-химические свойства, размеры и функция распределения по размерам, зарядовое состояние, процессы адсорбции продуктов деталями интерьера и наличие в помещении ионизаторов воздуха. Продукты распада радона в воздухе находятся в двух видах: в атомарно-дисперсном состоянии (т.е. в свободной ионной форме) и в адсорбированном на аэрозолях виде (**Рис.8**). Распределение радионуклидов между двумя видами (и, следовательно, степень опасности для человека) зависит от процессов сорбции-десорбции продуктов распада на аэрозолях, т.е. от типа изотермы сорбции, адсорбционной емкости аэрозольной частицы и температуры.



Активности адсорбированных радионуклидов распределены по размерному спектру аэрозоля. При этом радиоактивное равновесие между аэрозолями нарушается, причем возможен как "нормальный", так и "аномальный" сдвиги равновесия. Продукты распада радона отлагаются на тканях мебели, драпировках и т.п.

Рис. 8. Взаимодействие радона и продуктов его распада («активного налета») с аэрозолями в воздухе жилого помещения и стенами комнаты.

Концентрация радона в комнате четко зависит от этажа помещения.

Концентрация радона в жилом помещении определяется равновесием между поступлением радона (рассмотрено выше) и его стоком. Концентрация радона уменьшается за счет распада, уноса системой вентиляции, адсорбции на

мебели, шторах и т.п. На концентрацию радона существенное влияние оказывает тип и

скорость вентиляции, характер и интенсивность тепловой конвекции, наличие и режим работы установок искусственного климата и тип теплового уплотнения окон и дверей. Обычно, чем лучше теплоизоляция, тем выше в помещении будет концентрация радона; даже однократный воздухообмен за 1 час снижает концентрацию радона практически на два порядка.

Вдыхание радона, находящегося в помещениях, обуславливает накопление эффективной дозы облучения около 1 мЗв в год. В неблагоприятных случаях дозы от радона могут быть гораздо больше. В отдельных домах содержание радона такое же, как в урановых шахтах. Некоторые люди, не подозревая об этом, в течение жизни систематически получают за счет радона эффективные дозы в десятки мЗв в год. В Великобритании выявлено более 20 тыс. домов, в которых эффективные дозы за счет радона превышают 20 мЗв в год. Иногда показатель концентрации радона и его дочерних продуктов в воздухе (эффективная равновесная объемная активность) достигает более 1000 Бк/м³, что соответствует дозе свыше 40 мЗв в год. Относительное число таких домов составляет от 0,01 до 0,1%, как это имеет место в ряде районов США, Великобритании и Швеции.

Важный фактор, влияющий на концентрацию продуктов распада радона в воздухе жилых помещений - менталитет жителей, особенно частота и качество уборки. Выбивание ковров, подметание, включение пылесосов сопровождается подниманием пыли и увеличением в воздухе концентрации радиоактивных продуктов распада радона.

3. РАДОНОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для определения механизма поступления радона в помещение обычно проводятся дополнительные лабораторные исследования, которые включают измерение радонопроницаемости строительных материалов (кирпичи, бетон, обои, слои штукатурки, лаков, краски, доски и т.п.). С этой целью плоский образец зажимают в специальной ячейке. Пластина разделяет ячейку на две камеры: резервуар и приемник. В некоторый момент времени в резервуар запускается радон и измеряется изменение во времени потока радона сквозь мембрану. Из полученной кривой рассчитывается эффективный коэффициент диффузии радона по материалу изделия и константа растворимости (для сплошного материала) или константа адсорбции (для пористого материала) радона. Измерение проводится в стационарном и нестационарном режимах, при равновесных и неравновесных (линейный нагрев, деформация образца) условиях. Значительное внимание уделяется радонопроницаемости слоистых сред.

Другое направление исследований - изучение процессов эманирования образцов почвы и строительных материалов. С этой целью образец помещается в нагреваемую ячейку и над ним пропускается поток воздуха, который увлекает выделяющийся радон в проточный детектор. Измеряется зависимость потока радона из образца от времени. Из полученной кривой рассчитывается эффективный коэффициент диффузии радона в материале образца (по эманированию за счет диффузии) и величина его удельной поверхности (по эманированию за счет отдачи). Изучается влияние на скорость выделения радона из образца таких параметров, как величина открытой пористости, удельная поверхность образца, влагосодержание и температура образца, влажность газа-носителя и др.

Важное направление исследований - проведение комплексного эманационно-термического анализа образцов строительных материалов или почвы. В этом случае измеряется кинетика выделения радона и/или торона в условиях программированного нагрева (линейный, параболический или ступенчатый нагрев). Одновременно проводится термогравиметрический и дифференциально-термический анализы, а также измеряется изменение линейных размеров. Часто эксперименты проводятся в режимах механических напряжений (сжатие, растяжение, деформации сдвига) на образец. Полученная информация используется для прогнозирования поступления радона в комнату при смене климатических условий, усадки здания, сотрясений почвы (землетрясение, строительство метро и т.п.).

Третье направление исследований - изучение процессов тепло- и массопереноса в типичных зданиях и жилых помещениях. Используя радоновые эманлирующие эталоны и специальные методики изучается характер конвективного переноса воздуха в закрытом помещении при различных условиях работы системы отопления и вентиляции. Одновременно

изучаются процессы сорбции-десорбции радона и продуктов его распада на строительных конструкциях и деталях интерьера помещения. Особое внимание уделяется диагностике процессов перераспределения радона по всем помещениям высотного здания: определения наличия, пропускной способности и взаимосвязности транспортных путей в строении, а также влиянию на эти процессы систем отопления и вентиляции здания, погодных и климатических условий.

4. КОНЦЕНТРАЦИЯ РАДОНА В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ: национальные и региональные особенности.

Чтобы установить базовое значение нормального облучения, необходимо оценить поглощенную дозу. Для этого нужно знать среднюю концентрацию радона и продуктов распада радона, вдыхаемых всем населением. Объективно этого можно достигнуть только с помощью систематической национальной инспекции строений в различных регионах и при значительном числе измерений.

В 1998 г. наибольшее число обследованных эксплуатирующихся жилых и общественных зданий России – 17550 (93,49%) из 18772 обследованных лабораторно попало в категорию с эквивалентной равновесной среднегодовой объемной активностью радона (ЭРОА) до 100 Бк/м³, в категорию от 100 до 200 Бк/м³ попадает 858 (4,57%) объектов, в третью категорию более 200 Бк/м³ попадает 304 объекта. Строящиеся жилые и общественные здания – вторая категория объектов, в которых можно еще на этапе строительства принять меры по снижению ЭРОА радона в воздухе. Всего обследований 34879, из них 33499 (96,04%) – с концентрацией до 100 Бк/м³, 731 – (2,1%) – с концентрацией от 100 до 200 Бк/м³ и 149 (0,43%) – более 200 Бк/м³. При обследовании первых этажей домов (всего 3529) выявлено: активность радона (ЭРОА), из них 2928 (89,84%) с ЭРОА до 100 Бк/м³, 198 (6,08%) с ЭРОА 100–200 Бк/м³ и 27 (0,83%) – более 200 Бк/м³.

Доля домов, внутри которых концентрация радона и его ядерных продуктов равна от 10³ до 10⁴ Бк/см³, составляет от 0.01 до 0.1% в различных странах. Это означает, что значительное число людей подвергаются заметному облучению из-за высокой концентрации радона внутри домов, где они живут.

Некоторые данные приведены в **Табл. 4**

Табл.4. Уровни радона на территориях проживания по данным национальных инспекций.

Страна	Число измерений	Метод детектирования	Средняя концентрация (Бк/м ³)
Германия	5970	Треков. Дет	40
Финляндия	2154	"-"	64
Англия	2000	"-"	28
Швеция	602	"-"	67
Голландия	215	"-"	26
Швейцария	123	"-"	60
США	30000	"-"	65
Канада	13413	Отбор проб	17
Австрия	729	"-"	15
Норвегия	129	"-"	48-74

Вторым шагом является определение величины индивидуального облучения для того, чтобы оценить вероятное число жилищ, в которых уровень облучения настолько высок, что требует незамедлительного принятия мер. Эта информация может быть получена из результатов национальных инспекций. Обычно концентрация радона в жилых помещениях оказывается распределенной по логарифмически нормальному распределению (**Рис.15**). Примеры для "критических" регионов даны в **Табл.5**.

Табл.5. Уровни радона в регионах проживания по данным инспекции критических ареалов (трековый метод)

Район	Число измерений	Средняя концентрация радона (Бк/м ³)
Швейцария		
Южные Альпы	32	255
Центральные Альпы	88	174
Англия		
Конренхолл	329	390
Девон	150	210
Центральная Апландия	150	189

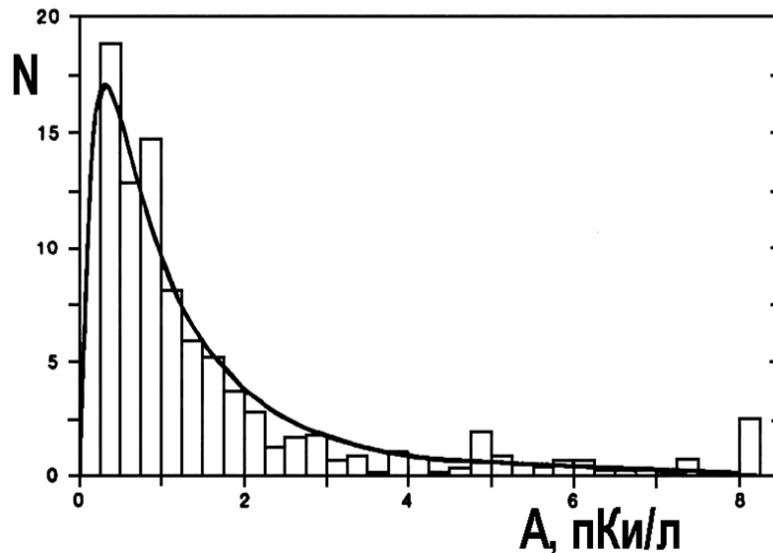


Рис.9. Диаграмма распределения радона по жилым помещениям (всего 552 измерения). Ось абсцисс — концентрация радона-222 в воздухе квартиры (пикокюри на литр), ось ординат — процент домов с данной концентрацией. Наиболее вероятное значение 0,96 пКи/л. Сплошная линия — график логарифмически нормального распределения.

Особенно важен контроль за содержанием радона в детских садах и яслях. Дело в том, что наиболее опасен радон для детей (в силу более низкой сопротивляемости детского

организма), а ведь детские сады и школы — малоэтажки, многие классы — как раз на первых этажах.

Замечание. В Москве в некоторых учебных заведениях концентрация (ЭРОА) радона в классах и детсадовских группах достигает 60-80 Бк/м³, что на взгляд не вызывает беспокойства: согласно Нормам радиационной безопасности, содержание радона в воздухе жилых помещений не должно превышать 200 Беккерелей на метр кубический. Оно и не превышает. Но! Мы, как правило, 80% своего времени проводим в помещении. Вот и получается, что эта норма (200 Бк/м³) в пересчете на дозовую нагрузку “вылетает” в значение, превышающее 8 мЗ/год. А в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (1999 г.)» такой уровень облучения классифицируется как высокий. Более того, в Великобритании, где действует тот же гигиенический норматив — 200 Бк/м³, пришли к выводу, что такое содержание радона в жилых помещениях на 34% повышает риск лейкозов у детей. Поэтому для детских садов и школ уже и при 60 Бк/м³ обязательно рекомендуется выполнить тщательную изоляцию в подвальных помещениях и чаще проветривать комнаты.

5. РАДОНОЗАЩИЩЕННЫЕ ЖИЛИЩА

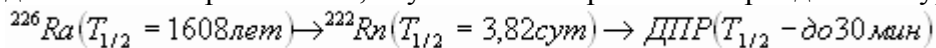
Проблема защиты от природных источников излучений (в первую очередь - от радона) является одной из важнейших в современном мире, поскольку именно на этом направлении может быть достигнуто значительное снижение коллективной экспозиционной дозы жителей планеты, прежде всего городского населения. Для ее решения проводятся комплексные геофизические, дозиметрические и эпидемиологические исследования, готовятся нормативно-методические документов и средства измерений для широкомасштабного радиационного мониторинга во всех регионах мира.

В настоящее время концентрация радона в жилых помещениях в России регламентируется: и во вновь строящихся и проектирующихся зданиях она не должна превышать 100 Бк/м³. При концентрации радона в эксплуатирующихся зданиях свыше 400 Бк/м³ может быть поставлен вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании здания.

Подавление радонового риска включает оптимизацию жилых помещений с точки зрения поступления в них радона, создание радонозащищенных домов и уменьшение медико-биологических последствий облучения населения радоном. Работы проводятся по следующим направлениям:

- Учет географических, климатических, архитектурных и демографических факторов и особенностей менталитета населения. Рекламная компания по радоновому риску (тематические брошюры с разъяснением местных особенностей, система экспертиз по бытовому радону) и проповедь оптимального поведения.
- Диагностика региона застройки с точки зрения качественного и количественного анализа материнских радионуклидов радона в окружающей среде и определение степени открытости геологических и почвенных структур. Использование методов инженерной геологии для снижения эксхалляции радона грунтами и почвой под строящимися зданиями.
- Подбор строительных материалов: обеспечение низкого содержания материнских изотопов эманации в песке, гравии, бетоне, кирпичках, низкая эманурующая способность (отсутствие открытой и сквозной пористости), борьба с несплошностями (трещинами, разрывами) в строительных конструкциях.
- Оптимизация конструкции здания: проветривание фундаментов и подвалов, герметизация полов и межэтажных перекрытий, уплотнение окон и дверей, оптимизация вентиляции здания.
- Меры по предотвращению попадания радона в помещение с водопроводной водой, природным газом, каменным углем, дровами.
- Оптимизация процессов тепло- и массопереноса в комнате или квартире. Фильтрация воздуха. Кондиционеры, вентиляторы, газовые плиты, печи и камины как источники радоновой опасности. Ионизация воздуха и удаление аэрозолей. Система уборки квартир и пылеподавления. Подбор материалов для интерьера. Образ жизни квартиранта.
- Применение композитных защитных покрытий с низкой радонопроницаемостью и оптимальными адсорбционными свойствами по отношению к активному налету. Блокировка радона в строительных конструкциях специальными обоями, лаками и красками. Покрытия полов на перфторированной основе для тангенциальной вентиляции.
- Иммуноный мониторинг населения с целью выявления радиационно-чувствительных особей. Иммунокоррекция лиц повышенного риска (Тактивин, фитим), как способ повышения устойчивости организма к радиационным воздействиям.

Снижение содержания радона внутри помещений обеспечивается за счет выбора для строительства участка с низким выделением радона из грунта, применения строительных конструкций, препятствующих проникновению радона из грунтового основания и удаления радона из воздуха помещений. Основные защитные мероприятия, позволяющие уменьшить облучение населения от радона и его дочерних продуктов распада, реализуются по двум направлениям: удаление накопившихся продуктов путем надлежащего вентилирования и снижение поступления радона из грунта, стен, перекрытий и т.п. в результате их изоляции (герметизации). В последнем случае исходят из того, что в любом помещении устанавливается динамическое равновесие, обусловленное разными периодами полураспада цепочки:



Если путь радона от источника его образования до человека затруднен (например, в результате изоляции, герметизации) и превышает несколько периодов полураспада, то его воздействие оказывается незначительным.

Так, при сооружении фундамента между плитами прокладывается битум, блокирующий поток радона из почвы в дом. Особенно эффективное средство уменьшения количества радона, просачивающегося через щели в полу, - вентиляционные установки в подвалах. Эмиссия радона из стен уменьшается в 10 раз при облицовке стен пластиковыми материалами типа полиамида, поливинилхлорида, полиэтилена или после покрытия стен слоем краски на эпоксидной основе, или тремя слоями масляной краски. Даже при оклейке стен обоями скорость эмиссии радона уменьшается примерно на 30%. Наличие регионов в мире, в которых ЕРФ значительно повышен за счет увеличения космической компоненты, либо высокого содержания радионуклидов уранового и ториевого рядов в подстилающих поверхностях,

стройматериалах либо в результате интенсивного выделения радона-222, требует взвешенной радиационно-гигиенической оценки и проведения избирательных профилактических мероприятий (совершенствование конструкций зданий, выбор территории для строительства, регламентация содержания РВ в стройматериалах и др.). Особое значение проблема радонозащитности зданий имеет при возведении жилья и иных строений на территориях, загрязненных радионуклидами, с тем, чтобы уже на стадии проектирования принимались эффективные меры по защите помещений от радона, а строительные материалы подвергались строгому радиационному контролю.

На радоноопасность следует проверять все строительные площадки и все строительные материалы.

Противорадонные меры включают подбор оптимальных режимов проветривания и уборки объектов и помещений; организацию и реконструкцию принудительной вентиляции с обязательным воздухообменом подвальных помещений; герметизацию перекрытий пола первого этажа; поднятие фундаментов зданий сельского типа; кипячение или отстаивание питьевой воды; реорганизацию систем водоснабжения (для подземных источников), обеспечивающей снижение радона в питьевой воде в местах водозабора. Реализация этих мер позволяет существенно снизить интегральную экспозиционную дозу и в большинстве случаев полностью компенсировать повышенное облучение от естественных радионуклидов.

Международная комиссия по радиологической защите, касаясь принципов ограничения экспозиции населения от естественных источников радиации, указывает "не стоит принимать каких-либо мер при среднем уровне концентрации радона в жилых помещениях. Но при эквивалентной равновесной концентрации радона в регионе 200 Бк/м^3 (ежегодный эффективный дозовый эквивалент около 20 мЗв) нужно принимать какие-то предупредительные меры. Отселение жителей и снос домов начинается при величинах в несколько раз больших".

В Швеции считают, что дома не удовлетворяют санитарным нормам, если концентрация продуктов распада радона в постоянно используемых помещениях превышает ежегодное среднее 400 Бк/м^3 . После соответствующей перестройки в таких домах ежегодное среднее не должно превышать 200 Бк/м^3 продуктов распада радона, а во вновь строящихся зданиях - 70 Бк/м^3 . Следует отметить, что уровень 400 Бк/м^3 при облучении в течение всей жизни существенно выше дозы облучения населения ионизирующей радиацией из других источников.

В других странах предельно допустимые концентрации варьируются в интервале $70-200 \text{ Бк/м}^3$ (Табл.6). Общепринятым является уровень 100 Бк/м^3 . Для существующих домов, однако, имеют место большие расхождения в значении предельно допустимой концентрации в различных регионах.

Табл.6 Действующий, изучаемый и дизайн уровни (Бк/м^3) предельно допустимого облучения продуктами распада радона в различных странах

	Существующие нормы				Рекомендации				
	Канада	США		Швеция	США	Финляндия	Англия	Нордические страны	ICRP39
		Колорадо	Флорида						
Существующие здания Действующий Уровень	70	200	70	400	150	360	400	400	200
Изучаемый уровень	40	40	40						
Строящиеся Здания Дизайновый уровень	76	56	75	100		70	80	100	100

Работы по переселению жителей, реконструкции или сносу домов ограничены трудоемкостью и связаны с большими затратами. Поэтому рекомендации по радону не носят обязательного характера.

Измерения, проводимые с целью уменьшения концентрации радона в домах, должны обеспечивать контроль зданий в течение всего срока их существования, быть дешевыми, не требовать постоянного обслуживания. На практике это не реализуется. Выделением радона из строительных материалов и почвы управляют с помощью специальных покрытий и шпаклевки трещин в полу и стенах. Даже тонкое покрытие краской уменьшает эманирование на 32-67% (латексные лаки) и 47-87% (эпоксидные лаки). Концентрацию радона и его продуктов распада можно понизить путем увеличения скорости вентиляции. Основные возражения против интенсивной вентиляции связаны с существенным увеличением стоимости отопления. Расходы можно понизить путем использования механических вентиляционных систем с возвратом тепла. Высокие скорости воздухообмена снижают концентрации некоторых других загрязнителей, часто достигающих критических уровней в плохо проветриваемых домах. Хорошие результаты дает использование вентиляции почвы: почвенные газы удаляются до их поступления в жилище. При строительстве новых домов необходимо исключить использование строительных материалов с сильной эсхалацией радона. При строительстве на грунтах с повышенным содержанием радия следует использовать специальные конструкции домов, предусматривающие возможность интенсивного проветривания подвалов.

С экономической точки зрения проблема радона заключается в том, что общая доза, полученная всем населением, рассчитывается в условиях резкого преобладания числа жителей, проживающих в домах с низким уровнем радона, что выражается в логнормальном типе распределения: уменьшение уровня радона в "активных" домах слабо влияет на дозу популяции. Поэтому работы по снижению радонового риска экономически невыгодны: затраты окупаются только при снижении какого-либо вредного воздействия на все население.

Для обоснования затрат на радоновую проблему сейчас в экономические расчеты стали включать стоимость лечения больных раком легких, заболевших из-за повышенной концентрации радона в домах. При этом затраты на лечение сравниваются с затратами на поддержании дозы "на таком низком уровне, на каком это достижимо". Эти расчеты крайне неточны, из-за неопределенности в стоимостных оценках и в числе заболеваний раком легких, приходящихся на единицу дозы. Для примера некоторые оценки приведены в **Табл.7**.

Табл.7. Сравнение затрат на лечение больных раком легких со стоимостью мероприятий по уменьшению концентрации бытового радона

Концентрация продуктов распада Rn (Бк/м ³)	Доза на человека ^a мЗв		Число заболеваний раком на 10 ⁶ человек в год	Стоимость защитных мероприятий \$США	Стоимость снижения дозы \$США ^c	Стоимость медицинского обслуживания больных раком \$США
	Год	Вся жизнь				
10	0,61	36,6	11	500	3290	3000
50	3,05	183,0	55	1000	1310	
100	6,1	366,3	110	1000	655	
200	12,1	732,0	220	2000	655	

^a доза в мЗв, при расчетах использовали фактор дозовой конверсии 0,061 мЗв/Бк-год и продолжительность жизни человека 60 лет; ^b с учетом фактора риска для рака легких $18 \cdot 10^{-6}$

^c Для семейного коттеджа со средней заселенностью 5 человек и дозе, полученной за 40 лет.

Цель этой таблицы – иллюстрация устойчивых тенденций. Здесь полагали, что меры по уменьшению концентрации радона будут эффективны в течение нескольких лет, снижение дозы будет возрастать с годами, увеличивая благополучие общества из-за снижения заболеваний раком легких. **Табл.7** показывает, что даже снижение до 10 Бк/м³ концентрации продуктов распада радона может быть проведено при низкой стоимости снижения дозы на

человека, хотя сначала защитные меры не предусматривают переход на такие низкие уровни. С другой стороны, уменьшение до 200 Бк/м^3 для небольшой группы населения, скажем 10000 человек, на период 40 лет приведет к уменьшению дозы на 4880 человеко-зиверт, т.е. стоимость охранных мер на уменьшение параметра чел-Зв для средней заселенности 5 человек в доме, составила бы 410-4100 \$ США.

6. РАДОНОВАЯ ПРОГРАММА РОССИИ

Осознание в России значимости проблемы радона нашло свое отражение в ряде нормативных документов, в том числе, в "Законе о радиационной безопасности населения" и в новых "Нормах радиационной безопасности", которые, в частности, ограничивают суммарную дозу облучения от естественных радионуклидов величиной 5 мЗв/год для персонала любых производств, не связанных с профессиональным использованием источников ионизирующего излучения. Правительство России (постановление от 06.07.94 г. N 809) приняло федеральную целевую программу по снижению уровня облучения населения и производственного персонала от природных радиоактивных источников (ФЦП "Радон"). Основными задачами программы "Радон" являются:

- прогнозирование степени радоноопасности территорий с целью выбора адекватных защитных мер в строящихся зданиях;
- создание системы массового радиационного мониторинга природных радионуклидов, позволяющей с приемлемыми затратами выявить все помещения, где имеют место высокие концентрации радона, и оценить дозы облучения отдельных лиц, включающей многофункциональный измерительно-вычислительный комплекс для мониторинга радона (в том числе, для массовых измерений активности радона в воде и воздухе, потока радона с поверхности земли, коэффициента эманации и диффузии радона в горных породах и т.д.), автоматизированный комплекс аппаратуры с трековыми детекторами для массовых измерений интегральной объемной активности радона в воздухе помещений и стенд для градуировки и поверки радиометров радона, в том числе средств измерения потока радона с поверхности земли;
- выявление жилищ и объектов производственного назначения, где превышаются или могут быть превышены контрольные уровни радиационно опасных факторов, а также установленные пределы эффективных доз облучения населения и производственного персонала;
- проведение детального радиационного обследования на выявленных объектах с повышенным природным фоном, расчет фактических доз облучения населения и производственного персонала, осуществление требуемых защитных и профилактических мероприятий;
- радиоэкологическое сопровождение строительства зданий и сооружений с целью заблаговременного принятия защитных мер;
- оценка радиоактивного загрязнения окружающей среды выбросами и сбросами промышленных предприятий, а также измерение содержания радионуклидов в готовой продукции и отходах производства;
- проведение медико-биологических наблюдений за выявленными группами повышенного радиационного риска с целью накопления эпидемиологических данных об отдаленных последствиях облучения;
- формирование баз данных о радиационной обстановке в регионах и картирование территории регионов по степени радиационной опасности;
- ретроспективную оценку индивидуальных кумулятивных доз и заболеваемости раком легкого среди контингента лиц с высокими уровнями облучения;
- разработка документов для практического использования: - "Концепция и нормативная база системы защиты населения от воздействия природных радионуклидов", - "Концепция и структура системы мониторинга облучения населения природными радионуклидами", - "Концепция обеспечения единства измерений", - "Руководство по оценке радоноопасности территорий застройки и прогнозированию поступления радона в здания", - "Строительные

нормы и правила по радиационно-экологическим изысканиям на селитебных территориях", - "Методические указания по выборочному радиационному обследованию зданий и сооружений", - "Методические рекомендации по осуществлению противорадиационной защиты в зданиях и сооружениях", - "Санитарные правила реабилитации территорий, загрязненных природными радионуклидами", - "Методические указания по радиационному контролю при приемке зданий в эксплуатацию";

В рамках выполнения программы санитарной службой должна проводиться радонометрия всех школ, многих детских дошкольных, лечебно-профилактических учреждений, жилых и общественных зданий, а также определение содержания радона перед приемкой в эксплуатацию сдаточных объектов, радиологические исследования содержания естественных радионуклидов в стройматериалах. Осуществляется работа по радонометрии жилых и общественных зданий, сдающихся в эксплуатацию, определение естественных радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения. Реализация ФЦП "Радон" должна обеспечить в перспективе снижение среднего уровня облучения населения от радона не менее, чем на 20-25 %. Прежде всего, для столицы разработана региональная программа "Радон", предусматривающая радиационное обследование строительных площадок, детских учреждений, жилых и производственных зданий, контроль за содержанием радона в атмосферном воздухе. В рамках программы постоянно измеряется содержание радона в атмосфере города.

В рамках программы "Радонозащищенные жилища" разработана концепция оптимизации строительства и эксплуатации жилых помещений по экологическим и экономическим критериям (энергопотребление, радиационная безопасность, комфортность, затраты на строительство нового радонозащищенного жилья, модернизация старых сооружений, переселение жителей, лечение населения и др.).

В последние годы увеличивается внимание к проблеме влияния загрязнений воздуха в помещениях на здоровье населения. Ухудшение ситуации вызвано уменьшением скорости вентиляции в домах из-за энергетического кризиса и необходимости экономии тепла. Хотя снижение энергопотребления дает значительный доход, ухудшение качества домашнего воздуха, нельзя недооценивать. Отметим, что помимо радона воздух содержит продукты горения, органические соединения, влагу, аллергические агенты, грибки и другие биологически активные виды. Невозможно сейчас дать оценки риска по всем этим веществам. Однако, методология исследований по различным классам загрязнителей аналогичны радону и, следовательно, методы борьбы с радоном могут быть использованы для снижения концентрации других токсичных веществ и наоборот. Следует помнить, что оптимизация жилых помещений и условий их эксплуатации, требует снижения количеств всех токсинов в воздухе жилых помещений, а не только радона.