

## РАДОНОВАЯ ПРОБЛЕМА В ЭКОЛОГИИ

**В. И. УТКИН**

*Уральский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург*

### **RADON'S PROBLEM IN ECOLOGY**

V. I. OUTKIN

*The role of natural radioactive gas – radon in a population irradiation total doze is described. The ways of radon distribution in a nature are shown. The situations resulting to radon accumulation in dangerous concentration, are considered. The ways of reduction of radon's danger are submitted.*

*Описывается роль естественного радиоактивного газа радона в суммарной дозе облучения населения. Показаны пути распространения радона в природе. Рассмотрены ситуации, приводящие к накоплению радона в опасных концентрациях. Представлены пути снижения радоновой опасности.*

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

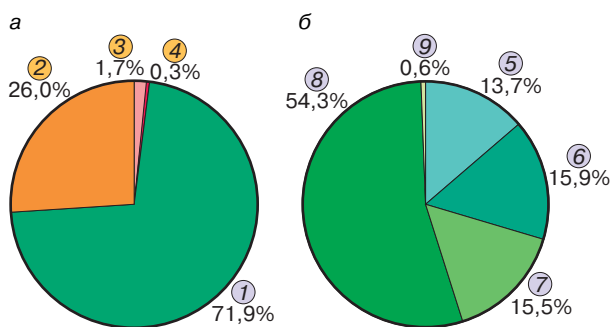
Интерес к радиологическому воздействию радона на население возник в начале 80-х годов. Первые же исследования показали, что концентрация радона в воздухе жилых домов, особенно одноэтажных, часто превышает даже уровень предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для работников урановых рудников, где служба безопасности традиционно борется за снижение накопления радиологически опасных концентраций радона.

Согласно расчетам Британского бюро защиты от радиации, в Великобритании ежегодно погибают 2500 человек от рака легких, вызванного радиоактивным газом радоном. По данным Агентства окружающей среды, в США ежегодно около 20 тыс. онкологических заболеваний инициируется радоном и продуктами его распада. Также остра проблема радиологического воздействия радона на население в Швейцарии, Швеции, Финляндии и Австрии [2, 4, 6].

Подсчет вклада радона в формирование средней дозы облучения человека в процессе его жизни дает неожиданные результаты. Общий вклад естественного облучения в дозовую нагрузку составляет около 72% (рис. 1, а). При этом в облучении вклад космического излучения в общую дозу облучения человека от естественных источников составляет почти 14%, внешнее и внутреннее естественное гамма-излучение по 16% каждое. Вклад радона оценивается в 54% (рис. 1, б) [4, 5]. Этот факт вызвал громадный интерес к радоновой проблеме практически во всех развитых странах, поскольку более половины годовой дозы от всех природных источников излучения человек получает через воздух, облучая радоном свои легкие во время дыхания.

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДОНЕ**

Земная кора с самого начального момента своего образования содержит естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ), создающие естественный радиационный фон. В горных породах, почве, атмосфере, водах, растениях и тканях живых организмов присутствуют радиоактивные изотопы калия-40, рубидия-87 и члены



**Рис. 1.** Суммарная дозовая нагрузка на население. а – от всех источников излучения: 1 – естественные источники, 2 – медицинские процедуры, 3 – радиоактивные осадки, последствия ядерных взрывов в атмосфере, 4 – атомная энергетика; б – только естественные источники излучения: 5 – космическое излучение, 6 – внешнее гамма- и бета-облучение, 7 – то же, внутреннее, 8 – радон, 9 – прочее

трех радиоактивных семейств, берущих начало от урана-238, урана-235 и тория-232. Эти материнские нуклиды стары как сама Земля – около 4,5 млрд лет. Они сохранились только потому, что периоды полураспада основателей радиоактивных семейств очень велики и составляют для урана-238  $4,5 \cdot 10^9$  лет, урана-235  $0,7 \cdot 10^9$ , тория  $14 \cdot 10^9$  лет.

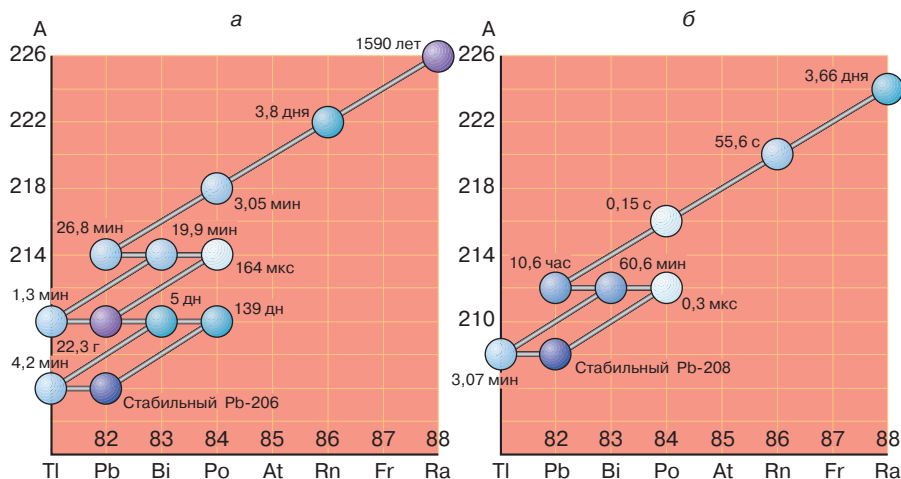
Члены радиоактивных семейств жестко связаны между собой. Каждое звено радиоактивного ряда образуется со скоростью, определяемой периодом полураспада предыдущего нуклида, а распадается в соответствии с собственным периодом полураспада. Таким образом, через некоторое время в цепочках распада устанавливается равновесие, то есть сколько дочерних элементов распадается, столько же и рождается в соот-

ветствии с периодами полураспада материнских нуклидов. После длинной цепи преобразований образуются в конце концов стабильные изотопы свинца (рис. 2) [3].

Единственным газообразным продуктом, который рождается в процессе распада трех семейств ЕРЭ, является радон. Наибольший вклад в газовую составляющую ЕРЭ вносят радиоактивные семейства урана-238 и тория-232, в процессе распада которых образуются радиоактивные радон-222 и радон-220 (последний часто называют торон по имени исходного материнского нуклида).

Радон – это инертный газ без цвета и запаха, почти в 10 раз тяжелее воздуха, точка кипения  $-65^\circ\text{C}$ , растворяется в воде. Радон, как и его “родители”, альфа-излучатель. В процессе распада он продуцирует семейство других альфа-излучателей, которые в целом называют дочерними продуктами распада (ДПР). Причем в отличие от радона и торона ДПР представляют собой не газы, а твердые вещества – нестабильные изотопы свинца, висмута, полония и таллия, которые сами по себе являются мощными источниками альфа-излучения. Например, при распаде семейства урана-238 выделяется восемь альфа-частиц, из которых четыре приходится на радон и его ДПР. Причем первые четыре альфа-частицы выделяются с полупериодом около 1 млрд лет (распад уран–радий), а следующие три с полупериодом 3,825 дня, то есть интенсивность альфа-излучения радона и ДПР во много раз выше интенсивности альфа-излучения урана и радия, вместе взятых.

Радон и торон присутствуют, как и его материнские нуклиды, во всех строительных материалах и горных породах. Образующийся в процессе распада инертный газ тотчас же диффундирует через капилляры грунта, микротрещины горных пород, захватывается потоками



**Рис. 2.** Схемы распада от радия до свинца для уранового (а) и ториевого (б) семейств естественных радионуклидов. Интенсивность цвета определяет период полураспада нуклида

других газов и, несмотря на ограниченное время жизни, может транспортироваться на значительные расстояния в земной коре и земной атмосфере. Причем естественная убыль этих газов за счет выделения из материалов (процессы эманации — выделения из кристаллической решетки и эксхалляции — испарение или выделение с поверхности) и естественного распада постоянно компенсируется за счет распада радия и тория, присутствующих в данном материале.

## РАDIАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДОНА, ТОРОНА И ПРОДУКТОВ ИХ РАСПАДА НА ЧЕЛОВЕКА

Исторически вредное влияние радона на человеческий организм было замечено еще в XVI веке, когда таинственная горная болезнь шахтеров длительное время привлекала внимание медиков: смертность от рака легких среди рудокопов была в 50 раз выше, чем среди прочего населения. Значительно позже анализ причин смерти работников шахт на урановых рудниках Европы в южной Германии и Чехословакии показал, что от 30 до 50% горняков, работающих в урановых шахтах, умирает от рака легких. Поэтому работы по изучению радиационного воздействия радона стали интенсивно развиваться.

Концентрация радона в воздухе определяется количеством распадов радиоактивных ядер в секунду в кубическом метре воздуха. Для радона это практически равно числу генерируемых в процессе распада альфа-частиц. За единицу количества распадов принято в настоящее время 1 Беккерель, равный одному распаду в секунду. Иногда до сих пор применяется внесистемная единица 1 Кюри, равная числу распадов 1 г радия-226, или  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду, или 1 Кюри =  $3,7 \times 10^{10}$  Беккерелей. Среднее содержание радона в воздухе приземной атмосферы составляет приблизительно  $3,7 \text{ Бк/м}^3$ , или  $10^{-10}$  Кюри/м<sup>3</sup>.

Для описания интегральной объемной активности дочерних продуктов распада радона в воздухе часто используется понятие “скрытая энергия”. Скрытая энергия — суммарная энергия альфа-излучения, которая выделяется в единице объема воздуха при распаде всех короткоживущих ДПР (для радона-222 вплоть до свинца-210, который имеет период полураспада 22 года, см. рис. 1). Если в воздухе содержится  $3700 \text{ Бк/м}^3$  ( $100 \text{ пКи/л}$ ) радона-222 в полном равновесии с дочерними продуктами распада, то величина скрытой энергии будет равна  $1,2835 \cdot 10^5 \text{ МэВ/л}$ . Данная величина, округленная до  $1,3 \cdot 10^5 \text{ МэВ/л}$ , носит название “рабочий уровень” (Working Level — WL) и широко используется за рубежом для определения объемной активности ДПР в воздухе, хотя и является внесистемной единицей. Применение понятия “скрытая энергия” связано

с тем, что величина скрытой энергии пропорциональна мощности эквивалентной дозы, создаваемой дочерними продуктами распада радона в легочной ткани.

Агентство по охране окружающей среды США в одном из своих докладов приводит сведения об исследовании риска заболеваний и смертей, вызываемых облучением за счет радона и сопоставляет эту степень риска с данными по внешнему облучению за счет рентгеноскопических обследований и курения (табл. 1) [2]. Последние исследования, проведенные Агентством по охране окружающей среды США, показали, что связанные с радоном заболевания раком легких среди курильщиков в три раза выше, чем у некурящей части населения, то есть, несмотря на то что риск курения существенно меньше радонового риска (см. табл. 1), курение повышает риск от воздействия радона.

При оценках радонового риска всегда надо помнить, что вклад собственно радона в облучение относительно невелик. При радиоактивном равновесии между радоном и его ДПР этот вклад не превышает 2%. Поэтому доза облучения легких от ДПР радона определяется величиной, эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона [1, 2]:

$$C_{\text{Рн экв}} = n_{\text{Рн}} F_{\text{Рн}} = 0,1046 n_{\text{RaA}} + 0,5161 n_{\text{RaB}} + 0,3793 n_{\text{RaC}},$$

где  $n_{\text{Рн}}$ ,  $n_{\text{RaA}}$ ,  $n_{\text{RaB}}$ ,  $n_{\text{RaC}}$  — объемные активности радона и его ДПР (RaA, RaB, RaC, как часто обозначают нуклиды Po-218, Pb-214, Po-214) Бк/м<sup>3</sup>, соответственно;  $F_{\text{Рн}}$  — коэффициент равновесия, который определяется как отношение эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе к реальной объемной активности радона. На практике всегда  $F_{\text{Рн}} < 1$  (0,4–0,5). Для перехода к единицам WL необходимо умножить величину ЭРОА на коэффициент, равный  $34,6 \text{ МэВ/л Бк}$ .

До 1980 года ни в одной стране мира не устанавливались нормативы на содержание радона и его ДПР в помещениях. И только в последние десятилетия, когда стало ясно, что радоновая проблема, включая вопросы нормирования и снижения доз облучения, имеет существенное значение, были введены соответствующие нормативы для существующих и проектируемых зданий, рекомендованные МКРЗ (табл. 2) [4].

По данным Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), процент людей, проживающих в различных странах в помещениях с повышенным значением ЭРОА радона, распределяется следующим образом:

$C_{\text{Рн экв}} > 50 \text{ Бк/м}^3$	–5%
$C_{\text{Рн экв}} > 100 \text{ Бк/м}^3$	–1%
$C_{\text{Рн экв}} > 200 \text{ Бк/м}^3$	–0,1%
$C_{\text{Рн экв}} > 400 \text{ Бк/м}^3$	–0,01%

**Таблица 1.** Степень радонового риска (Агентство окружающей среды США)

Концентрация радона			Ожидаемое количество смертей от рака легких, вызванного радоном в расчете на 100 тыс. чел.	Эквивалентный риск		
пКи/л	Бк/м <sup>3</sup>	WL, МэВ/л		сравнимый уровень воздействия	облучение внешнее, бэр/год	сравнимый риск
200	7400	2	440–770	В 1000 раз больше уровня ОП	28,0	В 60 раз больше, чем курить две пачки сигарет в день
100	3700	1	270–630	В 100 раз больше уровня ОП	14,0	2000 рентгеноскопий в год
40	1480	0,4	120–380		5,6	Курение двух пачек сигарет в день
20	740	0,2	60–200	В 100 раз больше уровня ОП	2,8	Курение одной пачки сигарет в день
10	370	0,1	30–120	В 10 раз больше уровня П	1,4	500 рентгеноскопий в год
4	148	0,04	13–50	В 10 раз больше уровня ОП	0,56	Курение полпачки сигарет в день
2	74	0,02	7–30	Уровень в помещении – П	0,28	Риск некурящего
1	37	0,01	3–13	Уровень открытого пространства – ОП	0,14	20 рентгеноскопий в год

**Таблица 2.** Нормативы ЭРОА радона в воздухе жилых зданий, Бк/м<sup>3</sup>

Страна	Существующие здания	Будущие здания	Примечания
Швеция	100	100	Принято в 1984 г.
Финляндия	400	100	Принято в 1986 г.
США	80	—	Принято в 1986 г.
Канада	400	—	Предложено в 1985 г.
Германия	200	—	Предложено в 1986 г.
Великобритания	200	50	Предложено в 1987 г.
Россия	200	100	Принято в 1990 г.

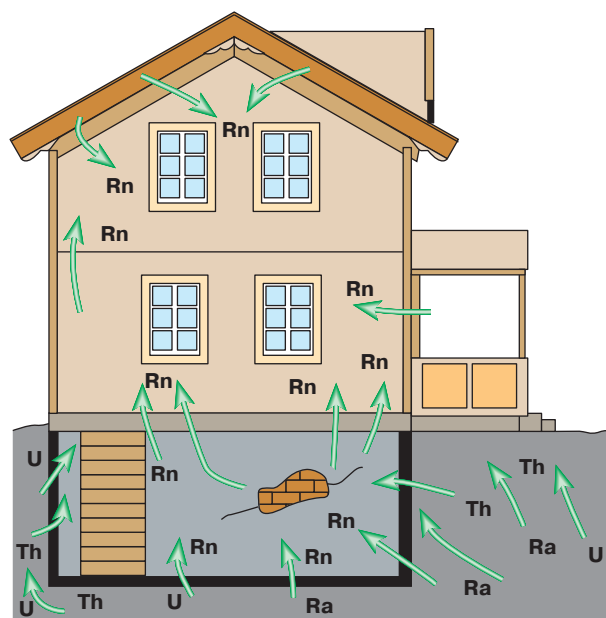
### О ПОВЫШЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Радон попадает в атмосферу помещений различными путями: а) проникает из недр Земли; б) выделяется из строительных материалов (цемент, щебень, кирпич), из которых построено здание; в) привносится с водопроводной водой, бытовым газом и другими продуктами жизнеобеспечения (рис. 3) [6].

Радон хорошо растворяется в воде, поэтому он содержится во всех природных водах, причем в глубинных грунтовых водах его, как правило, заметно больше, чем в поверхностных водостоках и водоемах. Например, в подземных водах его концентрация может изменяться от 4–5 Бк/л до 3–4 МБк/л, то есть в миллион раз. В водах озер и рек концентрация радона редко превышает 0,5 Бк/л, а в водах морей и океанов – не более 0,05 Бк/л. Радон попадает из вод в атмосферу за счет

процессов эксхалляции–дегазации с выносом радона из воздушных пузырьков, содержащихся в воде, в атмосферу. Наиболее интенсивно этот процесс происходит при разбрызгивании, испарении и кипении воды.

Процессы эксхалляции повинны и в появлении радона в помещениях за счет выхода его из строительных материалов. При этом количество радона, поступающего в



**Рис. 3.** Основные пути попадания радона в здание: из грунта по трещинам и щелям, из стен и строительных конструкций

воздух, определяется не только содержанием радия (урана, тория) в материалах, но и величиной коэффициента эманирования, определяющего долю радона, поступающего в атмосферу, от общего количества радона, генерируемого в данном материале. При этом общая радиоактивность в помещении, определяемая по гамма-съемке, не всегда может характеризовать опасность радоновыделения, о чем свидетельствуют данные табл. 3 [6].

Нередки случаи, когда здания, построенные из сравнительно слаборadioактивных (по гамма-излучению) материалов, крайне опасны по радону за счет его высокого выделения (эманирования) из вещества строительного материала. Кроме того, многие цементы содержат повышенное содержание естественного радиоактивного изотопа калий-40, который в процессе распада генерирует только гамма-излучение и не продуцирует радиоактивные газы. В этом случае на фоне относительно повышенного гамма-излучения не будет наблюдаться повышения уровня концентрации радона. Следовательно, контроль интенсивности гамма-излучения строительных материалов посредством гамма-радиометров не гарантирует чистоты по радону для строящихся из этих материалов зданий. Опасность строительных ма-

териалов по радону необходимо контролировать непосредственно только по радону.

Третий, наиболее значимый путь накопления радона в помещениях также связан с выделением радона, но уже непосредственно из грунтов, на которых построено здание или сооружение.

Среднее содержание урана-238 на материках около 3 мкг/т. При этом результирующая активность горных пород составляет приблизительно 50 000 распадов в секунду (50 000 Бк/т), то есть, грубо говоря, каждую секунду тонна горной породы генерирует 50 000 атомов радона. Однако радон в недрах земли распространен крайне неравномерно. Это связано с тем, что радон накапливается в тектонических нарушениях, куда он поступает по системам микротрещин из горных пород. Радоновыделение же определяется как общей радиоактивностью горных пород, так и их коллекторскими свойствами (способностью аккумулировать радон) и коэффициентом эманирования (способностью выделять накопленный радон) [3, 6].

В практике геологических исследований нередки случаи, когда слаборadioактивные породы содержат в своих пустотах и трещинах радон в количествах, в сотни и тысячи раз больших, чем более радиоактивные горные породы. При своеобразном дыхании Земли радон выделяется из горных пород в атмосферу, причем в наибольших количествах из участков Земли, в пределах которых имеются коллекторы радона. Возведение непосредственно над такими трещинными зонами зданий и сооружений приводит к тому, что в эти сооружения из недр Земли непрерывно поступает поток грунтового воздуха, содержащего высокие концентрации радона, который, накапливаясь в воздухе помещения выше предельно допустимых концентраций (ПДК), создает серьезную радиологическую опасность для проживающих в этих помещениях людей или рабочего персонала. Известны случаи, когда в производственных подвальных помещениях, снабженных вытяжной вентиляцией, за счет которой происходит подсос радона из почвы, объемная концентрация радона достигала 8000–10 000 Бк/м<sup>3</sup>, что превышало нормы в 40–50 раз [7].

### РАДОН В ЗДАНИЯХ

К настоящему времени в различных странах накоплена достаточно обширная информация о содержании радона в жилых и служебных помещениях. Эти данные постоянно пополняются и уточняются, поэтому представления о средних концентрациях радона в зданиях и его ПДК претерпевают изменения. С этой точки зрения интересны результаты обследования домов в различных странах (табл. 4) [5].

**Таблица 3.** Коэффициенты эманирования ( $\eta$ ) и эффективная удельная активность  $C_{Rn}\eta$  в стройматериалах

Материал	Страна	Число образцов	$C_{Rn}$ , Бк/кг	$\eta$ , %	$C_{Rn}\eta$ , Бк/кг
Бетон	Венгрия	100	13	28	3,6
	Норвегия	137	28	1–20	0,3–5,6
Бетон с золой	Россия	15	27	11	3,1
	США	8	19	26	4,9
Красный кирпич	Венгрия	200	55	4	2,0
	Россия	16	36	1,5	0,55
Гипс	США	12	12	28	3,4
	Россия	4	9	4,4	0,37
Гипс апатитовый	Польша	10	26	3,5	0,9
Гипс фосфоритовый	Польша	3	580–740	13–20	86–130
Шлак	Польша	11	70	0,7	0,5
Песок	США	2	34	16	5,4
	Россия	14	10	20	1,9
Гравий	США	4	14	7	1,0
	Россия	5	16	11	1,7
Керамзит	Россия	7	28	1,0	0,41
Известь, мел	Россия	6	26	3,5	0,92
Туф	Россия	5	48	1,4	0,59

**Таблица 4.** Содержание радона в зданиях

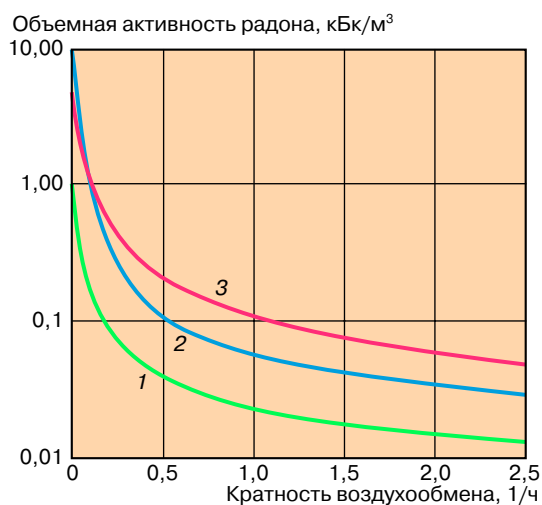
Страна, регион	Число обследованных зданий	Концентрация радона, Бк/м <sup>3</sup>
Канада	13 450	17 ± 4
Германия	5 970	40 ± 2
Финляндия	2 154	64 ± 3
Италия	1 000	25 ± 3
Нидерланды	927	30 ± 5
Швейцария	400	—
подвал		720 ± 120
1-й этаж		228 ± 68
2-й этаж		127 ± 36
Альпы	100	—
подвал		926 ± 210
1-й этаж		267 ± 73
2-й этаж		171 ± 42
США	30 000	72 ± 5
Великобритания	2 000	12 ± 3

Уровень концентрации радона и ДПР в атмосфере домов существенно зависит от естественной и искусственной вентиляции помещения, тщательности заделки окон, стыков стен и вертикальных коммуникационных каналов, частоты проветривания помещений и т.д. Например, наиболее высокие концентрации радона в жилых зданиях отмечаются в холодный период года, когда традиционно принимают меры к утеплению помещений и уменьшению обмена воздуха с окружающей средой [4]. Однако наилучшие результаты снижения радонового риска в существующих зданиях дает правильно выполненная вентиляция. Анализ активности радона при воздухообмене показывает, что даже однократный воздухообмен за 1 час снижает концентрацию радона практически на два порядка (рис. 4) [1].

Как указывалось ранее, при прочих равных условиях (конструкция, этажность домов, строительный материал и т.п.) концентрация радона в помещениях прямо связана с его концентрацией в грунтах под домами. Последняя определяется содержанием в них радия, а также физическими параметрами грунта: плотностью, пористостью, коэффициентом эманирования. Все эти параметры объединяются выражением:

$$C_{Rn} = 3,4 \cdot 10^{-7} \frac{UK_{эм}P}{\eta},$$

где  $U$  — содержание равновесного урана с радием;  $K_{эм}$  — коэффициент эманирования горной породы;  $P$  — плотность;  $\eta$  — пористость.



**Рис. 4.** Зависимость равновесной объемной активности радона от кратности воздухообмена. Шифр кривых — скорость экскалляции радона из материала стен (Бк/м<sup>2</sup>·час): 1 — 5, 2 — 20, 3 — 40 [1]

Расчетные данные о концентрации свободного радона, не входящего в кристаллическую решетку минералов и способного перемещаться по трещинам и порам, приведены в табл. 5, где оценены средние значения этих параметров [4].

Как видно из данных табл. 5, содержание свободного радона существенно зависит от всех указанных параметров горных пород и может изменяться в широких пределах. В приповерхностных условиях концентрация радона в грунтах заметно снижается по сравнению с табличными значениями за счет выхода радона в атмосферу.

В процессе тектонической деятельности повышается пористость горных пород, образуются системы разнонаправленных трещин, полостей. Поэтому тектонические зоны приобретают хорошие коллекторские свойства, в них происходит накопление радона, повышается коэффициент эманирования. Как результат — большая часть тектонических нарушений превращается в радононосные подводящие структуры. Если над такими структурами располагаются постройки, вероятность накопления в них ураганно-высоких концентраций радона резко повышается.

Таким образом, 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

**Таблица 5.** Содержание свободного радона в различных горных породах

Порода	Уран, г/т	Плотность, г/см	Пористость, %	$K_{\text{эм}}, \%$	Радон, Бк/м <sup>3</sup>
Конгломераты	2,4	2,5	0,7	15	81
Песчаники	2,9	2,5	20	30	133
Глины	4,0	2,0	20	40	200
Углистые сланцы	15,0	2,6	20	15	500
Каменный уголь	3,5	1,3	15	35	100
Диабаз	0,6	2,7	0,5	5	5
Пироксенит	0,03	3,2	0,5	5	0,3
Гранит	4,5	2,6	1,5	10	74
Липарит	4,7	2,35	1,2	15	175
Сиенит	10,3	2,6	0,5	15	250
Рыхлые по граниту	3,5	2,0	5,0	45	200
Рыхлые по осадочным породам	2,5	1,8	20,0	55	80

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/м<sup>3</sup>);

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, расположенных над такими зонами, может достигать ураганно-высоких значений до десятков тысяч Бк/м<sup>3</sup>.

### СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В ЗДАНИЯХ

В настоящее время дискуссия между сторонниками так называемых геологического и радиационно-гигиенического подходов к оценке радонового риска носит острый характер [1, 4]. Сторонники первого подхода утверждают, что основной информацией, необходимой для определения радоноопасности, являются данные об объемной активности почвенного радона, проницаемости почвы, наличии тектонических разломов, радоновых подземных вод и т.п. Для радиационно-гигиенического подхода характерна ориентация на проведение массовых измерений объемной активности радона и его ДПР в воздухе жилых и производственных помещений, и геологическая информация носит, как правило, вспомогательный характер. Истина, как обычно, находится где-то посередине. В [4] прямо указывается, что,

несмотря на то что последним критерием радоноопасности является повышенная концентрация радона в помещениях, границы радоноопасных зон в отдельных регионах должны быть установлены на основе геологических критериев. Поэтому одной из важнейших первоначальных задач решения радоновой проблемы является изучение геологической обстановки на предмет радонового риска. Большая работа в этом направлении проведена российскими геофизиками, которые составили карту радоноопасности России [6].

В зданиях с концентрацией радона, превышающей ПДК, проводятся дополнительные детализационные работы, имеющие целью подтверждение и уточнение измеренных значений концентрации радона, определение ДПР в различных частях здания, источников поступления радона, при этом выделяются радоноопасные здания, связанные со стройматериалами. После выяснения источников поступления радона принимаются меры к их ликвидации. При почвенном радоне это изолирование подвальных помещений от почвы (бетонирование полов), при эксхалляции радона из строительных конструкций это покрытие их герметизирующим составом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проблеме радона остается много нерешенных вопросов. С одной стороны, они имеют чисто научный интерес, а с другой – без их решения сложно проводить какие-либо практические работы, например в рамках Федеральной программы “Радон”. Кратко эти проблемы можно сформулировать в следующем виде.

1. Модели радиационных рисков при облучении радоном получены на основе анализа данных по облучению шахтеров. До сих пор неясно, насколько справедлив перенос этой модели риска на облучение в жилищах.

2. Достаточно неоднозначна проблема определения эффективных доз облучения при воздействии ДПР радона и торона. Для корректного перехода от ЭРОА радона или торона к эффективной дозе необходимо принимать во внимание такие факторы, как доля свободных атомов и распределение активности по размерам аэрозолей. Публикуемые в настоящее время оценки связи иногда различаются в несколько раз.

3. До сих пор не существует надежной формализованной математической модели, описывающей процессы накопления радона, торона и их ДПР в атмосфере помещений с учетом всех путей поступления, параметров строительных материалов, покрытий и т.п.

4. Существуют проблемы, связанные с уточнением региональных особенностей формирования доз облучения от радона и его ДПР, поскольку, как правило,

геологическая обстановка большинства городов изучена плохо.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: Измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН ИПЭ, 1997. 231 с.
2. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 257 с.
3. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 404 с.
4. Публикация 65 МКРЗ “Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах”. М.: Энергоатомиздат, 1995. 78 с.
5. Радиация: Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 79 с.
6. Уткин В.И. Газовое дыхание Земли // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 57–64.
7. Юркова И.А. Особенности изменения концентрации радона в воздухе в зависимости от типа вентиляции // Тр. конф.

“Радиационная безопасность Урала и Сибири”. Екатеринбург: ЕС НИО, 1997. С. 62–63.

*Рецензент статьи А.С. Соболев*

\* \* \*

Владимир Иванович Уткин, профессор Уральского государственного профессионально-педагогического университета, заслуженный деятель науки России, зав. лабораторией ядерной геофизики Института геофизики Уральского отделения РАН, член-корреспондент РАЕН, академик Российской академии метрологии. Область научных интересов – ядерная геофизика и геоэкология, исследование геологической среды как основы для природных катастроф, в частности землетрясений. Автор более 200 работ, в том числе 56 изобретений и трех монографий.