

2. РАДОН

86	Rn	8 18 32 18 8 2
РАДОН		
(222)		
$6s^2 6p^6$		

Радон (Radon), Rn – радиоактивный химический элемент VIII группы периодической системы элементов, атомный номер 86, атомная масса 222, инертный газ, без цвета и без запаха. Радон — самый тяжелый элемент нулевой (VIIIA) группы периодической системы, единственный из благородных газов, не имеющий стабильных и долгоживущих изотопов.

В 1899 М. Кюри обнаружила, что воздух, в контакте с которым находятся соединения радия, становится радиоактивным. Впервые изотоп эманации – торон, т.е. ^{220}Rn (Tn) – открыли Э.Резерфорд и Р.Б.Оуэнс в 1899 г. В 1900 Ф.Дорн (и независимо почти одновременно А.Дебьерн) открыл основной изотоп радона ^{222}Rn (Rn), т.е. радон. В 1903 А.Дебьерн открыл ^{219}Rn (An), т.е. актинон. В 1908 Р.У.Рамзай, Ф.Содди и Грей выделили радон в чистом виде. В 1923 эманация была названа радоном. Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов (барн/атом): ^{222}Rn 0,72, ^{220}Rn 0,2.

Периодическая система элементов

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Ядра радона постоянно возникают в природе при радиоактивном распаде материнских ядер. Он в ничтожных количествах постоянно присутствуют в земной коре. Радон - один из самых редких элементов. Содержание его в земной коре глубиной до 1,6 км около 115 т. В 1 м³ воздуха при нормальных условиях содержит $7 \cdot 10^{-6}$ г радона. Средняя концентрация радона в атмосфере $6 \cdot 10^{-17}$ мас%, равновесное

содержание в земной коре $7 \cdot 10^{-160}\%$ по массе, в морской воде - до 0,001 пкюри/л.

Табл. 4. Некоторые изотопы радона

Радио-нуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк·с		Дочерний радионуклид (выход)
			характеристическое, γ - и аннигиляционное излучение	β -излучение, конверсионные электроны и электроны Оже	
^{218}Rn	35 мс	α	$7,56 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	^{214}Po радиоакт.
^{219}Rn	3,96 с	α	$5,58 \cdot 10^{-2}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	^{215}Po радиоакт.
^{220}Rn	55,6 с	α	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$8,91 \cdot 10^{-4}$	^{216}Po радиоакт.
^{222}Rn	3,8235 сут	α	$3,98 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	^{218}Po радиоакт.

Ввиду химической инертности радон относительно легко покидает кристаллическую решётку «родительского» минерала и попадает в подземные воды, природные газы и воздух. Поскольку наиболее долгоживущим из четырёх природных изотопов радона является ^{222}Rn , именно его содержание в этих средах максимально. Концентрация радона в воздухе зависит в

первую очередь от геологической обстановки (так, граниты, в которых много урана, являются активными источниками радона, в то же время над поверхностью морей радона мало), а также от погоды (во время дождя микротрещины, по которым радон поступает из почвы, заполняются водой; снежный покров также препятствует доступу радона в воздух). Перед землетрясениями наблюдалось повышение концентрации радона в воздухе, вероятно, благодаря более активному обмену воздуха в грунте ввиду роста микросейсмической активности.

2.1 Изотопы радона

В настоящее время известно 34 изотопа радона с массовыми числами от 195 до 228 и периодами полураспада от 10^{-6} с до 3,8 сут. Изотопы радона: ^{222}Rn – радон, $T=3,824$ сут, образующийся при альфа-распаде ^{226}Rn , ряд ^{238}U ; ^{220}Rn – торон, $T=55,6$ с, ряд ^{232}Th ; и ^{219}Rn -актинон, $T=40$ с, ряд ^{235}U . В одну из побочных ветвей (коэффициент ветвления 2×10^{-7}) семейства урана-радия входит также очень короткоживущий ($T_{1/2}=35$ мс) ^{218}Rn . Все они — члены естественных радиоактивных рядов, дочерние продукты распада изотопов радия. Распадаясь с испусканием α -частиц, образуют изотопы полония.

Лёгкие изотопы радона (^{208}Rn - ^{212}Rn) образуются в реакциях глубокого расщепления при бомбардировке ториевой мишени частицами (в основном – протонами) высокой энергии или по реакциям типа $^{197}\text{Au}(^{14}\text{N}, xn)$, где x – число нейтронов (обычно больше трёх). Из них наиболее устойчив ^{211}Rn (электронный захват, β^+ и α -распад, $T=14,6$ ч). Нейтронодефицитные изотопы с массовыми числами до 212 получают в реакциях глубокого расщепления ядер урана и тория высокоэнергичными протонами. Некоторые нейтронодефицитные изотопы радона имеют также возбуждённые метастабильные состояния; таких состояний известно 13. Преобладающие моды распада у лёгких изотопов Rn - альфа-распад, позитронный распад и электронный захват. Начиная с массового числа $A=212$ альфа-распад становится доминирующим. Тяжёлые изотопы радона (начиная с $A=223$) распадаются преимущественно посредством бета-минус-распада.

Радиоактивная цепочка радия-226 состоит из многих радиоактивных продуктов распада радия, которые в зависимости от условий хранения (герметичность) и вида радиевых препаратов (жидкие или

твердые) присутствуют в равновесном или неравновесном с радием количествах. Если препарат радия-226 находится в герметично закрытом сосуде (ампуле), то короткоживущие γ -излучающие продукты распада через один месяц приходят в равновесие с радием. Равновесное состояние ^{226}Ra со всеми продуктами распада достигается примерно через 140 лет.

Табл. 5. Ядерные характеристики изотопов радия.

Массовое число	Период полураспада	Тип распада; энергия частиц и γ -квантов, Мэв	Реакция образования изотопов
213	2,7 мин.	α ; $E_\alpha = 6,91$	^{206}Pb (^{12}C , $5n$); облучение ^{232}Th протонами
219	10^{-3} сек.	α ; $E_\alpha = 8,0$	$^{223}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
220	0,023 сек.	α (99%); $E_\alpha = 7,46$; $E_\gamma = 0,465$	$^{224}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
221	30; 28 сек.	α ; $E_\alpha = 6,76$ (30%), 6,67 (20%), 6,69 (34%), 6,59 (8%)	$^{225}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
222	38; 37 сек.	α (96%); $E_\alpha = 6,36$; γ ; $E_\gamma = 0,325$ (4%), 0,473 (0,007%), 0,52 (0,004%), 0,85 (0,003%)	$^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
223 (AcX)	11,435; 11.2; 11,7 дня	α ; $E_\alpha = 5,75$ (11%), 5,71 (54%), 3,61 (26%), 5,54 (9%)	Естественный; $^{227}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
224 (ThX)	3,64 дня	α ; $E_\alpha = 5,68$ (94%), 5,45 (6%); γ ; $E_\gamma = 0,241$ (3,7%), 0,29 (0,008%), 0,41 (0,004%), 0,65 (0,009%)	Естественный; $^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
225	14,8 дня	β^- ; $E_\beta = 0,36$ (макс.)	$^{229}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
226	1602; 1622 года, 1617; 1590 лет	α ; $E_\alpha = 4,78$ (95%), 4,60 (6%)	Естественный
227	41,2 мин.	β^- ; $E_\beta = 1,31$ (макс.)	^{226}Ra (n , γ)
228 (MsTh ₁)	6,7 года	β^- ; $E_\beta = 0,05$ (макс.)	Естественный; $^{232}\text{Th} \xrightarrow{\alpha}$
229	Короткоживущий	—	^{228}Ra (n , γ)
230	1 час	β^- ; $E_\beta = 1,2$ (макс.)	^{232}Th (α , $3p$)

Препараты солей радия испускают нейтроны, образующиеся в результате реакции (α , n), протекающей на ядрах анионов легких элементов при бомбардировке их α -частицами радия и его дочерних продуктов. Так, RaBr_2 испускает 4—8, RaSO_4 11—21 и RaCl_2 65—120 н/сек-мг. Препараты радия испускают также образующиеся в результате взаимодействия γ -излучения со стенками ампул по реакции (γ , n) фотонейтроны. Энергия этих нейтронов меньше, чем нейтронов реакции (α , n).

Сечение захвата тепловых нейтронов для реакции ^{226}Ra (n , γ) ^{227}Ra составляет 23 барна. Сечение деления радия-226 нейтронами с энергией 2—23 МэВ лежит в пределах $\sigma = 0,5$ —37 мбарн. Сечения реакций ^{226}Ra (n , $2p$) и ^{226}Ra (n , $3n$) под действием нейтронов с энергией 14,5 МэВ равны 1,60 и 0,63 барн соответственно. Период

полураспада по спонтанному делению радия-226 составляет не менее 10^{14} лет, что соответствует 0,6 акта деления на 1 г радия-226 в 1 сек.

Радон / Radon (Rn)

[Атомный номер](#)

86

Прозрачный бесцветный слегка флюоресцирующий газ

Внешний вид



В сосуде содержится небольшое количество оксида тория. В момент съемки в сосуде находится около 160000 атомов радона, образовавшихся при распаде тория.

Свойства атома

[Атомная масса \(молярная масса\)](#)

222,0176 а.е.м. (г/моль)

[Радиус атома](#)

214 пм

[Энергия ионизации](#)(первый электрон)

1036,5(10,74) кДж/моль (эВ)

<u>Электронная конфигурация</u>	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
Химические свойства	
<u>Ковалентный радиус</u>	140—150 <u>пм</u>
<u>Степени окисления</u>	+2, +4, +6, +8
Термодинамические свойства	
<u>Плотность</u>	(газ, при 0 С) 9,81 мг/см ³ ; (жидк., при -62 С) 4,4 <u>г/см³</u>
<u>Удельная теплоёмкость</u>	20,79 <u>Дж/(К·моль)</u>
<u>Теплопроводность</u>	(газ, при 0 С) 0,0036 <u>Вт/(м·К)</u>
<u>Температура плавления</u>	202 <u>К</u>
<u>Теплота плавления</u>	2,7 <u>кДж/моль</u>
<u>Температура кипения</u>	211,4 <u>К</u>
<u>Теплота испарения</u>	18,1 <u>кДж/моль</u>
Кристаллическая решётка	
<u>Структура решётки</u>	Кубическая гранецентрированная

2.2 Физические и химические свойства.

Электронная структура атома радона [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p⁶. Электронная конфигурация внешних оболочек 6s² 6p⁶. Энергии последовательной ионизации 10,745, 21,4 и 29,4 эВ соответственно. Радиус атома 0,22 нм.

При комнатной температуре радон – газ, состоящий из одноатомных молекул. Спектр радона аналогичен спектру ксенона и др. элементов нулевой группы.

При нормальных условиях плотность газа радона 9,73 кг/м³, жидкого 4,4 г/см³ (при – 62°), твёрдого 4 г/см³ t_{кип} = -61,9°С. t_{пл} = -71°С, критическая температура 104,5°С при критическом давлении 6,2 МПа, тройная точка соответствует -71°С и давлению 0,07 МПа. Удельная теплота испарения 73,9 кДж/(кг·К), теплоёмкость C_p = 90 Дж/(кг·К) (при 298К и нормальном давлении).

На холодных поверхностях радон легко конденсируется в бесцветную фосфоресцирующую жидкость. Твёрдый радон светится бриллиантово-голубым цветом. Радон мало растворим в воде, хотя несколько лучше, чем другие благородные газы. Растворимость радона в 100 г воды 51,0 мл (0°С) – в 1 объёме воды растворяется 0,507 объёмов радона и 13,0 мл (50°С). В жировой ткани человека растворимость радона в десятки раз выше, чем в воде. Хорошо растворяется в органических жидкостях. Растворимость радона в спиртах и жирных кислотах возрастает с увеличением их молекулярных весов. Газ хорошо просачивается сквозь полимерные плёнки. Легко адсорбируется активированным углем и силикагелем.

Ко времени открытия радона, типичного представителя благородных газов, существовало мнение, что элементы этой группы химически инертны и не способны образовывать истинные химические соединения. Известны были лишь клатраты, образование которых происходит за счет сил Ван-дер-Ваальса. К их числу относятся гидраты ксенона, криптона и аргона, которые получают сжатием соответствующего газа над водой до давления, превышающего упругость диссоциации гидрата при данной температуре. Для получения аналогичных клатратов радона и обнаружения его по изменению упругости пара потребовалось бы практически недоступное количество этого элемента. Новый метод получения клатратных соединений благородных газов был предложен Б.А.Никитиным и состоял в изоморфном соосаждении молекулярного соединения радона с кристаллами специфического носителя. Изучая поведение радона при процессах соосаждения его с гидратами сернистого газа и сероводорода, Никитин показал, что существует гидрат радона, который изоморфно соосаждается с SO₂·6H₂O и H₂S·6H₂O. Масса радона в этих опытах составляла 10⁻¹¹ г. Аналогично получены клатратные соединения радона с рядом органических соединений, например с толуолом и фенолом.

Исследования химии радона возможны лишь с субмикросколичествами этого элемента при использовании в качестве специфических носителей соединений ксенона. Следует, однако, учитывать, что между ксеноном и радоном находится 32 элемента (наряду с 5d-, 6s- и 6p-происходит заполнение 4f-орбит), что определяет большую металличность радона по сравнению с ксеноном.

Радон химически инертен, непосредственно реагирует только с F₂. Первое истинное соединение радона — дифторид радона — было получено в 1962 вскоре после синтеза первых фторидов ксенона. RnF₂ образуется как при непосредственном взаимодействии газообразных радона и фтора при 400°С, так и при окислении его дифторидом криптона, ди- и тетрафторидами ксенона и некоторыми другими окислителями. Дифторид радона устойчив до 200°С и восстанавливается до элементарного радона водородом при 500°С и

давлении H_2 , равном 20 МПа. Идентификация дифторида радона осуществлена путем изучения его сокристаллизации с фторидами и другими производными ксенона. С фтором радон при высоких температурах образует соединения состава RnF_n , где $n = 4, 6, 2$. Так, дифторид радона RnF_2 является белым нелетучим кристаллическим веществом (сублимируется при 250°). Фториды радона могут быть получены также под действием фторирующих агентов (например, фторидов галогенов). При гидролизе тетрафторида RnF_4 и гексафторида RnF_6 образуется оксид радона RnO_3 . Получены также соединения с катионом RnF^+ . Подтверждением образования соединений радона в высших валентных состояниях является эффективная сокристаллизация ксенатов и радонатов бария.

Радон даёт молекулярные соединения определённого состава, в образовании которых значительную роль играют силы Ван-дер-Ваальса. Эти соединения отвечают формулам $\text{Rn} \cdot 2\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, $\text{Rn} \cdot 2\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_5$, $\text{Rn} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Из них первые два изоморфны аналогичным соединениям сероводорода. Последнее – гексагидрат радона изоморфно $\text{SO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. В настоящее время эти вещества относят к группе клатратных соединений или соединений включения. На использовании изоморфизма основан метод количественного выделения радона из смеси с другими благородными газами. Кроме того, исходя из общей устойчивости галогенидов благородных газов, должны быть устойчивыми некоторые галогениды: RnF_2 , RnF_4 , RnF_6 и RnCl_4 . Фториды восстанавливаются водородом при 500° , давая элементарный радон.

2.3 Получение и аналитическое определение

Радон получают обычно из солей радия. В равновесии с 1 г радия-226 при 0° м 760 мм рт. ст. находится $0,66 \text{ мм}^3$ радона-222. Образующаяся при этом газовая смесь (в которой радон составляет 1:500000) содержит также гелий, гремучую смесь (продукт действия радиоактивного препарата на воду), пары воды, CO_2 и углеводороды (продукты разложения вакуумной смазки).

Попытки выделения радона из неорганических солей радия показали, что даже при температуре, близкой к температуре плавления, радон из них полностью не извлекается. Высокой эманлирующей способностью обладают соли органических кислот (пальмитиновой, стеариновой, капроновой), а также гидроксиды тяжелых металлов. Для приготовления высокоэманлирующего источника соединения радия, как правило, соосаждается с бариевыми солями указанных органических кислот или гидроксидами железа и тория. Эффективным является также выделение радона из водных растворов солей радия. Обычно растворы радия оставляют на некоторое время в ампуле для накопления радона; через определенные промежутки времени радон откачивают. Выделение радона после очистки, как правило, осуществляется физическими методами, например, адсорбцией активированным углем с последующей десорбцией при 350°C .

Техника получения и дальнейшей очистки радона должна включать строгие меры предосторожности, исключающие утечку газа: несмотря на свою химическую инертность, радон является одним из наиболее токсичных и опасных ядов, что обусловлено его радиоактивными свойствами. Для получения радона через водный раствор любой соли радия продувают воздух, который уносит с собой образующийся при радиоактивном распаде радия радон. Далее воздух тщательно фильтруют для отделения микрокапель раствора, содержащего соль радия, которые могут быть захвачены током воздуха. Радон извлекают сорбированием на пористых телах или химическими методами. Радон получают также кипячением или откачиванием растворов солей радия, в которых элемент накапливается в результате распада радия.

Методы очистки радона от примесей основаны на его химической инертности. Кислород и большая часть водорода удаляются из газовой смеси пропусканием её над медью или окиси меди при повышенной температуре. Пары органических веществ окисляются при прохождении газов над нагретым бихроматом свинца, а пары воды поглощаются фосфорным ангидридом. CO_2 и пары кислот удаляются щёлочью, после чего радон замораживается жидким азотом, а гелий и водород откачиваются. Удобный метод очистки радона основан на связывании примесей барием. Он заключается в следующем: в откачанный колокол вводится газовая смесь, содержащая радон; в колоколе между электродами находится 0,5 г металлического бария. После введения радона в колокол барий нагревают до его испарения. При этом вода, CO_2 и некоторые другие примеси связываются барием, а радон вымораживается в ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Очищенный радон собирается либо в капилляре, либо на охлаждённых металлических поверхностях.

Помимо физических методов улавливания радона (адсорбционные, криогенные и др.), эффективное выделение радона из газовой смеси может быть достигнуто путем превращения его под действием окислителей в нелетучую химическую форму. Так, радон практически количественно может быть поглощён солями состава ClF_2SbF_6 , BrF_2SbF_6 , O_2SbF_6 и некоторыми жидкими фторогаллидами в результате образования нелетучих солей состава RnF^+X^- , где X^- — сложный анион.

Выделение искусственно получаемых изотопов радона, в основном ^{211}Rn ($T = 14 \text{ ч}$), связано с отделением его от материала мишени — тория и сложной смеси продуктов реакций глубокого отщепления.

Определение изотопов радона, находящихся в естественных радиоактивных рядах, производится с большой чувствительностью по α -излучению, испускаемому ими самими и их короткоживущими продуктами радиоактивного распада. Приборы для измерения изотопов радона называются эманометрами

Применение специальных камер для определения ионизации, вызываемой измеряемым радиоактивным газом, даёт возможность наиболее полно использовать его α -излучение. Ионизационная камера с определяемым радоном для измерения его радиоактивности присоединяется к высокочувствительному электрометру. Радиоактивность короткоживущих изотопов радона (торон, актинон) измеряют при непрерывном продувании воздуха через источник эманации и ионизационную камеру. Наиболее перспективным методом измерения малых количеств радона является α -сцинтилляционный метод. Эманационный сцинтилляционный счётчик представляет собой фотоэлектронный умножитель, к которому с помощью оптического ввода присоединена специальная камера для измерения эманации.

Исторически первым и наиболее распространённым является радиометрический метод определения радона по радиоактивности продуктов его распада и сравнению ее с активностью эталона. Изотоп ^{222}Rn может быть определен и непосредственно по интенсивности собственного α -излучения. Удобным методом определения радона в воде является экстракция его толуолом с последующим измерением активности толуольного раствора с помощью жидкостного сцинтилляционного счетчика. При концентрациях радона в воздухе значительно ниже предельно допустимых определение его целесообразно проводить после предварительного концентрирования путем химического связывания подходящими окислителями, например BrF_2SbF_6 , O_2SbF_6 и др.

Измерение концентрации радона в рудниках обычно проводят отбором проб в подземных выработках с последующим измерением их на поверхности. Пробы отбирают в сцинтилляционные баллоны или откаченные металлические контейнеры. В качестве коллектора используют также активированный древесный уголь. Для непрерывного определения концентрации радона в руднике применяют стационарную и переносную аппаратуру. Воздух непрерывно прокачивается в прибор через соответствующий фильтр (обычно в ионизационную камеру) и в каждый момент ионизация регистрируется либо на стрелочном приборе, либо компьютером. Измерение дочерних продуктов радона в воздухе проводят для оценки облучения, регулирования проветривания и т.д. Выбор метода зависит от цели измерения, а также от требуемой быстроты, чувствительности и точности.

2.4 Применение

В лечебных целях при различных, преимущественно хронических, заболеваниях применяют радоновые ванны, а также орошение и ингаляции, терапевтический эффект которых связан с радиационным воздействием всосавшегося радона и продуктов его распада. Нижний предел концентрации радона для отнесения вод к радоновым — 185-370 Бк/л. В отечественной бальнеотерапии по концентрации радона выделяют следующие разновидности радоновых вод: очень слаборадоновые (185-740 Бк/л), слаборадоновые (744-1480 Бк/л), радоновые средней концентрации (1481-2960 Бк/л), высокорудоновые (2961-4440 Бк/л), очень высокорудоновые (более 4450 Бк/л). Радонотерапия (разновидность альфа-терапии) — один из видов лучевой терапии с использованием очень малых доз излучения. Основным действующим фактором является α -излучение радона и его короткоживущих дочерних продуктов. При лечении радоновыми ваннами в основном облучается кожа, при питье — органы пищеварения, при ингаляциях — органы дыхания.

Радоновые ванны (т.е. ванны из воды естественных источников, содержащих радон, или воды, искусственно насыщенной радоном) издавна занимают заметное место в арсенале курортологии и физиотерапии. Растворенный в воде радон оказывает положительное воздействие на центральную нервную систему, на многие функции организма. Радоновые ванны используются при лечении ряда заболеваний, связанных с обменом веществ, при заболеваниях суставов и периферической нервной системы, сердечно-сосудистых, кожных, ревматизма, радикулита и т.д. Радоновые ванны — эффективное средство лечения многих заболеваний — сердечно-сосудистых, кожных, а также нервной системы. Иногда радоновую воду прописывают и внутрь — для воздействия на органы пищеварения. Эффективны также радоновые грязи и вдыхание обогащенного радоном воздуха.

Для радоновых ванн и гинекологических орошений применяют обычно радоновые воды концентрацией радона 1480—2960 Бк/л (концентрация естественных радоновых вод может быть и ниже) при температуре 34—37 °С. Продолжительность процедуры 5—20 мин. При лечении детей содержание радона в воде должно быть не выше 1,5 кБк/л. Доза радона на курс питьевого лечения — 37—111 кБк в сутки. В этом случае основная лучевая нагрузка приходится на группу внутренних органов и тканей (мЗв/курс): верхние отделы желудочно-кишечного тракта 13—16, жировые ткани 28, селезенка 12, почки 11, печень 4,4 и надпочечники 3,7. Весь организм в среднем получает 0,9 мЗв/курс.

В сельском хозяйстве радон используется для активации кормов домашних животных, в металлургии в качестве индикатора при определении скорости газовых потоков в доменных печах, газопроводах. В геологии измерение содержания радона в воздухе применяется для поиска месторождений урана и тория, а также для измерения плотности и газопроницаемости горных пород. Засасывая воздух из буровых скважин с разных горизонтов, по содержанию радона определяют свойства горных пород на больших глубинах. По эманационным аномалиям геофизики судят о содержании радиоактивных руд в различных участках земной

коры. Измерение повышения концентрации радона подземных водах, находящихся близ эпицентра землетрясения, обеспечивает эффективный прогноз землетрясений.

Хорошие адсорбционные способности радона позволяют использовать его для декорирования неоднородностей поверхности материалов. Эманирование – выделение радона твердыми телами, содержащими материнский элемент, зависит от температуры, влажности и структуры тела и меняется в очень широких пределах. Отсюда большие возможности эманационного метода исследования твердых веществ и твердофазных превращений в промышленности и науке. Эманационный метод основан на измерении зависимости скорости выделения радона от физических и химических превращений, происходящих при нагревании твердых веществ, содержащих радий. Радон используется как зонд в диффузионно-структурном анализе, используемом для дефектоскопии конструкционных материалов. Радоновыми индикаторами испытываются герметичность. Радон помогает следить за ходом технологических процессов в производстве таких несходных материалов, как сталь и стекло. Радон применяется также при изучении диффузии и явлений переноса в твердых телах, при исследовании скорости движения и обнаружения утечек газов в трубопроводах.

2.5 Радон в окружающей среде

Радон вносит основной вклад в естественную радиоактивность атмосферного воздуха и уровни облучения окружающей среды и человека за счет естественных источников радиации. Природный радон, образующийся в радиоактивных рудах, постоянно поступает в гидросферу и атмосферу. Среднее объемное содержание Р. в атмосфере $6 \cdot 10^{-18} \%$.

Табл. 6. Изменение концентрации радона и торона с высотой на уровне моря.

^{222}Rn		^{220}Rn	
Высота, м	Содержание, %	Высота, м	Содержание, %
0,01	100	0	100
1	95	5	70
10	87	10	50
100	69	25	20
1000	38	50	5
7000	7	100	0,5

Радон встречается во многих материалах, откуда он может частично диффундировать в окружающую среду. Наибольшее содержание ^{222}Rn и ^{220}Rn наблюдается в приземном слое атмосферы. С увеличением высоты оно уменьшается (Табл. 3).

Концентрация радона в почвенном воздухе колеблется от 2,6 до 44,4 Бк/л. В

нижних слоях почвы содержание элемента заметно возрастает. В окрестностях Петербурга темп поступления радона в атмосферу равен $15,9 \cdot 10^{-10}$ Бк/ч с 1 м^2 почвы. Средняя концентрация радона с продуктами его распада в воздухе составляет $(3,7—11,1) \cdot 10^{-3}$ Бк/л.

Выделение радона из почвы уменьшается при наличии снежного покрова, повышении атмосферного давления и во время ливневых дождей. В суточных изменениях скорости эманирования, отличающейся по величине в два раза, максимум приходится на ночное время, минимум — на полуденное. Растворимость радона в воде представляет обратную функцию температуры. Чем выше температура окружающей среды, тем меньше радона в воде и наоборот.

Концентрация радона на высотах, начиная с 0,1 км над уровнем моря и до высот в 2—3 км, колеблется от $3,7$ до $37 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, но на больших высотах не превышает $3,7 \cdot 10^{-4}$ Бк/л. Концентрация радона на уровне земной поверхности в воздухе континентальных областей равна примерно $37 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, в прибрежных районах и на островах — $3,7 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, над океаном и в арктических областях — $0,37 \cdot 10^{-4}$ Бк/л.

Содержание радона в природных водах колеблется в широких пределах. В обычных питьевых и речных водах содержится около 3,7 Бк/л, в морской воде — 1,11 Бк/л. Концентрация 0,37 Бк/л характерна для озер и рек, концентрация 3,7—370 Бк/л — для грунтовых вод. Более высокие концентрации радона наблюдаются в водах некоторых минеральных курортов. Концентрацию порядка 37 Бк/л часто определяют в водопроводной воде из артезианских скважин. Если считать, что человек потребляет в день 0,3 л воды, содержащей 37 Бк/л ^{222}Rn , то расчетная поглощенная доза для желудка равна примерно 0,02 мГр/год, а доза для облучения всего тела в 100 раз меньше.

Антропогенными источниками поступления ^{222}Rn в атмосферный воздух являются растения и грунтовые воды (менее 10 ЭБк/год), природный газ (около 100 ТБк/год), сжигаемый каменный уголь (около 10 ТБк/год), образование этого радионуклида в домах (примерно 10 ПБк/год). К локальным источникам поступления ^{222}Rn в атмосферу можно также отнести геотермальные энергетические станции, добычу фосфатов, вулканическую активность. Концентрация радона в помещениях в 4—6 раз выше, чем в атмосферном воздухе. Основная часть радона в помещениях накапливается из строительных материалов. Радиоактивность подвального воздуха в 8—25 раз выше радиоактивности атмосферного воздуха. Радон может распространяться на большие расстояния от мест своего образования и накапливаться в атмосфере зданий. Как показали многочисленные исследования, объемная активность радона в воздухе жилых помещений может изменяться от нескольких Бк/м до 100000 Бк/м.

Средняя концентрация радона для всех изолированных помещений составляет 0,16 Бк/л, в США по нормативу — 0,15 Бк/л.

Табл. 7. Эквивалентные равновесные концентрации радона и мощность эквивалентной дозы в жилых домах различных стран (коэффициент равновесия равен 0,5):

Страна	Здание, помещение	Эквивалентная равновесная концентрация, Бк/м ³	Мощность эффективной эквивалентной дозы, мЗв/год
Австрия (Зальцбург)	Среднее значение	12	0,7
Венгрия	Изолированные квартиры	20	1,2
Великобритания	Дома на одну семью	15	0,92
Великобритания	Среднее значение	13	0,79
Дания	Подвальное помещение, толстые строительные элементы	4,8	0,3
Канада	Типичные канадские дома	17	1,0
Норвегия	Квартиры, кроме первого этажа	11	0,7
	Среднее значение	26	1,6
Польша	Среднее значение	6—17	0,36—1,0
СССР	Квартиры, кроме первого этажа	4,8	0,29
	Дома на одну семью и квартиры в первых этажах	16	0,98
США (Нью-Джерси, Нью-Йорк)	Среднее значение	15	0,92
Финляндия	Квартиры, кроме первого этажа	17	1,0
ФРГ	Среднее значение для 32 домов	8,1	0,5
Швеция	Среднее значение	60	3,7
Разные страны	В основном каменные дома и жилые помещения в многоквартирных домах	18	1,1

В процессе распада радон образует несколько твердых радиоактивных дочерних продуктов в виде частиц очень малых размеров (около 10⁻⁴ мкм). Физические характеристики образующегося радиоактивного аэрозоля влияют на задержку и распределение в дыхательной системе α-излучающих радионуклидов. Для урановых рудников характерна концентрация порядка 3,7 Бк/л.

Средняя концентрация ²¹⁰Pb в приземных слоях атмосферы Северного полушария составляет примерно 0,5 мБк/м³. Соотношение активности ²¹⁰Pb/²¹⁰Po, содержащемся в почве, равно 0,2. С вдыхаемым воздухом в организм человека в среднем поступает 4,0 и 0,8 Бк/год ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po соответственно. При температуре сгорания табака оба радионуклида становятся летучими. Около 10% ²¹⁰Pb и 20% ²¹⁰Po,

содержащихся в табаке сигарет, попадают в легкие человека вместе с основной струей дыма. Годовое поступление ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po в легкие человека, выкуривающего одну пачку сигарет в сутки, составляет 16 и 60 мБк соответственно. С продуктами питания в организм людей, проживающих в районах с нормальным радиационным фоном, в среднем в год поступает по 40 Бк ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po. В районах Крайнего Севера России и приарктических районах Северного полушария (Швеции, Норвегии, Финляндии, Канады, Аляски) поступление этих радионуклидов в организм коренных жителей значительно выше вследствие миграции ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po по специфической северной экологической цепочке.

Страна	Годы	Средняя концентрация дочерних продуктов Р., РУ	Средняя годовая экспозиция по дочерним продуктам Р., РУМ	Число горняков, получивших более 4 РУМ *
<i>Урановые рудники</i>				
Франция	1971	0,18	—	—
	1972	0,17	—	—
	1973	0,18	—	—
	1974	0,13	—	—
	1975	0,11	—	—
	1978	—	2,0	140
США	1979	—	1,4	51
	1975	0,71	5,68	—
	1976	0,58	4,64	—
	1977	0,51	4,08	—
Италия	1975	<1	—	—
Канада карьер	1978	—	0,72	9
	1979	—	0,74	1
Аргентина рудник карьер	1977—1979	—	2,4	—
	1980	—	2,4	8
	1980	—	0,12	0
<i>Неурановые рудники</i>				
Финляндия	1972—1974	0,2—0,4	—	—
	1975—1977	—	0,38	—
Италия	1975	0,01—0,6	—	75
	1972	0,07	0,64	—
Норвегия	1980	0,05	0,45	—
	1970	—	4,8	2000
Швеция	1974	—	2,1	360
	1975	—	1,9	270
	1976	—	1,7	225
	1977	—	1,6	475
	1978	—	0,9	270
	1979	—	0,7	0
	1980	—	0,7	0
	1976	—	—	—
Великобритания угольная промышленность	1968	0,01 **	—	560
	1976	—	2—3 **	—
	1981	—	0,12	—
	1981	—	0,24	—
США другие рудники кроме угольных	1981	—	2,60	94
	1975	0,31	—	—
	1976	0,22	—	—
	1977	0,12	—	—

Табл. 8. Концентрации дочерних продуктов радона в урановых и неурановых рудниках

Табл. 8. Концентрации дочерних продуктов радона в урановых и неурановых рудниках

Некоторые страны при нормировании дочерних продуктов радона используют единицы РУ и РУМ. РУ (рабочий уровень) является единицей концентрации в 1 л воздуха любого сочетания короткоживущих дочерних продуктов ²²²Rn, при котором суммарная энергия α-излучения полного распада до ²¹⁰Pb (скрытая энергия) равна 1,3·10⁵ МэВ. Это значение соответствует «скрытой энергии» короткоживущих дочерних продуктов радона, равновесных с 3,7 Бк ²²²Rn. РУМ (рабочий уровень —

* Максимально допустимая экспозиция во многих странах.
 ** Типичное значение для больших национализированных шахт.
 *** На основании измерений примерно в 80 % всех угольных рудников.

месяц) представляет собой единицу облучения, являющуюся результатом экспозиции при 1 РУ в течение 1 мес. (имеется в виду рабочий месяц, равный 170 ч).

Радон тяжелее воздуха и поэтому скапливается в подвальных помещениях, на нижних этажах зданий, в шахтах и т. п. Присутствует в воздухе зданий, выполненных из любых строительных материалов (в деревянных — в меньшей, в кирпичных и особенно бетонных — в большей степени). В настоящее время во многих странах проводят экологический мониторинг концентрации радона в домах, так как в районах геологических разломов его концентрация иногда превышает допустимые нормы. ПДК радона в воздухе помещений 100 Бк/м³. Предельно допустимое поступление радона через органы дыхания равно 146 МБк/год.

2.6 Санитарно-гигиенические аспекты

Радон сильно токсичен, что связано с его радиоактивными свойствами. При распаде радона образуются нелетучие радиоактивные продукты (изотопы Po, Bi и Pb), которые с большим трудом выводятся из организма. Поэтому при работе с радоном необходимо использовать герметичные боксы и соблюдать меры предосторожности.

Главный источник поступления в организм человека эманации и короткоживущих продуктов их распада — воздух (особенно воздух предприятий, где добывают и перерабатывают радиоактивные руды); второстепенные источники — питьевая вода, распад изотопов радия, инкорпорированного в скелете, радоновые процедуры, применяемые в медицинских учреждениях. Основной путь их проникновения в организм — органы дыхания, но в зависимости от обстановки (например, при питье радоновой воды), эту роль может выполнять ЖКТ и очень редко — при приеме радоновых ванн — кожа. Суточное поступление с пищей продуктов распада радона колеблется от $(22—26) \cdot 10^{-2}$ Бк для жителей юга России до $(74—148) \cdot 10^{-2}$ Бк для оленеводов Крайнего Севера.

Изотопы радона — инертные газы, и поэтому распределение их в организме существенно отличается от поведения их продуктов распада. Радон легко растворяется в крови, воде и других жидкостях организма, значительно лучше растворяется в жирах, что обуславливает эффективное поглощение его жировыми тканями при поступлении в организм. Концентрация изотопов радона в крови после достижения стационарного состояния (практически через 1 ч после начала ингаляции для ²²²Rn и около 5 мин для ²²⁰Rn) определяется их содержанием в воздухе и не зависит от времени экспозиции, составляя для ²²²Rn примерно 30—45% концентрации во вдыхаемом воздухе. При ингаляции ²²⁰Rn это значение равно 4% для человека и 30% для крысы.

При ингаляции радон распределяется сравнительно равномерно во всем теле, за исключением жира, надпочечников и костей. Доза за счет радона составляет 1% дозы, создаваемой дочерними продуктами распада радона. При питье воды преимущественное накопление радона происходит в ЖКТ, жировой ткани и мозге. В первые 10—15 мин после введения наблюдается резкое увеличение содержания радиоактивности во всех органах и тканях, при этом основная часть ее быстро выделяется из организма с выдыхаемым воздухом. Через 2—3 ч в большинстве органов и тканей остаются лишь следы радона и продуктов его распада. Радон может проникать в организм и через неповрежденную кожу. При приеме обычной радоновой ванны продолжительностью 20 мин в организм через кожу проникает и накапливается (в основном свыше 90% в жировых тканях) около 0,5% радона содержащегося в ванне; на коже в отсутствие активного перемешивания воды относительно тела оседает около 2% содержащихся в ванне продуктов распада.

Выведение радона из организма независимо от способа введения осуществляется главным образом через легкие (90% общего количества при ингаляции, 60% — после купания), а также через кожу (около 40% после купания) и отчасти с мочой (0,1 — 0,25%). Около 90% радона выделяется из организма человека за 1 ч, полностью — за 6—7 ч. T₆ ²²⁰Rn из крови составляет 4,5 мин, поэтому почти весь торон распадается прежде, чем вновь попадает в легкие. Концентрация ²²⁰Rn в воздухе легких из-за небольшого T₆ никогда не достигает его концентрации в атмосфере.

Короткоживущие продукты распада изотопов радона, попадая в ЖКТ (с водой, пищей, в процессе самоочищения легких и т. д.), практически не достигают его стенок и распадаются в его содержимом и слизистом отделяемом, не поступая в кровь. При поступлении в ЖКТ долгоживущих продуктов распада резорбция их в кровь зависит от химических свойств вещества, физиологического состояния пищеварительного тракта, состава пищевого рациона и т. д. Резорбция ²¹⁰Po из ЖКТ принята равной 6, ²¹⁰Pb — 8, ²¹⁰Bi — 1%. Коэффициенты всасывания радиоактивных изотопов с неповрежденной кожи малы по сравнению с соответствующими значениями для ЖКТ и легких. Проницаемость хлорида ²¹⁰Po через кожу человека составляет около 2% в сутки, нитрата ²¹⁰Po — 0,16% за 8 ч.

Из короткоживущих продуктов распада изотопов радона достигнуть других органов могут только ThВ (²¹²Pb) и ThС (²¹²Bi). Распределяются эти изотопы, попавшие в кровяное русло при ингаляции, неравномерно, их содержание в различных органах 5-часовой ингаляции различается до 30 раз. С прекращением ингаляции наблюдается снижение содержания ThВ и ThС в легких и селезенке, тогда как в других органах и тканях происходит дальнейшее их накопление, связанное с их перераспределением в организме.

Распределение долгоживущих продуктов распада радона, как и других радионуклидов, определяется их химическими и физико-химическими свойствами. ^{212}Pb накапливается в значительных количествах в костях, зубах и ногтях человека; ^{210}Bi в основном концентрируется в печени, почках и легких. ^{210}Po обнаруживается практически во всех органах и тканях, но значительные его количества определены в печени, мышцах, крови и почках. Выведение его осуществляется преимущественно через ЖКТ и почки, причем 0,9 ^{210}Po экскретируется с калом и только 0,1 с мочой; T_6 соответственно равны 37 и 35,7 сут. Средний $T_{\text{эфф}}$ ^{210}Po из всего организма составляет 37 сут.

Среди радиоактивных ядов радон – один из самых опасных. Уже через час после введения в кровь кролику сравнительно небольшой дозы радона, 10 микрокюри, количество лейкоцитов в крови резко сокращается. Затем поражаются лимфатические узлы, селезенка, костный мозг. 26-суточное вдыхание радона в концентрации 37 Бк/л вызывает гибель мышей через 22—30 сут. На вскрытии: истощение, атрофия внутренних органов, лимфатических узлов; дегенерация почек и печени. Однократная ингаляция радона в концентрации 133 МБк/л в течение 5 мин вызывает 100 % гибель мышей через 40 сут. У животных развиваются токсическая пневмония, лейкоцитоз; перед гибелью — лимфопения. При 4-часовой ингаляции радона в концентрации 2,96 МБк/л у крыс отмечены отек легких, очаговая эмфизема, поражение бронхов; в отдаленные сроки — развитие новообразований. После вдыхания радона из 58 мышей, погибших за 2 года, у 18 обнаружены рак и аденома легких, аденома щитовидной железы, генерализованный лимфаденоз.

Попадая в организм человека, радон способствует процессам, приводящим к раку лёгких. Распад ядер радона и его дочерних изотопов в легочной ткани вызывает микроожог, поскольку вся энергия альфа-частиц поглощается практически в точке распада. Особенно опасно (повышает риск заболевания) сочетание воздействия радона и курения. Радионуклиды радона обуславливают более половины всей дозы радиации, которую в среднем получает организм человека от природных и техногенных радионуклидов окружающей среды.

Исторически впервые рак легких был обнаружен в конце XIX века у шахтеров рудников Шнееберга и несколько позднее — Яхимова (Иоахимсталя), находившихся соответственно на территории современных Германии и Чехии. Более чем в 50 % случаев (до 60—80%) причиной их смерти был рак легких, преимущественно бронхогенного типа. Наблюдавшаяся смертность в 30—50 раз превышала ожидаемую. Характерно, что возраст горняков на момент смерти от рака легких в большинстве случаев не превышал 50—55 лет, а заметная доля их умирала даже моложе 40 лет. Латентный период — время от начала работы в руднике до смерти от рака легких — составлял в Шнееберге 15—18 лет, в Яхимове—13—25 лет. Концентрация радона в рудниках колеблется в пределах 10—700 кБк/м³.

Широкую известность получили данные 1964 г. по «радоновому» раку легких у горняков флюоритовых рудников Ньюфаундленда, где из 750 горняков 30 человек умерло от рака легких, т. е. в 40 раз выше ожидаемого количества, причем средний возраст умерших составил 48 лет при среднем возрасте на момент смерти по этой причине мужского населения 64 года. К 1977 число умерших от рака легких горняков этой группы достигло 78 человек, минимальный латентный период при этом составлял 12 лет, средний — 23 года. На ряде урановых рудников провинции Онтарио (Канада) в группе 8,5 тыс. горняков за период 1955—1972 отмечены 42 случая смерти от рака легких, в группе 15 тыс. горняков — 81 случай, что оказалось соответственно в 3 и 2 раза выше ожидаемого количества, причем выявленные случаи заведомо составляют лишь некоторую часть от их полного числа за указанный период.

По данным различных эпидемиологических исследований, относительный риск рака легких у шахтеров колеблется от 4 до 21. Превышение частоты рака легких у шахтеров связано главным образом с кумулятивной дозой. Показано усиливающее действие курения в возникновении рака легких. Установлено, что латентный период рака легких у курящих шахтеров на 3—12 лет короче, чем у некурящих. Экспозиция радона в жилых помещениях ответственна за 1-10 % рака легких в генеральной популяции.

Базальные клетки бронхиального эпителия являются клетками-мишенями, повреждение которых приводит к развитию бронхиального рака. В связи с этим проводятся оценки доз, которые получают именно эти клетки при ингаляции коротко-живущих продуктов распада радона и других α -излучающих радионуклидов (^{234}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Am). Доза в трахеобронхиальной области существенно зависит от возраста, понижаясь с его увеличением. Максимальная доза приходится на возраст 6 лет. Относительный риск возникновения рака легкого от облучения продуктами распада радона у детей в возрасте до 10 лет выше, чем у взрослых.

Исследования, выполненные в разных странах, показывают, что медианное значение эквивалентной равновесной концентрации дочерних продуктов радона в воздухе жилых помещений составляет 8—25 Бк/м³. Это означает, что эквивалентная доза в бронхиальном эпителии приблизительно в 10 раз выше доз от всех природных источников радиации в других органах и тканях человека. Вклад облучения легких в эффективную эквивалентную дозу от всех источников составляет 40—50 %. Удвоение частоты раков легких по сравнению с необлученным населением следует ожидать у людей, облучающихся в течение жизни

дочерними продуктами радона при их концентрации в воздухе жилых помещений, равной 300—500 Бк/м³. Предполагают, что 20% раков бронхов обусловлены воздействием радона и продуктами его распада.

Для работников категории А значения ПДП и ДКА ²¹⁹Am, ²²⁰Th и ²²²Rn (без продуктов их распада) равны 146 МБк/год и 55,5 Бк/л соответственно; значения ПДП и ДКА для короткоживущих продуктов распада этих радионуклидов при любом сдвиге равновесия определяют следующим образом:

ПДП
 $0,1Q_{RaA} + 0,5Q_{RaB} + 0,4Q_{RaC} = 2,78 \text{ МБк/год}; 0,9Q_{ThB} + 0,1Q_{ThC} = 0,22 \text{ МБк/год};$
 $0,94Q_{AcB} + 0,06Q_{AcC} = 4,88 \text{ МБк/год}.$

ДКА
 $0,1 C_{RaA} + 0,5C_{RaB} + 0,4C_{RaC} = 1,11 \text{ Бк/л}; 0,9C_{ThB} + 0,1C_{ThC} = 0,0877 \text{ Бк/л}, 0,94C_{AcB} + 0,06C_{AcC} = 1,77 \text{ Бл/л},$ где Q и C соответственно поступление (Бк/год) и усреднённая за год концентрация (Бк/л).

Табл. 9. Нормативы МАГАТЭ для радона и торона.

Радионуклид	ПГП, Бк	ПКВ*, Бк/м ³	ПГЭ, Бк·ч/м ³
²²² Rn ²²⁰ Th + ²¹⁶ Po	$3,6 \cdot 10^8$ $6 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^6$ $2,5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^8$ $5 \cdot 10^8$

* Среднюю скорость дыхания принимают равной 1,2 м³/ч в течение рабочего периода (2000 ч в год).

Указанные выше значения ПДП и ДКА в единицах «скрытой энергии» (энергии, выделяющейся при полном распаде коротко живущих дочерних продуктов ²²²Rn до ²¹⁰Pb, ²²⁰Th до ²⁰⁸Pb, ²¹⁹Ac до ²⁰⁷Pb) соответствуют 9,6 - 10¹⁰ МэВ/год и 3,8·10⁴ МэВ/л. Для категории Б правые части приведенных выше

соотношений и значения «скрытой энергии» должны быть уменьшены для ПГП в 10 раз, для ДКБ — в 30 раз.

Годовой предел эффективной эквивалентной дозы для работающих составляет 0,05 Зв. Это значение рекомендовано на основе концепции риска с учетом линейной зависимости доза—эффект. Исходя из этого, индивидуальная годовая экспозиция по дочерним продуктам ²²²Rn должна быть ограничена таким же уровнем риска, как и риск, соответствующий пределу эффективной дозы 0,05 Зв при использовании пересчетного коэффициента риска также от требуемой быстроты, чувствительности и точности.

Применение фильтрующих респираторов эффективно защищает дыхательные пути от проникновения в организм дочерних продуктов распада радона. Защита в среднем составляет 84%. Правильное использование эффективного фильтра (обладающего низким сопротивлением) может обеспечить коэффициент защиты 10—20. В этих условиях облучение дочерними продуктами радона составит 10 % рассчитанного без использования защиты в виде респиратора.

Определенные типы противогазных коробок, содержащих около 900 см³ сухого активированного угля, удаляют 96—99 % поступающего радона в течение 1 ч. Защита от радона, обеспечиваемая активируемым углем, увеличивается с понижением температуры и снижается с возрастанием скорости потока воздуха, влажности и содержания воды в угле. Уголь может быть регенерирован пропусканием через него сухого воздуха.

При работе с радоном необходимо использовать герметичные боксы и соблюдать меры радиационной безопасности.

Неотложная помощь требует срочно вывести пострадавшего из загрязненной атмосферы. Свежий воздух, вдыхание карбогена. Промывание полости рта и носоглотки 2% раствором NaHCO₃.