

РАДОН: ВРАГ, ВРАЧ и ПОМОЩНИК
Курс лекций

Лекция 2. ПРОБЛЕМА РАДОНА

Содержание

1. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ РАДОНА	4
2. СВОЙСТВА РАДОНА.	6
3. ПРИМЕНЕНИЕ РАДОНА	9
3.1 Медицина	9
3.2 Материаловедение	9
3.3 Ядерная геофизика	10
4. ОПАСНОСТЬ И ПОЛЬЗА РАДОНА	13
4.1 Опасность радона	13
4.2 Польза радона	15
4.3 Радон друг или враг?	17
5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ РАДОНА	18

*Беспощадный убийца, незаметно
проникающий в наши дома.
Газ-убийца, крадущийся из-под земли.
Из газет.
Радонотерапия - универсальное
средство лечения многих заболеваний.
Энциклопедия*

Наиболее важными с экологической точки зрения природными радионуклидами являются уран (изотопы ^{238}U и ^{235}U) и торий (^{232}Th). При распаде этих изотопов образуются семейства генетически связанных радионуклидов (радиоактивные ряды, члены которых являются α -, β - и γ -излучателями, материнскими изотопами которых и являются указанные выше радионуклиды). Среди дочерних продуктов распада особое значение имеют изотопы радия и радона. Подвижность многих дочерних радионуклидов в земной коре значительно выше, чем материнских. Поэтому эти радионуклиды оказываются вездесущими и в рассеянном состоянии присутствуют практически всюду. Ионизирующее излучение дочерних радионуклидов урана и тория вносит заметный вклад в радиационный фон (фон ионизирующего излучения) Земли.

Особенно велика роль в радиационном воздействии на человека входящего в ряд ^{238}U радионуклида ^{222}Rn и продуктов его распада («активного налёта»). Наряду с радионуклидами тяжелых элементов в природе существуют и радионуклиды некоторых элементов середины Периодической системы. Наибольшее значение среди них имеет ^{40}K ($T_{1/2} = 1,29 \cdot 10^9$ лет), входящий в смесь природных изотопов калия. На долю ^{40}K в ней приходится 0,012%. Калий - один из самых распространенных элементов земной коры. Растения усваивают необходимый для их питания калий (и, следовательно, ^{40}K) из почвы. Далее по пищевым цепям ^{40}K попадает в организмы животных и человека. Естественные радиоактивные изотопы обнаружены не только у калия, но и у таких элементов, как рубидий (^{87}Rb), индий (^{115}In), лантан (^{138}La), у некоторых лантаноидов, у гафния (^{174}Hf), тантала (^{180}Ta) и платины (^{190}Pt). Значения $T_{1/2}$ этих радионуклидов, как правило, велики и составляют 10^{12} - 10^{14} лет. Поэтому радиоактивность веществ, содержащих эти элементы, очень низкая, и их ионизирующее излучение практически не влияет на живые организмы. Так что можно совершенно не беспокоиться, например, о вреде для здоровья платинового ювелирного изделия, всегда содержащего радионуклид ^{190}Pt .

По разным причинам на одних участках земной коры содержание природных радионуклидов более высокое, чем на других. Из-за этого фон по поверхности Земли заметно меняется. Кроме природных радионуклидов по всей поверхности Земли, включая поверхность океанов, имеются и техногенные радионуклиды, причём качественный и количественный состав их существенно неоднороден, так что дозовая нагрузка на население изменяется в широких пределах. Интенсивность космического излучения также различна в различных регионах мира. При оценке дозовой нагрузки на население, следует учитывать контакты профессионалов с промышленными источниками радиации, врачей, больных и населения в целом с источниками ионизирующей радиации медицинского назначения (диагностических и терапевтических) назначения, а так же отдыхающих на радоновых курортах. В оценке роли радиации в развитии человеческой популяции следует учитывать не только неравномерность распределения источников радиации по поверхности нашей планеты. Плотность населения так же крайне неравномерна (как правило, чем выше радиационный фон в данной местности, тем более плотно она заселена). Кроме того, население интенсивно мигрирует, пересекая зоны повышенной и пониженной интенсивности радиационного поля. Следует так же помнить, что в последние миллионы лет интенсивность радиационного поля на уровне океана постоянно уменьшалась из-за распада естественных радионуклидов, остывания Солнца и т.п. (если не считать отдельных всплесков космического излучений при взрыве сверхновых звёзд в окрестностях нашей Галактики). Так что некоторый рост дозы за счёт техногенных радионуклидов и медицинских процедур лишь незначительно компенсировал потерю привычного нам с древнейших времён облучения.

Установлено, что основной радиационный фон на нашей планете (по крайней мере, пока) создается за счет естественных источников излучения. Общий вклад естественного облучения в дозовую нагрузку составляет около 72%. Вклад космического излучения в общую дозу облучения человека от естественных источников составляет почти 14%. Внешнее и внутреннее естественное γ -излучение дает по 16% каждое. В результате доля естественных источников радиации в суммарной дозе, накапливаемой среднестатистическим человеком на протяжении всей жизни, составляет 87%. Оставшиеся 13% приходятся на источники, созданные человеком. Из них 11.5% (или почти 88.5% «искусственной» составляющей дозы облучения) формируется за счет использования радиоизотопов в медицинской практике. И только 1.5% являются результатом последствий ядерных взрывов, выбросов с атомных электростанций, утечек из хранилищ ядерных отходов и т.п. Среди естественных источников радиации «пальму первенства» уверенно держит радон, обуславливающий до 32% общей радиационной дозы (или 54% от вклада естественного излучения). Важно подчеркнуть, что более половины годовой дозы от всех природных источников излучения человек получает через воздух, облучая радоном и продуктами его распада свои легкие во время дыхания.

Опасность радона для человека заключается в том, что, будучи газом, он попадает в организм человека при дыхании и может вызвать пагубные для здоровья последствия, прежде всего - рак легких. По данным Службы Общественного Здоровья США (US Public Health Service) радон - вторая по серьезности причина возникновения у людей рака легких после курения. Согласно расчетам Британского бюро защиты от радиации, в Великобритании ежегодно погибают 2500 человек от рака легких, вызванного радоном. По данным Агентства окружающей среды, в США ежегодно 20 тыс. онкологических заболеваний инициируется радоном и продуктами его распада. В Голландии их 8000 смертей в год от рака лёгкого 1000 относят за счёт радона. Также остра проблема радиологического воздействия радона на население в Швейцарии, Швеции, Финляндии, Австрии и в некоторых регионах России (в отдельных местностях радоновое облучение на порядки может превышать средние величины).

Интерес к радиологическому воздействию радона на человека возник сразу после его открытия (1900 г.). Вскоре, именно радону было предъявлено обвинение в стимулировании известной с древних времён «горной болезни» - гибели рабочих шахт, добывающих серебро и полиметаллы (большинство таких шахт впоследствии оказались урановыми), железо и от рака лёгких. (Вторым обвиняемым оказался силикоз). В конце 70-х годов 20-го века начались подробные исследования возможного влияния «бытового» радона на здоровье населения. Первые

же исследования показали, что концентрация радона в воздухе жилых домов, особенно одноэтажных, часто превышает уровень предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для работников урановых рудников, где служба безопасности традиционно борется за снижение накопления радиологически опасных концентраций радона. Была обнаружена определённая корреляция (сильно смазанная курильщиками и эффектом миграции населения) между концентрацией радона в жилых домах и смертностью людей от рака лёгких в конкретном регионе. Причина видится в том, что поскольку радий входит во все строительные материалы, то образующийся из него тяжёлый радиоактивный инертный газ – **радон** - постоянно находится в воздухе жилых и служебных (офисы, учебные классы, больницы и т.п.) помещений. В результате население часто подвергается дополнительной дозовой нагрузке, способной привести к увеличению числа заболеваний раком легких.

Замечание. Почему-то отрицательного влияния радона в почве на червей, жуков, мышей, сусликов и других живых обитателей до сих пор не обнаружено. Большие концентрации радона в пещерах также не влияют на самочувствие популяции летучих мышей.

Наличие отрицательных биологических эффектов заставило поставить вопрос о защите отдельных людей и населения в целом от естественной радиации не только на урановых шахтах, ураноперерабатывающих предприятиях, угольных и железорудных шахтах, но и в жилых помещениях.

Радон – самый тяжёлый из благородных газов, которые раньше называли инертными газами. Он не имеет ни запаха, ни вкуса, прозрачен и бесцветен. Его плотность при 0°С равна 9,81 кг/м³, т. е. почти в 8 раз больше плотности воздуха. Поэтому радон накапливается в подвалах, горных выработках, пещерах, туннелях, глубоких ямах и т.п. Радон легко подвижен и атмосферными потоками переносится на большие расстояния, он также довольно хорошо растворим в воде, и перемешается вместе с грунтовыми и поверхностными водами.

Известно 19 изотопов радона (все – радиоактивны), из которых 3 являются природными: ¹¹⁹Rn (An, актинон, период полураспада, T_{1/2}= 3,92 сек), ²²⁰Rn (Tn, торон, T_{1/2}= 51,5 сек) и ²²²Rn (Rn, радон, T_{1/2} = 3,82 дн). ²²²Rn – образуется в ряду ²³⁸U, ²²⁰Rn – в ряду ²³²Th, ²¹⁹Rn – в ряду ²³⁵U. В 1 м³ воздуха при нормальных условиях содержится 7*10⁻⁶ г радона. Содержание радона в атмосфере оценивается порядка 7*10⁻¹⁷ вес. %.

Изотопы радона короткоживущие, но они никогда не исчезают из атмосферного воздуха, т.к. радон постоянно поступает в атмосферу из земных пород. Пород, содержащих изотопы урана и торий, в земной коре довольно много (например, граниты, фосфориты), поэтому убыль компенсируется поступлением, и в атмосфере существует некая равновесная концентрация радона. Изотоп ²²²Rn даёт примерно 50–55% дозы облучения, которое ежегодно получает каждый житель Земли от природных радионуклидов, изотоп ²²⁰Rn (торон) прибавляет к этому еще ~5–10%.

Казалось бы, роль этого крайне редкого, инертного, неустойчивого химического элемента в нашей жизни не может быть не только значительной, но даже просто заметной. Однако это не так.

Радон способен разрушать биологические объекты, вызывая у людей различные заболевания, в том числе такое опасное, как рак лёгких. Но радон способен и лечить человека, причём – от не менее опасных заболеваний.

Замечание. Когда речь заходит о радиации, и ее влиянии на все живое на Земле, в настоящее время господствует мнение, что от ионизирующих излучений одни неприятности. Это не так! Нужно учесть, что радиационностимулированные мутации, имевшие место в ходе развития жизни на Земле, способствовали эволюции видов. Более того, само возникновение жизни на Земле было бы невозможно без воздействия ионизирующих излучений. Ничто живое на Земле никогда не существовало вне радиационного поля, причём в ходе эволюции интенсивность этого поля снижалась. Земные организмы адаптировались к колебаниям естественного фона. Например, на продолжительности жизни людей, живущих в регионах Земли с заметно различающимся фоном ионизирующего излучения, значимые колебания фона никак не сказываются, более того, в некоторых местах с повышенным фоном средняя продолжительность жизни оказывается заметно больше, чем людей, живущих в регионах с низким естественным фоном. Достаточно упомянуть горцев-долгожителей всю жизнь проведших в поле интенсивного космического и земного гамма-излучения.

Особенности радона с экологической точки зрения заключаются в том, что

- радон - химически инертный, тяжёлый, радиоактивный газ; чистый α -излучатель;
- радон - родоначальник целого ряда радиоактивных превращений, продукты которых являются α -, β -, γ -излучателями (в основном – металлами) с временами жизни, варьирующимися в широких пределах;
- радон в природе существует в виде трёх изотопов различной экологической опасности; совместно с продуктами своего распада способен создавать как внешнее, так и внутренне (что особенно опасно) облучение живого организма;
- радон способен выделяться из источника как за счёт диффузии, так и за счёт эффекта отдачи (независимость эффекта отдачи от температуры обеспечивает постоянный поток радона при любых погодных условиях);
- большая подвижность радона приводит к сдвигам радиоактивного равновесия между ним и материнским нуклидом – радием, что затрудняет расчет активности одного нуклида по другому;
- в атмосфере сам радон диффундирует в атомарном виде, а продукты его распада – в виде аэрозолей (обычно – положительно заряженных), что приводит к сдвигам равновесия («нормальным» и «аномальным») между радоном и продуктами его распада;
- биологически радон действует как тяжёлый инертный газ (аналогично стабильному ксенону), легко растворимый в жирах, крови и лимфе, как источник основных видов ионизирующих излучений и, главное (!), как источник атомов отдачи – высокоэнергетических и высоко химически- и биологически активных ионов, способных пробивать оболочки клеток, стенки кровеносных сосудов и т.п., создавая высокую концентрацию радикалов и возбуждённых молекул.

В данной лекции мы приведем некоторые ознакомительные сведения по радону, его изотопам, продуктам его распада, а также коротко остановимся на различных аспектах проблемы радона.

1. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ РАДОНА

Изучая ионизацию воздуха, производимую радиоактивными веществами, супруги Кюри заметили, что различные тела, находящиеся вблизи радиоактивного источника (препарата радия, тория или актиния), приобретают радиоактивные свойства, которые сохраняются некоторое время после удаления радиоактивного препарата. Мария Кюри-Склодовская назвала это явление индуцированной активностью. Другие исследователи и, прежде всего Резерфорд, пытались в 1899/1900 гг. объяснить это явление тем, что радиоактивное тело образует некоторое радиоактивное истечение, или эманацию (от лат. *emanare* - истекать и *emanatio* - истечение), пропитывающие окружающие тела.

Основной изотоп радона - ^{222}Rn (радон), образующийся при распаде радия-226, открыт в 1900 г. Ф.Дорном. Газ оказался достаточно долгоживущим (период полураспада около 4 дней). Но еще в 1898 г. Э.Резерфорд и Р.Оуэнс, работая в Канаде, обнаружили, что соли тория выделяют некое газообразное вещество, способное диффундировать сквозь бумагу, переноситься воздухом и в течение некоторого времени сохранять свою активность, исчезающую по характерному закону (Работа опубликована в 1900 г.). Образование этого газа сопровождалось выделением гелия. Э.Резерфорд предложил для нового газа название эманация (*Emanation, истечение, исхождение*), точнее - «эманация тория». Впоследствии этот газ, ^{220}Rn ($T=54,5$ сек) был назван тороном (Tn), поскольку являлся членом радиоактивного семейства тория. При этом газ, открытый Дорном, получил название "эманация радия (Radium Emanation - Ra Em)", в последствии измененный на радон. Актинон, ^{220}Rn ($T=3,9$ сек) открыт французским химиком Анри Дебьерном в солях урана (точнее – актиноурана, урана-235). Вскоре Резерфорду и Содди удалось доказать, что эманация - это газообразное вещество, которое подчиняется закону Бойля и при охлаждении переходит в жидкое состояние, а причем с химической точки зрения эманация представляет собой инертный газ. В 1911 г. Рамзай определил (по плотности) атомный вес эманации радия и дал ей новое название "нитон (Niton)" от лат. *nitens* (блестящий, светящийся); этим названием он, очевидно, желал подчеркнуть свойство газа вызывать флюоресценцию некоторых веществ.

Эманация – первое историческое название радиоактивного элемента нулевой группы периодической системы с $Z=86$. Позже (1918) было принято более точное название радон (Radon) - производное от слова "радий". Эманации тория и актиния (изотопы радона) стали именовать тороном (Thoron, Tn) и актиноном (Actinon, An).

№ эле- мента	Эле- мент	И з о т о п ы						
		^{238}U 4.47*10 ⁹ лет		^{234}U 2.45*10 ⁵ лет				
92	U							
91	Ra	α ↓	^{234}Pa 1.17 мин И.П.(0,3%) ^{234}Pa 6.75 часа	β ↗	α ↓			
90	Th	^{234}Th 24.1 дня	β ↗	^{230}Th 7.7*10 ⁴ лет				
89	Ac							
88	Ra			^{226}Ra 1600 лет				
87	Fr							
86	Rn			^{222}Rn 3.825 дня		^{218}Rn 0.02 сек		
85	At				^{218}At ↗			
84	Po			^{218}Po 3.05 мин	↗	^{214}Po 1.6*10 ⁻⁴ сек		^{210}Po 138.38 дня
83	Bi				^{214}Bi 19,8 мин		^{210}Bi 5,01 дня 3,0*10 ⁶ лет	
82	Pb			^{214}Pb 26,8 мин	↗	^{210}Pb 22,3 года		^{206}Pb <u><u> </u></u>
81	Tl				^{210}Tl 1.32 мин		^{206}Tl 4.19 мин	

Рис. 1. Семейство урана ($4n+2$).

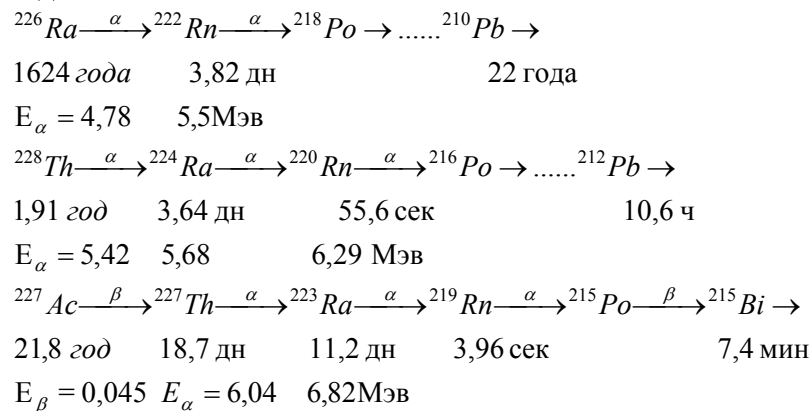
2. СВОЙСТВА РАДОНА

Rn 86 [222] $6s^2 6p^6 t^0$ кип. (°C) -61,9, Степ.окис. +2 +4 +6, t^0 плав. (°C) -71,0, Плотность 9,73 г/л, ОЭО 2,06 в зем. коре.

Применительно к радону эпитет «самый» можно повторять многократно: самый тяжелый, самый редкий, самый дорогой из всех существующих на Земле газов.

Радон - радиоактивный химический элемент нулевой группы периодической системы Менделеева; порядковый номер 86. Название элементу дано по наиболее долгоживущему изотопу ^{222}Rn ($T=3,8229$ дня), образующемуся в результате α -распада изотопа радия ^{226}Ra . Изотоп ^{222}Rn открыт в 1900 г. Ф.Дорном. В том же году Э.Резерфорд указал на существование другого изотопа радона ^{220}Rn ($T=54,5$ сек) - торона (Tn), являющегося членом радиоактивного семейства тория. В настоящее время известно 19 изотопов радона с массовыми числами 204-224. Искусственным путем получено 16 изотопов. Нейтронодефицитные изотопы с массовыми числами до 212 получают в реакциях глубокого расщепления ядер урана и тория высокоэнергичными протонами. Эти изотопы нужны для получения и исследования искусственного элемента астата. Три изотопа радона: радон (радон-222), Rn, торон (радон-220), Tn, и актинон (радон-219), An, являются короткоживущими членами трех природных радиоактивных рядов (^{238}U , ^{232}Th и ^{235}U , соответственно) и присутствуют в воздухе, воде и почве. В 1 м^3 воздуха при нормальных условиях содержится $7 \cdot 10^{-6}$ г радона.

В сокращенном виде ряды образования и распада изотопов радона можно представить в виде:



В более полном виде ряды урана и тория представлены на **Рис.1-3**.

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 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 ^{238}U $4,5 \cdot 10^9$ лет, ^{235}U $0,7 \cdot 10^9$, 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 соответствии с периодами полураспада материнских нуклидов. После длинной цепи преобразований образуются в конце концов стабильные изотопы свинца. Единственным газообразным продуктом, который рождается в процессе распада трех семейств естественных радионуклидов (ЕРЭ), является радон. Наибольший вклад в газовую составляющую ЕРЭ вносят радиоактивные семейства ^{238}U и ^{232}Th , в процессе распада которых образуются радиоактивные ^{222}Rn и ^{220}Rn (последний часто называют торон по имени исходного материнского нуклида).

№ эле-мента	Эле-МЕНТ	И з о т о п ы				
90	Th	^{232}Th 1.41·10 ¹⁰ лет		^{228}Th 1.91 года		
89	Ac	α	β	^{228}Ac 6.13 часа	α	
88	Ra	^{228}Ra 5.75 года			^{224}Ra 3,66 дня	
87	Fr			^{224}Fr 2,7 мин		
86	Rn				^{220}Rn 55,6 сек	
85	At					^{216}At 3·10 ⁻⁴ сек
84	Po				^{216}Po 0,145 сек	^{216}Po 3·10 ⁻⁷ сек 45,1 сек
83	Bi				^{216}Bi 60,5 мин 25 мин	
82	Pb				^{212}Pb 10,64 часа	^{208}Pb
81	Tl					^{208}Tl 3.05 мин

Рис. 2 Семейство тория (4n).

В процессе распада он продуцируют 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 α -излучения.

Например, при распаде семейства ^{238}U 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 α -излучения радона и ДПР во много раз выше интенсивности α -излучения урана и радия, вместе взятых.

№ эле-мента	Эле-мент	И з о т о п ы			
92	U	^{238}U $7,04 \cdot 10^8$ лет			
91	Pa		^{231}Pa $3,28 \cdot 10^4$ лет		
90	Th	^{231}Th 1,068 дня		^{227}Th 72 дня	
89	Ac		^{227}Ac 22 года		
88	Ra			^{223}Ra 11,2 дня	
87	Fr		^{223}Fr 21 мин		
86	Rn			^{219}Rn 3,92 сек	
85	At		^{219}At 0,9 мин		^{215}At 10^{-4} сек
84	Po			^{215}Po $1,83 \cdot 10^{-3}$ сек	^{211}Po $5 \cdot 10^{-3}$ сек
83	Bi	^{215}Bi 7,4 мин			^{211}Bi 2,14 мин
82	Pb			^{211}Pb 36,1 мин	^{207}Pb
81	Tl				^{207}Tl 4,77 мин

Рис.3 Семейство актиния (4n+3)

Радон и торон, как и их материнские нуклиды, присутствуют во всех строительных материалах и горных породах. В природе радона очень мало — его можно отнести к числу наименее распространенных на нашей планете химических элементов. Содержание радона в атмосфере оценивается величиной порядка $7 \cdot 10^{-6}$ г/м³ или $7 \cdot 10^{-17}$ вес.%. В земной коре его также очень мало — он же образуется преимущественно из радия, довольно редкого элемента.

При комнатной температуре радон - газ, состоящий из одноатомных молекул. Оптический спектр радона аналогичен спектру ксенона и др. элементов нулевой группы. Строение электронной оболочки атома радона $6s^2 6p^6$; ковалентный радиус 2,14 А; энергия ионизации $Rn^0 - Rn^+$ 10,746 эв. Плотность газа 9,73 г/л, жидкого 4,4 г/см³ (при -62°C), твердого 4 г/см³. Т.пл. -71 °С, т.кип. -62°; критические давление и температура соответственно равны 104,4 °С и 62,4 атм; теплота сублимации 4850 кал/г-атом. На холодных поверхностях радон легко конденсируется в бесцветную фосфоресцирующую жидкость. Твердый радон светится бриллиантово-голубым светом. В 1 объеме воды при 0 °С растворяется 0,507 объемов радона, в органических растворителях растворимость радона значительно выше. Растворимость радона в спиртах и жирных кислотах возрастает с увеличением их молекулярных весов.

Химические свойства радона определяются его положением в группе инертных газов. Радон дает молекулярные соединения определенного состава, в образовании которых значительную роль играют силы Ван-дер-Ваальса. Эти соединения отвечают формулам $Rn \cdot 2C_6H_5OH$, $Rn \cdot 6H_2O$ и т.п. Из них первое изоморфно аналогичному соединению сероводорода, а второе — $SO_2 \cdot 6H_2O$. 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 радона: RnF_2 , RnF_4 , RnF_6 и $RnCl_4$. Такие соединения были синтезированы и показано, что если фториды ксенона сублимируются при 50°C, то фториды радона устойчивы до 250°C. Водород восстанавливает их при 500° С.

Радон получают обычно из солей радия. В равновесии с 1 г радия при нуле градусов и 760 мм рт.ст. находится 0,66 мм³ радона. Образующаяся при этом газовая смесь (в которой радон составляет 1:500000) содержит также гелий, гремучую смесь (продукт действия радиоактивного препарата на воду), пары воды, CO₂ и углеводороды (продукты разложения вакуумной смазки). Техника получения и дальнейшей очистки радона предусматривает 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.

3. ПРИМЕНЕНИЕ РАДОНА

3.1 Медицина

Радон находит широкое применение в медицине, в первую очередь - для радоновых ванн, т.е. ванн из воды естественных источников, содержащих радон, или воды, искусственно насыщенной радоном. Эти ванны используются при лечении ряда заболеваний, связанных с обменом веществ, при заболеваниях суставов и периферической нервной системы и т.д. Радон привлекают также для диагностики раковых заболеваний, например, для локализации опухоли мозга.

3.2 Материаловедение

Способность радона адсорбироваться на металлических поверхностях и не диффундировать вглубь позволяет измерять степень неоднородности поверхности металлических предметов. Изотопы радона широко применяются для целей диффузионно-структурного анализа твердых тел и твердофазных процессов. В частности, эманационно-термический анализ, основанный на изучении процессов выделения торона из образца в режиме линейного нагревания, применяется для дефектоскопии твердых тел. Методы диффузионно-зондовой микротомографии, также используют радон для декорирования структурных образований в конструкционных материалах. Радоновыми индикаторами пользуются для контроля противогазов на герметичность.

Радон же помогает следить за ходом технологических процессов в производстве таких несходных материалов, как сталь и стекло.

3.3 Ядерная геофизика

На радоновой съемке основаны многие геофизические методы обнаружения полезных ископаемых (как радиоактивных, так и стабильных). По содержанию радона в почвенном воздухе судят о плотности и газопроницаемости горных пород.

Радон, является радиогенным газом и как продукт распада уран-радиевого ряда непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада. Он всегда присутствует в любом горном массиве, и уменьшение его концентрации, например, за счет диффузии из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией радона. Диффузия радона в горном массиве и его выделение с поверхности почвы определяются эффективным коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость. Эти свойства среды существенно зависят от напряженно-деформированного состояния массива. Очевидно, что при сжатии массива проницаемость его снижается, а при разгрузке увеличивается. Соответственно изменяется эффективный коэффициент диффузии. Следовательно, динамические изменения концентрации радона в приповерхностном слое почвы будут отражать динамические изменения напряженно-деформированного состояния горного массива в значительном объеме.

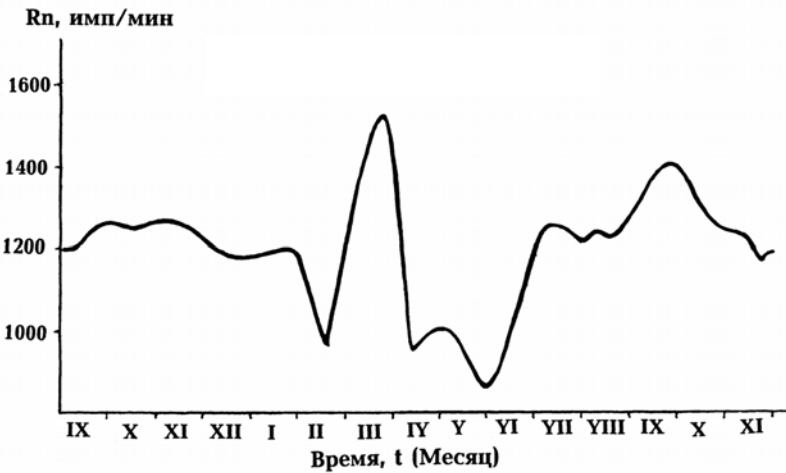
Засасывая воздух из буровых скважин с разных горизонтов, по содержанию радона определяют свойства горных пород на больших глубинах. По эманационным аномалиям геофизики судят о содержании радиоактивных руд в различных участках земной коры. Мониторинг радона лежит в основе некоторых способов предсказания землетрясений. На **Рис.4** в качестве примера приведена радонограмма, зарегистрированная в период Газлийского землетрясения.

Табл. 1. Радон в окружающей среде.

Радон в природе	Радон в искусственной среде
Физика земли Эманирование земной поверхности Диагностика вулканической активности и подвижности магмы Предсказание землетрясений. Радон в пещерах Радоновая диагностика скважин Поиск полезных ископаемых Физика атмосферы Радон, как основной источник ионов Диагностика структуры и динамики атмосферы Продукты распада радона в исследовании транспортных характеристик атмосферы, определении возраста аэрозолей и др. Военное дело Диагностика проницаемости горных пород для ударных волн Локализация подземных взрывов	Радон в туннелях, шахтах, метро, подвалах и т.п. Радон в урановых и угольных шахтах Радон в жилых и служебных помещениях Медицина Бальнеологические курорты Радоновые ванны Радон в лаборатории Радиохимический практикум Эманационный метод определения радия, тория и урана в окружающей среде Комплексный эманационно-термический анализ твердых тел и твердофазных процессов

Раннее предупреждение о приближающихся землетрясениях всегда относилось к актуальной проблеме, однако ее актуальность в конце 20-го века существенно возросла. Дело в том, что последствиями интенсивной разработки нефтяных и газовых месторождений в ближайшем будущем могут стать катастрофические по силе землетрясения, которые грозят превратиться в основную головную боль человечества в XXI веке. Первым сигналом надвигающейся опасности стало печально знаменитое узбекское газовое месторождение Газли. Именно здесь в 1976 и 1984

годах произошли подряд три землетрясения силой до 9 баллов по шкале Рихтера (напомним, что самый высокий показатель этой шкалы — 12 баллов). Первое началось 8 апреля 1976 с толчка небольшой силы, благодаря чему жители успели покинуть свои дома. Удар огромной силы до 9 баллов последовал через 15 мин и вызвал обвалы практически всех зданий. Но пострадавших не было. Второе сильное землетрясение произошло вскоре (17 мая 1976), но разрушаться уже было не чему.



Третье сильное землетрясение в этом районе произошло в 1984. По мнению сейсмологов, опыт и хронологические данные свидетельствуют, что подобные совпадения просто невозможны.

Рис. 4. Выделение радона из почвы в районе г.Газли перед, во время и после землетрясения.

Три сильнейших землетрясения в одном и том же районе в течение восьми лет— факт поистине фантастический. Как правило, временной разрыв даже между двумя сейсмическими ударами такой силы составляет не менее столетия. Так что Газли— это одно из самых веских доказательств того, что происхождение землетрясений на месторождениях нефти и газа носит не только тектонический характер. Иными словами, в природные процессы грубо и неосторожно вмешались люди. Итог, как уже известно, был печальным.

Радон был использован как индикатор напряженного состояния горного массива. При этом был обнаружен новый эффект в распределении концентрации радона при изменении напряженно-

деформированного состояния горного массива. Исследования в этом направлении проводили на Североуральском бокситовом руднике в связи с проблемой горных ударов, которые можно охарактеризовать как локальные землетрясения техногенного происхождения.

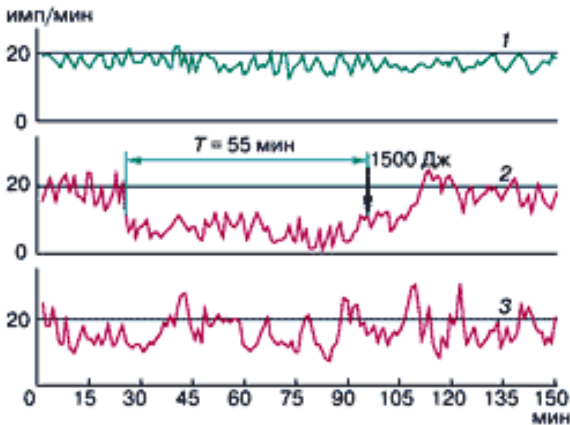


Рис. 5. График непрерывных измерений концентрации радона в шахте на глубине 350 м: 1 - воздух шахты, 2, 3 - наблюдательная скважина, пробуренная в массиве известняка, стрелкой показан момент горного удара, указана его энергия

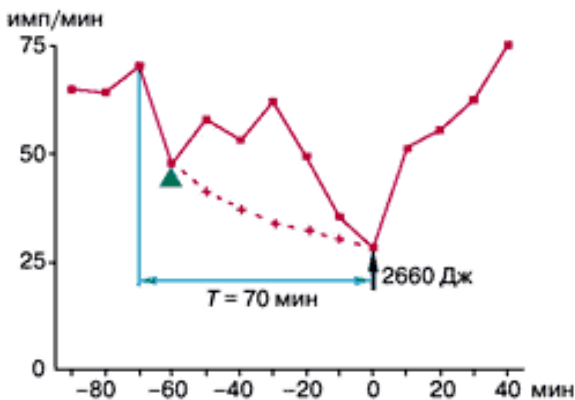
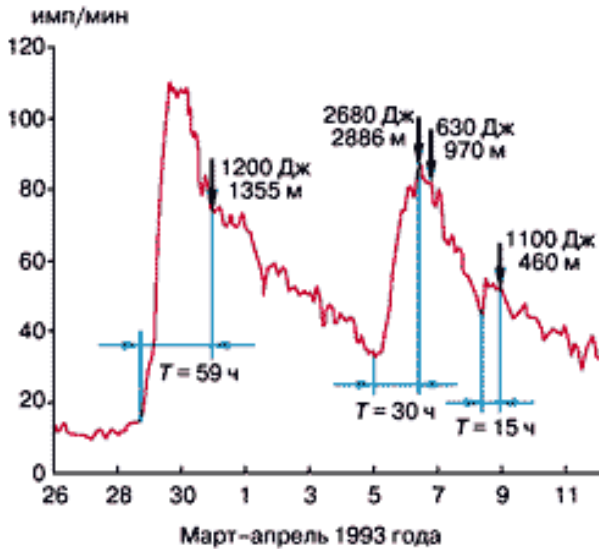


Рис. 6. График изменения концентрации радона в наблюдательной скважине, расположенной в ближней по отношению к будущему эпицентру горного удара зоне. Треугольником показан момент взрывной отпалки руды, стрелкой - момент горного удара, указана его энергия, пунктирной линией - возможный ход процесса при отсутствии промышленного взрыва.

В шахтах на глубинах от 300 до 600 м производили измерения концентрации радона в коротких скважинах, пробуренных в стенках шахты, а также в

воздухе шахты. Результаты измерений показали следующее (**Рис. 5**). Концентрация радона в воздухе шахты практически не изменяется и не несет информации об изменении напряженного состояния среды (**Рис. 5, 1**). Кривая изменения концентрации радона в наблюдательной скважине работающей шахты (**Рис. 5, 2**) имеет характерные большие мгновенные флуктуации при постоянном ее среднем значении. Такой вид кривой определяется не столько геологическими, сколько техногенными факторами - микросейсмическими воздействиями за счет движения шахтового транспорта, взрывов для добычи руды, бурения и т.д. Эти воздействия вызывают дополнительное образование микротрещин в горном массиве и соответственно приток радона в наблюдательную скважину. В скважине, пробуренной в районе рабочего забоя (**Рис.5, 2**), где наиболее часты горные удары, за 1-20 ч до момента горного удара наблюдалось уменьшение мгновенных флуктуаций, затем резкое уменьшение концентрации радона, а после горного удара - рост измеряемой концентрации радона и восстановление ее до исходного состояния.



наиболее часты горные удары, за 1-20 ч до момента горного удара наблюдалось уменьшение мгновенных флуктуаций, затем резкое уменьшение концентрации радона, а после горного удара - рост измеряемой концентрации радона и восстановление ее до исходного состояния.

Рис. 7. График изменения концентрации радона в наблюдательной скважине, расположенной в дальней зоне. Отмечены моменты горных ударов с указанием энергии и расстояния от эпицентра каждого удара до измерительной установки.

Интересное явление наблюдается при наложении процессов подготовки горного удара и взрывной отработки рудного массива (**Рис. 6**). На графике видно, что взрыв в забое вызывает эффект, аналогичный горному удару, - увеличение концентрации радона в наблюдательной скважине после взрыва. Однако, как показывают результаты измерений, взрыв не мог снять полностью напряженное состояние горного массива. Через 30 мин после взрыва концентрация радона стала вновь уменьшаться, и через 30 мин произошел довольно мощный (2600 Дж) горный удар. Вероятно, без взрыва процесс пошел бы по другому пути.

Таким образом, вблизи будущего эпицентра горного удара наблюдается заметное снижение концентрации радона, которое предшествует горному удару за 1-20 ч. Указанный процесс характерен для расстояний до 100 м от очага будущего горного удара. Эту зону условно будем называть ближней. В дальней зоне, на расстояниях от 500 до 2000 м от очага горного удара, изменение концентрации радона существенно другое (**Рис. 7**). Горному удару предшествует не уменьшение, а резкое увеличение (в 8-10 раз) концентрации радона в наблюдательной скважине, и горный удар следует после прохождения максимума концентрации радона. На **Рис. 7** показан типичный пример изменения концентрации как для одиночного горного удара, так и для серии ударов. В последнем случае наблюдается суперпозиция кривых, типичных для одиночного удара, причем максимальные значения концентрации для каждого последующего удара снижаются. Таким образом, обнаружено новое явление - зональность изменения концентрации радона перед горным ударом относительно координат будущего горного удара.

Отметим, что исследования распределения радиогенных газов (в первую очередь - радона) в верхней части земной коры начинались как чисто прикладные: поиск месторождений урана. Затем приступили к фундаментальным исследованиям по разломной тектонике, определяя как зоны разломов, так и их тектоническую глубину по термической эволюции Земли и глобальной эволюции планеты. При этом были созданы новые методики исследований радиогенных газов, в которых соединились методы ядерной физики, физические методы анализа (альфа-радиометр и масс-спектрометр), химические методы отбора и подготовки проб, геология и экология, которые представляют собой объект исследований. Развитие геоэкологии последних лет показывает, что только комплексный подход к таким исследованиям позволяет получить ценные результаты. Прикладные исследования по изучению радиогенных газов позволили решать такие проблемы, как перенос загрязнения поверхностными и подземными водами, обеспечение экологической

безопасности работ при добыче полезных ископаемых, обеспечение прогнозной радиационной опасности населения от естественных источников.

4. ОПАСНОСТЬ И ПОЛЬЗА РАДОНА

При рассмотрении свойств какого-либо радиоактивного изотопа редко используют термин «проблема» (Проблема – задача, которую невозможно решить существующими методами). С определенностью можно указать лишь одну – проблему оружейного плутония. Вторым случаем является радон. Статьи, озаглавленные «Проблема радона» в научной печати появляются с удивительной периодичностью. В чем здесь дело? Радон – один из самых изученных радиоактивных элементов. Его свойствам посвящены десятки тысяч статей. Так что же в нем есть такого, чего мы не можем обнаружить и изучить современными методами (прекрасно разработанными, кстати)? Тем не менее, проблема радона действительно существует. Да ни одна, а несколько. Постараемся их несколько прояснить.

Первая проблема радона связана с тем неоспоримым фактом, что радон бесспорно – вредный элемент и одновременно – бесспорно полезный элемент. Причем в одной и той же сфере – воздействии излучения радона на живые организмы! Вторая проблема радона – невозможность его достоверной регистрации в природных объектах. Причем – никакими самыми совершенными детекторами. Сколько бы раз вы не мерили активность радона атмосфере на своем приусадебном участке, каждый раз вы будете получать разные величины. Причем ошибка будет составлять не проценты, и даже не разы - во много, много раз выше. И никакие повторы замеров не помогут. Тем более не поможет замена детектора на самый современный, точный и чувствительный.

В этой главе мы рассмотрим первую проблему, вторую (проблему открытой природной системы) рассмотрим в последующих лекциях при анализе методов мониторинга радона в природных средах.

4.1 Опасность радона

Начнем с опасности радона.

Природные и техногенные радионуклиды, космическое излучение и некоторые медицинские процедуры (например, флюорография) обеспечивают дозовую нагрузку на население. В настоящее время основной вклад в дозу излучения, поглощаемую человеком за время жизни, вносят природные радионуклиды (70%), среди которых первое место занимает радон (30-60% в зависимости от географического местоположения жилища).

Среди радиоактивных ядов радон — один из самых опасных. Не случайно допустимая для человека доза радона в 10 раз меньше допустимой дозы β - и γ -излучателей. Уже через час после введения в кровь кролику сравнительно небольшой дозы радона, 10 мкКи, количество лейкоцитов в крови резко сокращается. Затем поражаются лимфатические узлы, селезенка, костный мозг... Не столько сам радон опасен для живого организма, сколько радиоактивные продукты его распада. Все исследователи, работавшие с твердым радоном, подчеркивают непрозрачность этого вещества. А причина непрозрачности одна: моментальное оседание твердых продуктов распада. Эти продукты «выдают» весь комплекс излучений: α -лучи — малопроникающие, но очень энергичные; β -лучи, жесткое γ -излучение...

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 Чехии показал, что от 30 до 50% горняков, работающих в урановых шахтах в 19-ом веке, умерло от рака легких. Поэтому работы по изучению радиационного воздействия радона стали интенсивно развиваться.

Существует публикации, в которых прослеживается статистическая связь заболеваемости злокачественными опухолями, склерозом, ишемической болезнью сердца, изменением поведенческих реакций и детским церебральным параличом с геопатогенными зонами (разломами), по которым радон перемещается и с помощью которых выходит на поверхность. При вдыхании радона, продукты его распада избирательно накапливаются в некоторых органах и тканях, особенно в гипофизе и коре надпочечников, этих двух важнейших железах внутренней

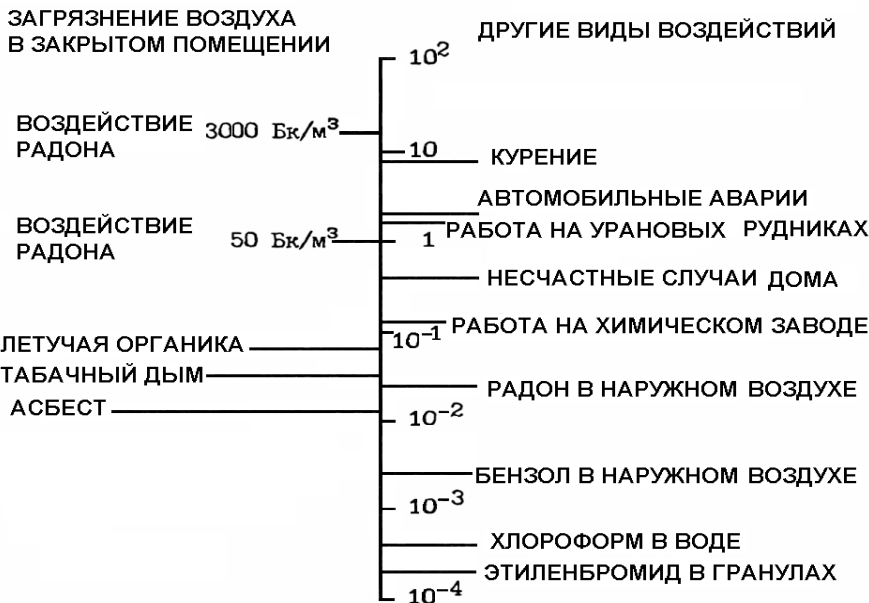
секреции, определяющих гормональную активность организма и регулирующих деятельность вегетативной нервной системы, концентрируются также в сердце, печени и других жизненно важных органах. Растворяясь в крови и лимфе, радон и продукты его распада быстро разносятся по всему телу и приводят к внутреннему массированному облучению. Опасность радона помимо вызываемых им функциональных нарушений (астматические приступы удушья, мигрень, головокружение, тошнота, депрессивное состояние и т.д.) заключается еще и в том, что вследствие внутреннего облучения легочной ткани он способен вызвать рак самих легких.



Ионизирующее излучение от продуктов распада радона крайне опасно отражается на здоровье населения: даже при средней концентрации радона в домах 25 Бк/м³ смертность от рака легких составляет 3-4 человека на 1000. При концентрации радона 200 Бк/м³ (концентрация, зарегистрированная в некоторых московских квартирах) раком заболеет 3-4 человека из 100. Более подробно зависимость числа заболеваемости раком легких от концентрации радона в жилых помещениях приведена в Табл.2.

Табл.2 Заболеваемость раком легких из-за бытового радона.

Концентрация радона, Бк/м ³	Заболеваемость раком легких в год на миллион человек
15	17
50	55
75	82
100	110
200	220
400	430



Для сравнения укажем, что для некурящих и курящих соответствующие цифры составляют 34 и 590. Таким образом, вклад радона в смертность человека от рака легких заметен только для некурящих. Для курящих этим видом риска можно пренебречь.

Рис.8. Риск от химических веществ и различных видов опасной деятельности

Рис.8 иллюстрирует положение радонового риска в ряду рисков, связанных как с

загрязнением воздуха в закрытом помещении, так и с другими видами стрессовых воздействий на человека. Видно, что радоновый риск для значений концентраций радона в воздухе московских квартир (10-20 Бк/м³) меньше риска домохозяек. Для Петербурга (30-40 Бк/м³) риски от радона и домашней работы сравнимы друг с другом. По мере роста концентрации радона риск резко увеличивается и при концентрациях порядка 200 Бк/м³ (дома в Швеции) становится сравнимым с риском автомобильных аварий, а при концентрациях порядка 1000 Бк/м³ (дома в некоторых регионах Чехии) - с риском курения.

Считают, что именно от рака легких, вызванного действием радона, в 1916 году погиб английский физик Рамзай, изучавший этот газ; рак легких со смертельным исходом является наиболее тяжким следствием облучения радоном. Доза 1 мЗв увеличивает риск онкологического

заболевания со смертельным исходом на $7,5 \cdot 10^{-5}$. Таким образом доза 2,4 мЗв/год увеличивает риск на $1,8 \cdot 10^{-4}$ чел./год или в $12 \cdot 10^{-3}$ за 70 лет жизни.

Радон свободно растворяется в жирах и установлено, что радон накапливается в мозге человека что возможно приводит к заболеванию раком крови.

Основную группу лиц радонового риска составляют горняки урановых шахт, вулканологи, работники горно-обогатительных предприятий, врачи радоно-терапевты, жители регионов с повышенным содержанием радия (например, жители горных районов Швейцарии, Карловых Вар (Чехия) и др.) и радоновых курортов (Пятигорск, Мацеста, Белокуриха и т.п.). В данной лекции, однако, мы будем рассматривать радоновый риск, которому подвергается "средний" обыватель, например, житель Москвы или Санкт -Петербурга.

Казалось бы, в анализе радонового риска мы можем опереться на весь опыт обращения с радионуклидами. Однако с экологической точки зрения радон приходится рассматривать как совершенно уникальный радионуклид, к которому мало применимы обычные мерки. Сложность работ с радоном привела к отсутствию прогресса в определении радонового риска для человека и природных экосистем. Наличие в литературе прямо противоположных друг другу (но довольно хорошо обоснованных экспериментально или теоретически) утверждений, касающихся биологической роли этого элемента, и создали клубок противоречий под названием "проблема радона".

Замечание. Для иллюстрации манеры освещения журналистами проблемы радона приведем два текста, в Интернете следующие друг за другом.

1) *Название статьи: «Газ-убийца», крадущийся из-под земли. Начало: Газ-убийцу «увидеть» могут только специалисты. По данным медико-экологической лаборатории Дальневосточного государственного медуниверситета, почти у половины умерших от рака легких в Хабаровске причиной смертельного заболевания мог быть газ радон. Наибольшее число летальных исходов отмечается в Центральном и Индустриальном районах города. В полтора раза выше, чем в других районах. Выявлена также связь между злокачественными новообразованиями – острыми лейкозами – и содержанием альфа-частиц в крови у детей 6–10 лет. Эта информация собрана медиками в результате скрупулезной работы с архивами больниц, моргов, домоуправлений, данными статистики за десятилетний период с 1988 по 1998 год. В толстых папках, которые, если их сложить вместе, напоминают своеобразный могильный холм, – истории болезни тех, кого уже нет в живых. А на большой карте Хабаровска, похожей на белую простыню с расчерченными улицами и проспектами, где обозначены дома с повышенным содержанием радона, в изобилии нанесены красные кружочки – чьи-то жизни, которые уже унес невидимый газ. – Было обследовано более 328 тысяч человек – из них около двух тысяч умерли **не без влияния радона**. Ну и так далее....*

2) *Название статьи «О пользе радиации». Начало: Известно, что бальнеолечение применяется в народной медицине с давних времен с использованием термальных радоновых вод. Хотя до открытия радиоактивности (1896) и не подозревали о присутствии в таких водах радона. При выяснении механизмов биологического действия радиации было сформулировано научное представление о природе лечебного действия бальнеопроцедур с радоносодержащими водами. Вследствие этого образовалась широкая сеть курортов с радиоактивными водами. Известно более трехсот таких курортов (в том числе 30 в странах СНГ). В настоящее время радонотерапию повсеместно рассматривают как универсальное средство лечения многих заболеваний. Например, в 2003 г. на курортах с радоновыми водами в странах СНГ ежегодно лечится более одного миллиона человек. И далее – о борьбе с раком путем увеличения дозы облучения, о пользе радиации вообще и радона в частности.*

Такое разнообразие в точках зрения на роль радона обусловлено тем: - что для того, чтобы радон стал опасен для человека, необходимо совпадение трех факторов:

1. Наличие в геологической среде повышенных количеств урана-радия-радона.
2. Существование путей переноса эманации.
3. Наличие замкнутого пространства, в котором бы находился человек и куда бы поступал радон.

4.2 Польза радона

Коротко остановимся на полезных свойствах радона. Способность радоновых вод улучшать здоровье человека известно давно: еще воины Чингисхана залечивали раны в водах Белокурихи. Бальнеологическому курорту в Яхимове – 300 лет, курортам Белокуриха, Кисловодск – 150 лет, Мацесте – 100 лет. Народ купался и купается в радоне, получает большие дозы внутреннего α -излучения, и – никакого вреда, лишь польза. Это - экспериментальный факт и от него никуда не денешься.

Биологическое действие радоновых вод зависит от энергии α -излучения, на долю которого приходится 92% всей поглощенной организмом энергии. Основное преимущество α -частиц заключается в том, что лечебный эффект наступает при очень малых поглощенных дозах, полностью исключая отрицательное влияние их на организм человека. Интегральная поглощенная доза радона невелика. Она не превышает 3,1-5,3 рад на курс лечения, оставаясь в пределах природного радиоактивного фона. Главной точкой приложения радона является кожа, поверхность которой составляет около 2 м². Во время приема радоновой ванны происходит абсорбция короткоживущих продуктов распада радона - RaA, RaB, RaC - с последующим их распадом и выделением α -, β -, и γ -лучей. Большая часть радона (70%) во время приема радоновой воды абсорбируется кожей, образуя так называемый активный налет и воздействуя на нее альфа-частицами. Меньшая часть (30%) диффундирует в глубже лежащие слои кожи, подкожно-жировую клетчатку, в незначительном количестве - в другие органы и ткани. Проникая в верхний слой кожи, альфа-частицы вызывают ионизацию молекул воды и белка в клетках с последующим выделением биологически активных веществ, действующих на нервные окончания кожи, которые обеспечивают связь с центральной нервной системой и внутренними органами. Нервные рецепторы кожи обеспечивают рефлекторную реакцию организма на внешнее воздействие физических и химических раздражителей. В коже заложены сложные механизмы регуляции периферического кровотока, иммунной и энергетической систем нашего организма. В связи с этим действие на кожу малых доз α -излучения вызывает общую ответную реакцию организма, способствующую восстановлению нарушенных функций. Следовательно, пусковые механизмы лечебного воздействия радоновых ванн, равно как и других бальнеофакторов, находятся в коже.

Таким образом, можно говорить о двух путях действия радона - нервно-рефлекторном, через нервные окончания кожи, и гуморальном - проникновении радона с током крови и лимфы в подкожно-жировую клетчатку и другие органы и ткани. Через 2,5 часа после радоновой процедуры радон полностью выводится из организма, а еще через два часа исчезают дочерние продукты. Итак, на протяжении нескольких часов после радоновой ванны в коже и в меньшей мере в других органах и тканях в результате α -облучения возникает состояние ионизации тканевой жидкости, которая изменяет направленность и интенсивность биохимических процессов, что служит пусковым механизмом восстановления нарушенных функций органов и тканей.

Научно-исследовательскими работами последних лет установлено, что под воздействием радоновых вод существенно усиливается транспортная и барьерная функции лимфоузлов, лимфопоз, иммунопоз; происходит активация секреции глюкокортикоидов, увеличивается порог болевой чувствительности, улучшается микроциркуляция в сердечной мышце, увеличивается минутный и ударный объем сердца и др., благодаря этому с каждым годом расширяются показания к радонотерапии.

Вот официальный краткий перечень показаний к радонотерапии: болезни сердечно-сосудистой системы (ИБС, АГ, облитерирующий эндартериит, тромбангиты, тромбофлебиты и др.); болезни костно-мышечной системы (остеохондрозы, ревматоидный артрит и др.); болезни нервной системы (центральной и периферической, функциональные и органические заболевания); гинекологические заболевания (воспалительные и обменные, фибромиомы, эндометриозы, климактерические синдромы бесплодия и др.); болезни эндокринной системы и обмена веществ (зобная болезнь, сахарный диабет, ожирение и др.); болезни кожи (хронические экземы, нейродермиты, псориаз, склеродермия и др.). Радон оказывает седативное, противоболевое и противовоспалительное действия, способствуя ликвидации хронических воспалительных процессов в отдельных органах. В малых концентрациях радон повышает функцию щитовидной железы и яичников, а в больших - тормозит. Радоновые ванны имеют выраженное действие на нервную и сердечно-сосудистую систему. Хороший эффект медики получают, используя радон в терапии таких традиционных заболеваний, как патологии опорно-двигательного аппарата. То есть остеохондрозы, радикулиты, артрозы. Для женщин актуально регулярно проводить лечение болезней женской половой сферы. Кроме того, радонотерапия не имеет ограничений, связанных с возрастом пациентов. И пожилые люди, и дети с помощью радонотерапии прекрасно восстанавливают и укрепляют свое здоровье.

Радон применяют как наружное (ванны, аппликаторы) и как внутреннее (ингаляции, питье, таблетки) средства.

Радонотерапия - традиционный метод бальнеолечения (водолечения). При радонотерапии происходит облучение (в основном α -частицами) организма благодаря проникновению радона из воды через кожу в кровь, током которой он разносится по всему организму. В организм проникает менее одного процента радона, содержащегося в воде ванны. Большая часть его в течение двух часов выделяется наружу. Естественные радоновые ванны улучшают деятельность сердца, нормализуют артериальное давление. Под влиянием радоновых ванн ускоряются процессы заживления и рассасывания в нервных волокнах, мышечной и костной ткани. Считается, что радоновые ванны эффективно снимают стрессы (при прохождении полного курса лечения – 10-12 ванн).

Для снижения дозовой нагрузки на пациента в ходе радонотерапии используют четырехкамерные ванны, позволяющие вместо полного погружения окунать в раствор радона только руки и ноги. При этом достигается очень хороший положительный эффект для сердечно-сосудистой системы, а вредный общий эффект, такой как повышение давления, полностью устраняется.

Наиболее известны следующие курорты с радоновыми водами: Белокуриха (Алтайский край), Пятигорск, Хмельник, Цхалтубо (Грузия), Яхимов (Чехия). Курорт Цхалтубо, хотя и относят к курортам с радиоактивными водами, но концентрация радона в них низкая; эти воды содержат значительное количество азота. Часто радоновые ванны сочетают с грязелечением (некоторые грязи - иловые, сапропелевые, торфяные содержат радон).

В практической медицине практикуются ингаляции радоном, т.е. вдыхание воздуха, насыщенного радоном. Очень полезно радоновое питье. Применяются и радоновые таблетки, представляющие собой клатратные соединения (например, клатраты радона с декстрином).

В последние годы для лечения многих болезней применяют радоновые аппликаторы. Например в остром периоде компрессионных синдромов выпадения межпозвонковой грыжи используют *радоновую терапию* в виде радоновых b -аппликаторов, диаметром 5 см, с активностью от 2 до 7 мкКи, которые накладываются на 4–6 сегментарных зон. Особенно часто аппликации накладывают на область щитовидной железы.

Противопоказания против радоновой терапии те же, что имеют место при любых физических воздействиях на организм. Это острые или хронические заболевания в фазе обострения. Это диагностированная или подозреваемая онкопатология. Это инфекционные болезни, беременность или просто непереносимость радона.

Замечание. Курс лечения рекомендуется повторять каждый год, т.к. эффект угасания имеет место. Только на полгода хватает по-настоящему надежного эффекта.

4.3 Радон друг или враг?

Так друг нам радон или враг?!

На радоне, сильнее чем на каком либо нуклиде проявляется борьба двух концепций действия радиации на человека: «беспороговой» - любая доза радиации наносит вред и только вред, и «пороговой» - радиация становится опасной только после превышения некоторой пороговой дозы облучения, ниже этого порогового значения радиация или безразлична человеку или полезна для него (теория наличия порога «биопозитивности»).

Подавляющее число известных фактов свидетельствует о том, что ионизирующие излучения наносят вред организму лишь за пределом некоторого порога дозы. Ниже этого порога они безвредны для человека. Более того, с точки зрения «биопозитивной» теории жизнь на Земле возникла в условиях постоянного воздействия радиации в определенных дозных диапазонах. Жизнь была бы невозможной без радиации (также как без других природных факторов – солнечного света, гравитации, атмосферного давления, магнитного поля Земли и др.). Экспериментально доказано, что отсутствие радиации (искусственное исключение радиации в камере) угнетает, ее возвращение восстанавливает, а дополнительное облучение в малых дозах (к фону) – стимулирует; дальнейшее же увеличение дозы тормозит развитие клеточных структур.

В этой связи интересны данные по заболеваемости населения, проживающего в районах с повышенным фоном. В Белокурихе, например, концентрация радона в воде 7-10 нанокюри на

литр, это на порядок больше типичной концентрации радона в природе. Однако продолжительность жизни, наличие онкологической или лейкозной патологии среди населения не выше, чем в общей популяции. Наоборот, имеет место долгожительство и улучшение качества жизни у пациентов и здоровых лиц.

В этой связи уместно напомнить **теорию «Гормезис»** (Лаки, США, Кузин, Россия), Гормезис происходит от слова "гормон" и обозначает побуждение или стимуляцию.

***Гормоны** (вызывают, приводят в движение) – биологически активные вещества, вырабатываемые в организме специализированными клетками или органами (железами внутренней секреции) и оказывающие целенаправленное влияние на деятельность других органов и тканей.*

Многочисленные исследования показали, что источники радиоактивных излучений, например тот же радон, в малых дозах является жизненно необходимым условием, стимулирующим защитные и другие функции организма. Поэтому можно твердо сказать, что радон не только не опасен, но даже полезен. Согласно теории гормезиса эффект малых доз качественно отличается от эффекта больших доз: малые дозы возбуждают, средние стимулируют, максимальные угнетают или парализуют.

Следует отметить, что на современном этапе развития науки единственным достоверным критерием действия радиации (малых и больших доз) на человека являются эпидемиологические исследования. Проведенные эпидемиологические исследования населения в местностях с повышенным радиационным фоном выявил феномен снижения вероятности заболеть раком легкого у групп населения, получающих значительно большие дозы (1,0-1,4 бэр/год против нормальных фоновых облучений – 0,1-0,2 бэр/год). Совместные работы американских, финских, австрийских и китайских ученых показали, что частота заболеть раком легкого скорее зависит от условий жизни или других экологических факторов, нежели от высокого радиационного фона. Оказалось, что в местностях с повышенным содержанием радона обнаружены более низкие значения смертности от рака легкого.

До недавнего времени американские и канадские ученые считали радонотерапию анахронизмом или историческим курьезом. Ныне же, после специально проведенных исследований, они пришли к выводу, что для предупреждения раковых заболеваний и увеличения продолжительности жизни населения следовало бы создать добавочное облучение в дополнение к существующему природному радиационному фону. Этого можно достичь, как они утверждают, используя курорты с радоновыми водами. Тогда каждый человек получит ту дозу, которая необходима для поддержания его жизненных сил и здоровья. По последним научным данным при остром облучении в дозах 25 бэр и хроническом ниже 100 бэр/год нет риска канцерогенеза. Иными словами, повышение естественного радиационного фона в 10-100 раз (т.е. до 25 бэр) не представляет для населения никакой опасности. Известно, что по НРБ-86 (нормы радиационной безопасности) предел допустимого облучения всего организма составляет 0,5 бэр/год, для отдельных органов – 1,5 бэр/год, для кожи 3 бэр/год. При приеме радоновых процедур (от применяемых в лечебной практике концентраций – 1,5-3 кБк/л или 40-120 нКи/л) средняя поглощенная доза ниже нормативных в 5 раз. (При приеме курса Белокурихинских радоновых ванн интегральная поглощенная доза составляет 0,7-2,0 мбэр).

5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ РАДОНА

С точки зрения экологической радиохимии можно выделить следующие аспекты проблемы радона:

1) Химические и ядерно-физические свойства радона (Радон - α -излучающий тяжелый благородный газ).

Радон - опасное вещество: Радон-222 (и особенно два его изотопа - торон и актинон) испускают высокоэнергетическое корпускулярное излучение с весьма большим поражающим действием (биологической эффективностью). Радон - газ и легко перемещается в пространстве на достаточно большие расстояния. От него невозможно защититься простой установкой поглощающего радиацию экрана. Радон - инертный газ и угольные фильтры типа противогазов или лепестков его не задерживают. Радон хорошо растворяется в крови, быстро перемещается по организму и проникает во все его органы. Особенно хорошо радон растворяется в жирах.

Радон - не очень опасное вещество: Радон - инертный газ. Он практически не сорбируется на внутренней поверхности легких. Попав в организм на вдохе, он уже на выдохе почти полностью выводится из организма (коэффициент введения в организм - менее процента). Радон - достаточно короткоживущий нуклид и быстро распадается. Период биологического выведения у него тоже короток. Поэтому, раз попав в организм, радон менее чем за сутки полностью из него выводится. Радон не создает внешнего облучения на организм (его α -частицы поглощаются любой одеждой).

Опасен не сам радон, а продукты его распада.

2) Химические и ядерно-физические особенности продуктов распада радона (Радон является родоначальником обширного семейства генетически связанных радионуклидов, претерпевающих практически все известные типы распада).

Радон быстро приходит в равновесие с продуктами своего распада ("активным налетом"). Все дочерние радионуклиды (10 для радона, 7 для торона и 8 для актинона) являются высокотоксичными тяжелыми металлами (полоний, таллий, висмут, свинец и др.). Продукты распада являются высокоэнергетическими α -, β -, и γ -излучателями. α -распад материнского нуклида сопровождается выделением значительной энергии отдачи. В результате дочерний элемент в виде атома отдачи внедряется в биологические ткани, где и застревает. Последовательные циклы альфа отдач приводят к проникновению радионуклидов на значительные глубины в биологические объекты. В воздухе продукты распада (все они представляют собой нелетучие элементы) находятся в высоко ионизированном состоянии и легко адсорбируются на любых поверхностях, в том числе - на трахеях и бронхах. Тяжелые металлы плохо выводятся из организма.

Наличие многочисленных последовательных актов превращений и "вилок", процессов отдачи, нескольких зарядовых состояний нуклидов, сложных спектров распада, набора времен жизни нуклидов (следовательно, весьма сложных процессов накопления и распада), широкого набора периодов биологического выведения продуктов активного налета, сложный характер транспорта как в окружающей среде, так и в организме, приводят к большим трудностям при расчете поглощенной дозы от радона и продуктов его распада. Еще большие проблемы возникают при предсказании биологического действия этого семейства радионуклидов и при оценке совокупного радонового риска.

Именно из-за продуктов распада радона, работа с радием относится к группе А токсичности, а торон считается самым сильным ядом (ПДК у него наименьшее из всех известных веществ).

3) Вовлечение радона в среду обитания человека.

Радон, так же, как уран, торий, ^{40}K , ^{14}C , - природный радионуклид. Однако, современная дозовая нагрузка на население от радона связана исключительно с активностью человека. Действительно, сейчас лишь незначительная часть людей обитает в пещерах и непроветриваемых подвалах с высокой концентрацией радона. Квартиры в многоэтажных домах расположены на высотах, куда тяжелый радон сам собой подняться не может. В большинстве стран осуществляется контроль за содержанием радия в строительных материалах и выделение радона из стен квартир незначительно. Лишь неумелые, но активные действия человека вовлекают радон в среду обитания.

В качестве примера рассмотрим ситуацию с радоном, возникшую в Швеции в конце 70-х годов, где рост радонового риска стимулировался исключительно деятельностью "зеленых", направленной на охрану окружающей среды. Одно из основных направлений науки об охране среды обитания - снижение энергопотребления жилым сектором - привело к строительству новых типов зданий, характеризующихся улучшенной тепловой изоляцией, экономным режимом вентиляции и т.п. Однако опыт их эксплуатации показал, что, обеспечив сохранность тепла, принятые меры существенно ухудшили радиационную обстановку, повысив в воздухе жилых помещений концентрацию радона и продуктов его распада. Плотная упаковка оконных и дверных проемов, исключившая естественную вентиляцию, притяжная вентиляция, создающая разрежение в квартире, принудительно извлекающая все газы из грунта под зданием и разносящая их по всем этажам и помещениям, привели к увеличению концентрации радона в воздухе жилых помещений

в тысячи раз по сравнению с его концентраций в почве. В результате число шведов, заболевших раком легких, увеличилось в десятки раз.

Бытовой радон - техногенный радионуклид природного происхождения и защита населения от бытового радона должна строиться именно как защита от техногенного изотопа природного происхождения.

4) Медико-биологические свойства радона.

Как уже упоминалось, радон создает дозовую нагрузку на население, способен увеличить число раковых и других заболеваний и даже получил у газетчиков название "газ - убийца". Но так ли это?

Радон относится к группе токсинов, привычных для человека. Радон всегда присутствовал в экосистеме и в любом живом организме. Более того, контакт радона с человеком в доисторические времена был гораздо интенсивнее, чем сейчас. Люди жили в пещерах, вырубленных в гранитах, и, несомненно, интенсивно облучались гамма-излучениями от природных радионуклидов. В своем жилище они дышали воздухом, насыщенным радоном. В ходе становления человека, как вида, еще существовали многие распавшиеся сейчас радионуклиды (например, ряд нептуния). Интенсивная вулканическая деятельность приводила к выбросам радона в атмосферу. Ныне природные радионуклиды в значительной степени распались, вулканическая деятельность ослабла, человек вылез из пещер и землянок. Поэтому, если и говорить об изменении радиационной обстановки вокруг человека, то только в плане уменьшения привычной дозовой нагрузки.

Человек ни секунды не жил без радиации вообще и без радона в частности. Совершенно не известно, что будет с популяцией, если убрать радон из среды ее обитания. Возможно, следует ставить вопрос не о снижении облучения, а об его увеличении до доз, характерных для первобытного человека. По крайней мере публикации с утверждениями о долговременных отрицательных последствиях облучением радоном выглядят достаточно странно: все, что могло мутировать, отмутировало в древние времена и сейчас повышение концентрации радона есть просто возвращение к статус-кво.

Если радон является привычным токсином, то все живое в ходе эволюции должно было приспособиться к его присутствию в среде обитания и научиться нейтрализовать его отрицательные последствия. И это действительно так!

Для начала рассмотрим ситуацию в регионах с повышенным содержанием радия. Прежде всего это горные районы Кавказа, Алтая, Саян и др. Эти регионы сложены из гранитов с высоким содержанием радия и тория, имеются многочисленные минеральные источники и гейзеры. Высокую радиационную нагрузку создают как природные радионуклиды, так и космическое излучение, интенсивность которого с ростом высоты увеличивается. Местное население получает существенно большую дозовую нагрузку, чем жители равнинных городов. Согласно традиционной логики радиоэкологов, горцы должны непрерывно болеть и умирать в раннем возрасте. Однако долголетие горных народов является общеизвестным фактом.

Многие регионы мира с высокой плотностью населения находятся в зонах высокой радиоактивности. Например, на территории СНГ их столько, что Чернобыль еле входит в первую двадцатку радиационно опасных городов. Между тем, города с необычайно высокой радиоактивностью: Кисловодск, Мацеста, Карловы Вары и др. скорее считаются курортными, чем местами экологического бедствия. В западных регионах Чехии есть колодцы, вырубленные в рудном теле урановых месторождений. Население пьет воду из этих колодцев, поливает "рассолом радионуклидов" приусадебные участки, ест выращенные на них овощи и фрукты. И делает это со времен кельтов!

На Алтае район Белокурихи с его мощными источниками радона считался курортом еще в доисторические времена. Здесь лечились воины Чингиз-Хана (к счастью для себя, они еще не страдали радиофобией). Напротив, расположенная рядом долина Акташа с озером "горных духов" всегда пользовалась у населения дурной репутацией. Местными шаманами она была объявлена табу, и посещение ее строго воспрещалось. И правильно: Акташ - крупнейшее в мире месторождение ртуты. Человек давно уже разработал способы эмпирической оценки региона как

среды обитания. И если бы радон представлял для него существенную опасность, то это было бы установлено еще во времена Фараонов.

Согласно традиционной радиоэкологии любое облучение организма наносит ему безусловный вред. Особенно это справедливо относительно облучения женщин и детей. Между тем, один из самых знаменитых мировых курортов по лечению женского бесплодия размещается в долине Яхимталле (Чехия). На территории этого курорта (г.Яхимов) находится сарай, где Мария и Пьер Кюри впервые выделили полоний и радий. Выше курорта функционируют урановые рудники. Именно из этого урана была изготовлена первая советская атомная бомба. Горячая вода подается в урановые штреки, насыщается радионуклидами и поступает на курорт для принятия отдыхающими радоновых ванн. Курорт с высокой эффективностью функционирует уже более двухсот лет, хотя доза, получаемая женщиной за один сеанс радоновой ванны, в несколько раз превышает предельно допустимую дозу для профессионального облучения. Радон используется для лечения и других болезней.

Медицинский аспект проблемы радона в том и заключается, что радон с одной стороны увеличивает число заболеваний, а с другой является эффективным лекарственным средством.

В г.Яхимове промышленная добыча урана и радия началась только в середине 20-го века. Ранее здесь из той же руды добывали полиметаллы, в частности, серебро (Монета талер и затем доллар получили свое название именно в честь этой долины: Яхимталле). Отвалы производства полиметаллов, обогащенные по урану и радию, с 13-го века используются как строительные материалы. Население городка уже 600 лет без видимого вреда для себя живет в этих домах и пьет пиво из подвалов, концентрацию радона в воздухе которых превышает все допустимые пределы.

Детальное изучение процессов проникновения радона и продуктов его распада вглубь живого организма подтвердило идеальную приспособленность человека к радону. Природные фильтры в носу человека и на пути к бронхам эффективно задерживают аэрозоли с адсорбированным на нем "активным налетом". Сам радон проходит в легкие, растворяется в крови и легко выводится из организма. Удивительно поведение тяжелых металлов - продуктов распада радона. Если частица аэрозоля со стабильным свинцом попадает в легочные пути, то остается в организме весьма длительное время. Постепенно движение волосков в дыхательных путях выталкивает аэрозольную частицу с адсорбированным свинцом из дыхательного пути. Если же свинец на аэрозольной частице образовался из радона, то в легких он легко отдирается от частицы, попадает в кровеносные сосуды и быстро выводится из организма. Детали работы системы очистки организма от продуктов "активного налета" сейчас не ясны, но эффективность ее работы очевидна.

4) Проблема экстраполяции в область малых доз.

Приведенные выше оценки заболеваний раком легких от бытового радона отнюдь не являются экспериментально измеренными. Они получены расчетным методом, путем экстраполяции данных по заболеваниям шахтеров урановых рудников на низкие концентрации радона. Правомерность линейной экстраполяции на малые дозы вызывает большие сомнения. Существует обоснованное мнение, что при малых концентрациях радон скорее полезен, чем вреден. Что касается рака легких, то эта болезнь вызывается целым рядом причин и однозначная связи ее с радоном до сих пор не установлена.

Проблема радона является комплексной и включает в себя следующие аспекты:

1) Фундаментальная радиохимия.

- Состояние радона в различных средах: воздух, вода, почва, строительные материалы и т.п.

- Механизмы миграции радона в различных средах и материалах

Радиоактивные равновесия в системе радон - продукты его распада.

Размерные спектры аэрозолей и их адсорбционно-десорбционные характеристики по отношению к элементам радонового ряда.

2) Методы регистрации радона.

- Методы отбора проб радона и продуктов его распада

- Качественный и количественный анализ материнских изотопов радона в грунте, воде, почве и строительных материалах

- Трековые детекторы и селективные полимерные мембраны в регистрации α -излучения изотопов радона.
 - Активные фильтры из угольных волокон для поглощения радона
 - Методы макро- и микроавтордиографии и методы мембранной технологии в изучении состояния и диффузии изотопов радона в различных средах
 - Радиометрическая и спектроскопическая аппаратура для анализа изотопного состава радона.
 - Аппаратура и методики измерения стационарной и нестационарной радонопроницаемости почвы, грунта, строительных материалов и защитных покрытий
 - Комплексный эманационно-термический анализ строительных материалов
 - Мембранные импакторы в исследовании распределения частиц аэрозолей по размерам, распределения продуктов распада радона по различным размерным фракциям аэрозолей, а также в определении их зарядового состояния
 - Радон-222 в диагностике процессов тепло- и массопереноса в жилых помещениях и зданиях
 - Методы иммунной диагностики населения
- 3) Измерение характеристик транспортных процессов радона
- Эманирование пористых сред за счет отдачи и диффузии (с учетом теории перколяции и элементов фрактальной геометрии)
 - Молекулярная и вынужденная диффузия радона в природных объектах и инженерно-технических сооружениях
 - Нестационарная радонопроницаемость строительных материалов в равновесных и неравновесных условиях
 - Конвективный перенос радона в замкнутых помещениях
 - Адсорбция радона и продуктов его распада на поверхностях строительных конструкций
- 4) Радиоэкологические аспекты проблемы радона.
- Доза, поглощенная человеком в конкретном помещении за определенный промежуток времени
 - Доза, полученная популяцией конкретного региона: факторы риска
 - Медико-биологические последствия воздействия радона
 - Синергизм радиационных, химических и микробиологических воздействий
- 5) Оптимизация жилых помещений с точки зрения уменьшения радонового риска.
- Учет географических, климатических, архитектурных и демографических факторов и особенностей менталитета населения.
 - Подбор строительных материалов: низкое содержание материнских изотопов эманации, низкая эманацирующая способность, отсутствие сквозных и открытых пор, заделка несплошностей в строительных конструкциях
 - Оптимизация вентиляции и процессов массо- и теплообмена. Фильтрация воздуха
 - Создание композитных защитных покрытий с низкой радонопроницаемостью и оптимальными адсорбционными свойствами по отношению к продуктам распада радона
 - Иммунокоррекция (Т-активин, фитим и др.), как способ повышения устойчивости организма к радиационным воздействиям.

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.