

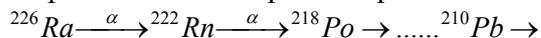
3. РАДИОМЕТРИЯ ИЗОТОПОВ РАДОНА

Качественный и количественный анализ изотопов радона проводят как для целей радиоэкологии (определение дозовой нагрузки на популяцию и т.п.), метеорологии, разведки полезных ископаемых, медицины (радоновая терапия), в термическом анализе (эманационно-термический анализ твёрдых тел и твёрдофазных процессов). Другое направление аналитической химии радона – измерение концентрации его материнского нуклида (радия – по радону, тория – по торону и т.п.) в исследуемом образце.

Несмотря на обилие способов регистрации радиоактивных излучений, в виду наличия сложных схем распада радона и «активного налёта», достоверная регистрация изотопов радона (особенно при их совместном присутствии) – сложная и до сих пор до конца не решённая задача.

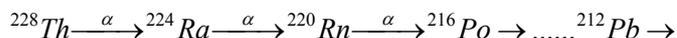
Замечание: Серьезная проблема количественного определения изотопов радона связана с объемными эталонами этих газов, точнее - с их отсутствием. Объемные эталоны радиоактивных газов необходимы для калибровки аппаратуры, но создать их необычайно трудно даже для сравнительно долгоживущего изотопа – радона-222, не говоря уж о радоне-219 и радоне- 220.

Радон имеет много (не менее одиннадцати) изотопов, большинство из которых получены искусственно (например, ^{207}Rn (α , 6,26 МэВ, ЭЗ, T=5,67 мин), ^{221}Rn (β^- , α , 6 МэВ, T=25 мин) и др.). 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). В сокращенном виде ряды образования и распада природных изотопов радона можно представить в виде:



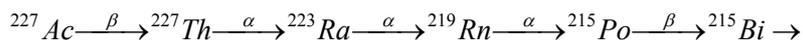
1624 года 3,82 дн 22 года

$E_\alpha = 4,78$ 5,5 МэВ



1,91 год 3,64 дн 55,6 сек 10,6 ч

$E_\alpha = 5,42$ 5,68 6,29 МэВ



21,8 год 18,7 дн 11,2 дн 3,96 сек 7,4 мин

$E_\beta = 0,045$ $E_\alpha = 6,04$ 6,82 МэВ

Сами по себе природные изотопы радона являются α -излучателями и инертными газами. Однако они распадаются на не газообразные продукты, называемые «активным налётом», которые являются α -, β - и γ -излучателями. Атомы природных радиоактивных материнских изотопов, атомы соответствующих инертных газов и атомы «активного налёта» связаны цепочкой последовательных распадов и образуют радиоактивные семейства или ряды.

3.1 Регистрация радона (^{222}Rn)

Наиболее старая, но сохранившая значение до наших времён техника измерения заключается в том, что радон, выделяющийся из исследуемой пробы, вводится внутрь ионизационной камеры.

Большее распространение получил сцинтилляционный метод. Первой подобной камерой была ячейка Лукаса (Рис.11), которая представляла собой стеклянную вакуумную колбу, покрытую изнутри сцинтиллятором и имеющую хороший оптический контакт с фотоэлектронным умножителем. Радон в камеру Лукаса вводится вакуумным методом. Ячейка Лукаса – пример тупикового детектора. Большее распространение получили камеры с плоским стеклом, покрытым слоем сцинтиллятора ZnS(Tl), Рис. 12. Существуют проточные сцинтилляционные камеры различной геометрии (полусферические, Рис. 6 и 13 или цилиндрические, Рис.14).

Рис. 11. Простейшая сцинтилляционная камера для измерения концентрации радона (Ячейка Лукаса).



Если камера эксплуатируется при повышенных температурах ее снабжают водяной рубашкой, понижающей температуру детектора и тем самым уменьшающие скорость счета фона. Для предотвращения накопления активного налета в камере в процессе регистрации радона входной патрубков укрепляют на изоляторе и на него подают высокий отрицательный потенциал, который предотвращает попадание в камеру аэрозольных продуктов распада радона. Далее для краткости любой детектор для регистрации α -излучения изотопов радона будем называть эманационной камерой.

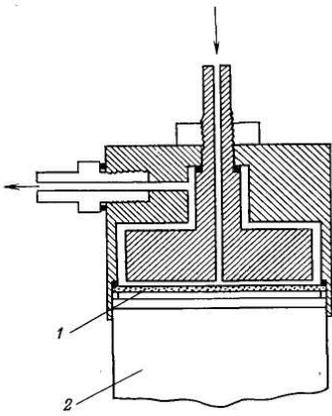


Рис. 12. Камера для измерения радона-222 сцинтилляционным детектором (1) и фотоумножителем (2).

Наиболее совершенным методом перевода радона в эманационную камеру является вакуумный метод (**Рис. 15**). При вакуумном методе объем эманационной камеры должен быть в 5-10 раз больше объема эталонного раствора или пробы. Разряжение воздуха в камере производится с помощью насоса Камовского, вакуумного или ротационного насоса. Если эманационная камера плохо держит разряжение или объем исследуемого раствора пробы соизмерим с объемом камеры, при измерении пользуются циркуляционным методом перевода радона в камеру (**Рис. 16**). С

помощью резиновой груши или циркуляционного насоса создается циркуляция воздуха в системе, обеспечивая равномерное распределение радона по всему объему. Момент окончания поступления радона в камеру записывают. Затем в течение 3 час измеряют ионизационный ток (либо скорость счета) создаваемый α -частицами радона и продуктами его распада. Вначале ток растет быстро, а потом медленнее, достигая максимума через 3 ч, когда наступает равновесие между радонам и продуктами его распада. Предел чувствительности радонового эманационного метода 10^{-15} кюри радона.

Обычно эманационные методы применяют для определения количества радона в пробах газа и жидкости. Измерение количества радона проводят путем сравнения активности пробы и эталона. В этом случае соблюдают равенство условий измерения пробы и эталона. Концентрацию радона в кюри на литр в пробе жидкости или газа при вакуумном способе введения радона в камеру рассчитывают по формуле:

$$C_{Rn} = \frac{Q_{Ra}(1 - e^{-\lambda t})(I_s - I_{f1})}{(I_e - I_{f2})V}, \quad (6)$$

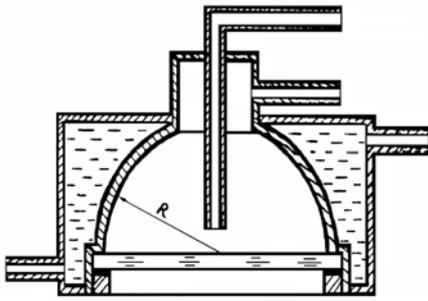


Рис. 13. Полусферическая охлаждаемая проточной водой сцинтилляционная камера для регистрации изотопов радона в статическом и проточном режимах.

где Q_{Ra} - содержание радия в эталоне (эталонном служит жидкий раствор соли радия); λ - постоянная распада радона; t -время накопления радона из радия в эталоне; I_e и I_s - ионизационный ток от эталона и пробы, соответственно; I_{f1} - среднеарифметическое значение натурального рассеяния (перед измерением пробы и после него); I_{f2} -среднеарифметическое значение натурального рассеяния (перед измерением эталона и после него); V -объем взятой жидкости или объем эманационной камеры.

$$Q_{Rn} = Q_0 \frac{V_1}{V_1 + V_2 - V_3 + V_4 + \alpha V_3}, \quad (7)$$

где Q_0 -количество радона в пробе жидкости, кюри; V_1 -объем ионизационной камеры; V_2 -объем промывалки с исследуемой жидкостью; V_3 -объем жидкости; V_4 -объем соединительных трубок, осушителя и груши; α -коэффициент растворимости радона в исследуемой жидкости.

Если при эталонировании прибора также применялся циркуляционный метод, то содержание радона в исследуемой пробе выражается так:

$$Q_{Rn} = Q_{Ra} \frac{I_s}{I_e} \frac{V_2 - V_3 + V_1 + V_4 + \alpha V_3}{V - V_0 + V_1 + V_4 + \alpha V_0}, \quad (8)$$

где Q_{Ra} -содержание радия в эталоне; V -объем барботера с эталоном; V_0 -объем жидкого эталона; α_0 -коэффициент растворимости радона в жидкости эталона.

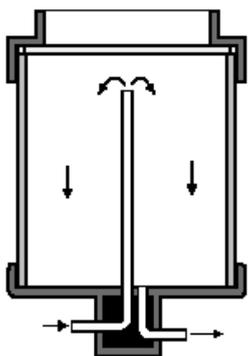


Рис. 14. Цилиндрическая проточная сцинтилляционная камера для регистрации торона (внутренние стенки покрыты тонким слоем ZnS).

Практически при циркуляционной схеме перевода радона в раствор при эталонировании и измерении пробы добиваются постоянства объемов. В этом случае исключается необходимость вводить поправку на объем.

При измерении сильно минерализованных вод или жидкостей со значительным коэффициентом растворимости α для повышения точности результатов в схему эталонирования необходимо включить промывалку с жидкостью такого же состава. Определение содержания радона в сильно газированных водах следует проводить вакуумным методом.

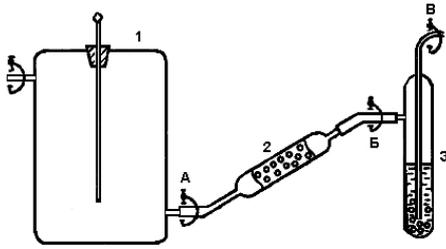


Рис. 15. Схема введения радона в камеру вакуумным способом: 1 – камера; 2 – осушитель (CaCl_2); 3 – барботер. А, Б, В - зажимы

3.2 Определение торона и актинона

Определение количества торона (^{220}Rn) и актинона (^{219}Rn) вследствие малой продолжительности их жизни проводится в проходящей струе воздуха. В большинстве случаев измерения по торону и актинону используются для определения содержания ThX и AcX (изотопы радия) эманационным методом. Схема установки для измерения торона изображена на **Рис. 17**.

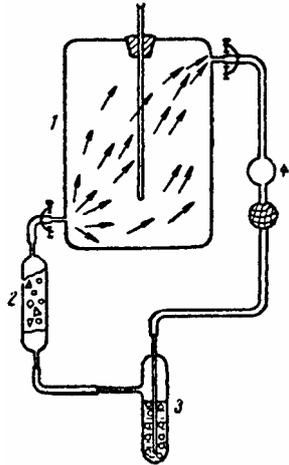


Рис. 16. Циркуляционная схема введения радона в камеру: 1 – камера; 2 – осушитель (CaCl_2); 3 – барботер, 4 – резиновая груша

Так как величина скорости счёта в камере при измерении в проходящей струе зависит от скорости движения воздушной струи, то перед измерением эталона и пробы необходимо определить оптимальную объемную скорость. Оптимальная скорость, соответствующая максимальному значению скорости счета, находится опытным путем. Измерение торона позволяет определить содержание ThX в пробе.

Эталонирование прибора проводится при каждой серии измерений. Постоянная прибора (цена деления прибора в минуту в граммах тория) определяются по формуле

$$j = \frac{q}{I_e - I_f} \frac{\text{гTh}}{\text{делений/мин}}, \quad (9)$$

где q -количество ThX (^{228}Ra) в эталоне в граммах равновесного тория.

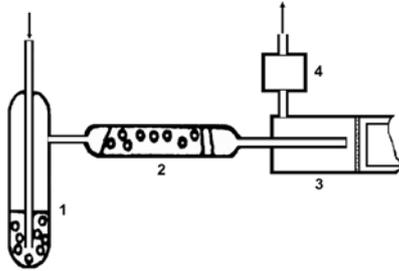


Рис. 17. Схема проточной установки для измерения торона: 1 – барботер с эталоном или пробой, содержащей ThX ; 2 – осушитель; 3 – эманационная камера, 4 – реометр

В качестве эталона используется раствор «старой» (больше 50 лет с момента приготовления) соли тория или раствор ториевого минерала, содержащего несколько миллиграммов тория.

3.3 Анализ изотопов радона при их совместном присутствии

Если задача в анализируемой пробе газа одновременно присутствуют торон и актинон, то в схему для измерения в проходящей струе воздуха между камерой и источником смеси радиоактивных газов включают промежуточный сосуд такой емкости, чтобы воздух проходил через него приблизительно в течение 1 мин. За это время актинон практически распадается полностью, а торон - только наполовину. Измерение в таких условиях позволяет определить торон в присутствии актинона.

При определении радона и торона при их совместном присутствии, воздух, содержащий радон и торон вакуумным методом вводится в эманационную камеру. Метод требует двух счетных периодов для каждого образца: 1-мин счет в момент ввода газовой пробы в сцинтилляционную камеру и последующий 5- или 10 мин счет через 5 мин после начала анализа. Концентрация радона-222 рассчитывается по второму измерению. Активность радона и продуктов его распада учитывается при анализе первичного измерения - остаток активности дает концентрацию торона. Ошибка определения торона существенно падает при использовании трех параллельных анализов и увеличивается пропорционально росту концентрации радона.

Определение радона и торона при их совместном присутствии успешно проводится твёрдотельными (плёночными) трековыми детекторами. Например, пассивный двухплёночный чашечный метод может быть использован для раздельного измерения концентраций радона и торона, при их совместном присутствии в атмосфере. Устройство (**Рис.19**) представляет собой ячейку из двух полусферических стальных камер диаметром 120 и 75 мм. Анализируемый воздух поступает в большую камеру и через капиллярное отверстие диффундирует в меньшую камеру. В каждой камере имеется свой плёночный детектор. Пленка в большой (входной) камере регистрирует треки α -частиц, возникающие в основном из-за распада торона и его дочерних продуктов. Вторая пленка (в дальней малой камере) регистрирует треки, обусловленные распадом

радона и его активного налета при незначительном вкладе торона (Торон за время прохождения по капилляру успевает распасться). После экспонирования пленки подвергают травлению и определяют плотность распределения треков по поверхности детектора. Предел обнаружения составляет 3 Бк/м³ для радона и 9 Бк/м³ для торона при 2-х месячной экспозиции.

Определение содержания АсХ по актинону проводится так же как и определение ThX по торону. Разница лишь в объемной скорости воздушной струи, которая в этом случае должна быть в несколько раз больше. В качестве эталона используется раствор равновесного уранового минерала (обычно уранинит или урановая смолка). В равновесном состоянии 1 г урана содержит $2,94 \cdot 10^{-13}$ г АсХ.

При исследовании руд и минералов в растворе могут одновременно находиться Ra, ThX и АсХ. Так как радон при измерениях в проходящей струе воздуха обычно не создает существенных помех для определения торона и актинона, задача в этом случае сводится к совместному измерению торона и актинона.

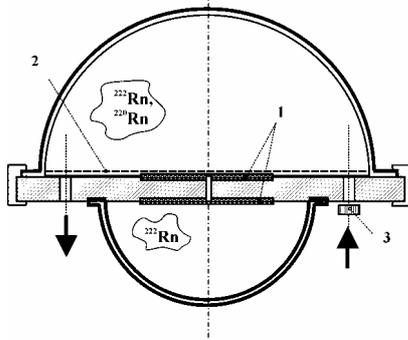


Рис. 18. Устройство с двумя пленочными твердотельными детекторами для одновременного измерения концентраций как радона, так и торона в воздухе

- 1 – поликарбонатные мембраны
- 2 – пористый металл
- 3 – фильтр из стекловолокна

При измерении актинона невозможно выбрать такие условия, при которых детектор не регистрировал бы торон. Поэтому измерение торона и актинона ведется совместно. Практически это осуществляется измерением пробы при двух скоростях воздуха, соответствующих оптимальным условиям для измерения торона и актинона.

Смеси радон-торон обычно анализируют методом совпадений.

Как известно, торон с периодом 55,6 сек. превращается в полоний-216, который имеет период полураспада 0,15 сек. Оба нуклида являются α -излучателями. Этими обстоятельствами можно воспользоваться для регистрации торона на фоне радона. В простом варианте метода используется обычная сцинтилляционная камера с ФЭУ. Однако здесь с сигнал с ФЭУ поступает на двухканальное устройство. В первом канале регистрируется суммарная скорость счета (радон + торон), а во втором канале регистрируется альфа-альфа совпадения торона и полония-216. Сигнал со второго канала поступает только если два акта распада произошли во временном интервале от 0,012 до 0,6 сек. В первом приближении можно полагать, что во втором канале регистрируется исключительно торон. Для уточнения используется калибровка по эталону и специальный математический аппарат. При использовании сцинтилляционной камеры объемом 1,4 л удастся надежно регистрировать концентрации 7 и 1 Бк/м³ для радона и торона, соответственно.

Для отдельной регистрации радона и торона при их совместном присутствии используется также двухфильтровый метод и метод α -спектроскопии.

3.4 Определение радона по продуктам его распада

3.4.1 Метод фильтров

Большинство методов определения рожденных в воздухе дочерних продуктов радона требует кратковременного пропускания строго определенного объема изучаемого воздуха через фильтр с последующим измерением активности фильтра (во время отбора газа или после). Процесс детектирования существенно упрощается, поскольку данный способ нечувствителен к различиям в энергии α -частиц от различных нуклидов.

Рассмотрим способ определения радона по продуктам его распада при условии равновесия между ними. Пусть воздух, в котором продукты распада радона находятся в равновесии с радоном и концентрация радона остается неизменной, с постоянной скоростью пропускается через фильтр, собирающий продукты распада. Обозначим Δ время, в течение которого атомы радиоактивного элемента распадутся до части, равной $1/e$ от первоначального количества, т.е. среднее время жизни атомов, равное $1/\lambda$. Тогда Δ_A , Δ_B , Δ_C и $\Delta_{C'}$ будет соответственно среднее время жизни RaA, RaB, RaC и RaC', θ - время фильтрации воздуха в минутах, t - время, прошедшее с момента отбора пробы до ее измерения.

Используя принятые обозначения, можно записать, что число α - или β -частиц, испускаемых при распаде каждого из осевших на фильтр продуктов распада радона, для времени измерения $t_2 - t_1$ будет соответственно равно:

$$N_{RaA(\alpha)} = 2,22 \vartheta \chi \varepsilon \Delta_A^2 A \alpha; \quad (10)$$

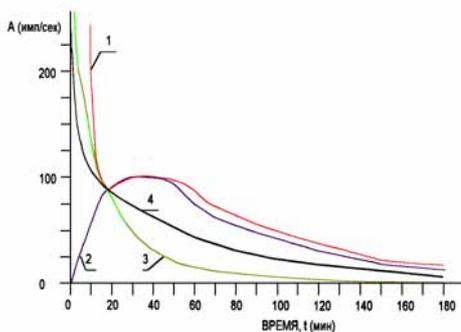
$$N_{RaB(\beta)} = 2,229\chi\varepsilon * \left[\frac{\Delta_A^3 Aa}{\Delta_A - \Delta_B} + \frac{\Delta_B^3 - Bb}{\Delta_B - \Delta_A} \right]; \quad (11)$$

$$N_{RaC(\beta)} = 2,229\chi\varepsilon * \left[\frac{\Delta_A^4 Aa}{(\Delta_A - \Delta_B)(\Delta_A - \Delta_C)} + \frac{\Delta_B^4 Bb}{(\Delta_B - \Delta_A)(\Delta_B - \Delta_C)} + \frac{\Delta_C^4 Cc}{(\Delta_C - \Delta_A)(\Delta_C - \Delta_B)} \right]; \quad (12)$$

$$N_{RaC'(\alpha)} = 2,229\chi\varepsilon * \left[\frac{\Delta_A^5 Aa}{(\Delta_A - \Delta_B)(\Delta_A - \Delta_C)(\Delta_A - \Delta_{C'})} + \frac{\Delta_B^5 Bb}{(\Delta_B - \Delta_A)(\Delta_B - \Delta_C)(\Delta_B - \Delta_{C'})} + \frac{\Delta_C^5 Cc}{(\Delta_C - \Delta_A)(\Delta_C - \Delta_B)(\Delta_C - \Delta_{C'})} + \frac{\Delta_{C'}^5 C'c'}{(\Delta_{C'} - \Delta_A)(\Delta_{C'} - \Delta_B)(\Delta_{C'} - \Delta_C)} \right]. \quad (13)$$

Так как $\Delta_{C'}$ очень мало, количество α -частиц для RaC' будет практически определяться таким же множителем, как и количество β -частиц для RaC.

Рис. 19. Теоретические кривые изменения альфа-активности фильтра после пропускания через него воздуха, содержащего аэрозоли с продуктами распада радона. Соотношение $A_0:B_0:C_0$: 1 – 1:1:0, 2 – 0:1:0, 3 – 1:8,9:6,5 (состояние равновесия)



В приведенных выше выражениях для удобства записи приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A &= 1 - e^{-\theta/\Delta_A}; B = 1 - e^{-\theta/\Delta_B}; C = e^{-\theta/\Delta_C}; \\ C' &= 1 - e^{-\theta/\Delta_{C'}}; \\ a &= e^{-t_1/\Delta_A} - e^{-t_2/\Delta_A}; b = e^{-t_1/\Delta_B} - e^{-t_2/\Delta_B}; \\ c &= e^{-t_1/\Delta_C} - e^{-t_2/\Delta_C}; c' = e^{-t_1/\Delta_{C'}} - e^{-t_2/\Delta_{C'}}; \end{aligned} \quad (14)$$

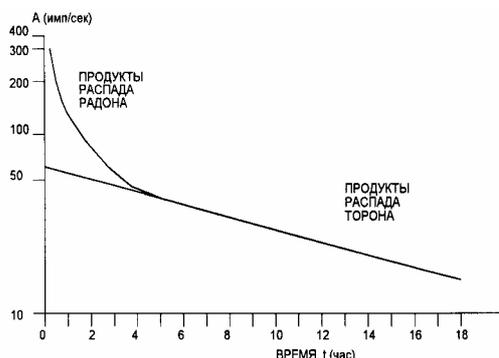
v - скорость фильтрации воздуха, л/мин; χ - концентрация радона, микрокюри/л; ε и ε^* - коэффициенты использования α - и β -излучения соответствующей установкой.

После подстановки численных значений коэффициентов выражения, связывающие концентрацию соответствующих продуктов распада радона с концентрацией радона, примут вид:

$$\begin{aligned} N_{RaA(\alpha)} &= 19,4Aa2,229\chi\varepsilon; \\ N_{RaB(\beta)} &= (-2,5Aa + 1687Bb)\chi2,229\varepsilon^*; \\ N_{RaC(\beta)} &= (0,5Aa + 6367Bb - 2652Cc)\chi2,229\varepsilon^*; \\ N_{RaC'(\alpha)} &= (0,5Aa + 6367Bb - 2652Cc)\chi2,229\varepsilon^*. \end{aligned} \quad (15)$$

Используя эти выражения, можно определить концентрацию радона (в микрокюри/л), если известно общее число зарегистрированных α - или β -частиц, испускаемое соответствующими продуктами распада.

Рис. 20. Кривые распада α -активности фильтра (смесь радона и торона).



Эффективный период полураспада активного налета радона = 40 минут. Эффективный период полураспада активного налета торона = 10,6 часа.

Кинетика распада активного налёта может быть использована для определения концентраций радона и торона при их совместном присутствии.

С целью анализа воздух пропускают через фильтр и измеряют кривую изменения α -активности фильтра от времени (Рис.14). Активный налет долгоживущего радона распадается довольно быстро (эффективный период полураспада 40 мин) и на фильтре остается долгоживущий активный налет от короткоживущего торона (эффективный период полураспада 19,6 часа). Разлагая по стандартной методике кривые распада можно найти вклады радона и торона.

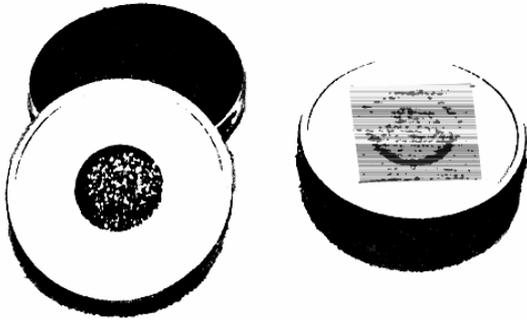


Рис. 21. Конструкция адсорбционного фильтра (рабочий материал – активированный уголь) для определения концентрации радона

3.4.2 Адсорбционные методы мониторинга радона

Для регистрации радона в окружающей среде могут быть использовано свойство радона поглощаться активированным углем. С этой целью, например, используются коллекторы (Рис. 21) из нержавеющей стали диаметром 8 см и высотой 2,4 см. В коллекторе имеется отверстие диаметром 4 см покрытое фильтром из пористой (диаметр пор 69 микрон) нержавеющей стали 0.318 см. Фильтр уменьшает скорости адсорбции и десорбции как ^{222}Rn , так и паров воды в 10 раз по сравнению с открытым коллектором. Фильтр позволяет эксплуатировать коллектор в условиях повышенной влажности. (Адсорбция воды существенно уменьшает емкость активированного угля по отношению к радону и поэтому адсорбент следует как-то защищать от проникновения водяных паров. Использование для этих целей гидрофобных полимерных пленок препятствует проникновению воды, но резко зарезает поток радона. Пористые фильтры позволяют найти компромисс). Пассивный коллектор доверху заполняется активированным углем (вес 50 гр, дисперсность 6х16 меш). Детектор в течение 1-7 дней экспонируется в атмосфере, затем закрывается крышкой с тонкой алюминиевой фольгой, препятствующей утечке радона, но не поглощающей гамма-излучение. Через три часа измеряется гамма-активность датчика. Затем детектор прогревается при 110°C для десорбции радона и вновь используется.

3.5 Промышленные приборы для мониторинга радона

3.5.1 Радонометры

Применение радонометров реализует методы, при которых воздух при измерениях предварительно отфильтровывают от аэрозолей дочерние продукты распада. После этого измерительное устройство с анализируемым воздухом, содержащим радон-газ, выдерживается в течение некоторого времени (обычно 150-180 мин.) для установления равновесия между радонем и ДПР, после чего производится определение объемной активности радона по излучению радона и/или ДПР. Из ряда систем измерения, в которых реализованы модификации этого метода, наиболее распространены установки со съёмными сцинтилляционными камерами, которые заполняют в исследуемом помещении, а анализируют в лаборатории. Нижняя граница диапазона измерений этих детекторов составляет от 20-50 до 500 Бк/м³ в зависимости от объема камеры, характеристик регистрирующей аппаратуры, особенностей метода измерений и др.

Наиболее известными радонометрами, выпускаемыми у нас в стране, являются: РГА-500 с измерительными камерами объемом 500 мл и его более ранние модификации, выпускаемый ВИРГ "Рудгеофизика" (СПб), САС-Р-2 с измерительными камерами объемом 50 и 500 мл (СПбНИИРГ) и др. Также к радонометрам мгновенного типа следует отнести РГГ-01Т (НИИПиММ) и адсорбционный модуль из состава комплекта "Камера" (НТЦ "НИТОН", Москва), в которых отбор проб анализируемого воздуха выполняется т.н. активным методом - прокачкой его через адсорбер. Наконец, довольно широко распространенным радонометром в стране является радонометр РРА-01 и его более поздние его модификации (МТМ "Защита", Москва) и др., в котором измерение объемной активности радона в воздухе основано на регистрации альфа излучения RaA с помощью спектрометрического ППД.

3.5.2 Радиометры аэрозолей радона и торона

В этих радиометрах используются следующие обязательные операции:

- отбор проб воздуха на аэрозольные фильтры;
- регистрация α - и/или β -активности осевших на фильтрах аэрозолей радионуклидов в течение времени Δt_i (при этом если $i=1$, то говорят о т.н. одноточечных методах; если $i=2$, - то метод называется двухточечный и т.д.).



Рис. 22. β , γ -Спектрометрический анализатор аэрозолей «Жасмин».

Основными метрологическими характеристиками системы измерений общей активности аэрозолей дочерних продуктов распада радона (и/или торона) в воздухе являются:

- 1) расход воздуха через фильтр при отборе проб;
- 2) эффективность улавливания аэрозолей;
- 3) эффективность регистрации α -излучения ДПР и ДПТ,

осажденных на фильтр;

4) уровень собственного фона;

5) диапазон измерений;

6) предел основной погрешности измерений.

Нижний предел диапазона измерений общей активности аэрозолей дочерних продуктов радона для большинства систем измерения обычно составляет 10-20 Бк/м³; дальнейшее снижение его требует увеличения расхода воздуха при одновременном снижении удельного сопротивления фильтра, увеличения эффективности регистрации излучения ДПР и т.д., что обычно связано с существенными конструктивными сложностями. С другой стороны для практических работ этого, как правило, почти всегда бывает достаточно. В целом существующий парк систем измерения этого типа имеет более или менее одинаковые метрологические характеристики и, как правило, отличается сервисными возможностями. Наиболее существенные их недоработки имеют место в плане стабильности технических, эксплуатационных и метрологических характеристик. На наш взгляд, именно несоответствием требованиям стандартов и объясняется бедность Государственного реестра страны этими средствами измерений, - в настоящее время в нем представлен один радиометр «РАМОН-01». Из числа наиболее распространенных следует назвать радиометры РГА-01Т (НИИПиММ), РАА-02 (СПбНИИРГ), «ОНЕГА - М» и его модификации (ВИРГ «Рудгеофизика») и др.

Низкопороговый измеритель радона РЗА-04 «Омега» состоит из α -радиометра и специального воздухоудного устройства. Принцип измерения объемной активности радона и торона заключается в отборе аэрозолей дочерних продуктов радона и торона на аэрозольные фильтры, в измерении α -излучателей радиометром и в расчете по этим данным концентрации радона C_{Rn} . С помощью воздухоудного устройства прокачивают воздух при определенной скорости (например, 20л/мин) за определенное время (3 мин) через аэрозольный фильтр. Далее измеряют α -радиоактивность фильтра в радиометре. Затем производят повторный замер, но уже с поглощающим экраном (измерение других излучений фона).

3.5.3 Мониторы радона и аэрозолей ДПР в воздухе

Радоновые мониторы представляют собой средства измерений, в которых реализован принцип регистрации и измерений объемной активности радона в воздухе в течение длительного времени. В отличие от средств измерений интегрального типа, радоновые мониторы обеспечивают не только измерение интегральной объемной активности радона в воздухе, но и возможность анализировать изменение объемной активности радона в воздухе в течение длительного (до нескольких месяцев и даже лет) времени, сопоставлять эти изменения со временем суток, года, наружными метеоусловиями и т.д. И хотя радоновые мониторы в принципе могут применяться для обследования зданий, все же основное их назначение - это решение исследовательских задач в рамках федеральной и региональных целевых программ «Радон».

В Государственном Реестре средств измерений РФ в настоящее время представлен единственный радон-монитор **AlphaGUARD Mod.PQ2000** производства фирмы Genitron Instruments GmbH (Германия). Радон-монитор AlphaGUARD Mod.PQ2000, а также его модификация с литером «М», который зарегистрирован в Государственном Реестре средств измерений в качестве образцового средства измерений ОА радона в воздухе. В числе других следует указать мониторы «Atmos -12D» (Швеция), «PRASSI Mod.5S» фирмы Silena и др. для непрерывной регистрации ОА радона в воздухе. Квазимониторами ОА аэрозолей ДПР и ДПТ в воздухе можно назвать монитор «Mod.4S» фирмы Silena, радиометр «SARAD EQF 3020» немецкой фирмы «SARAD GmbH» (одновременное измерение ОА радона и ЭРОА радона) и ряд других. Известна специальная модификация радон-монитора «AlphaGUARD Mod. PQ2000-WL» с аэрозольным модулем на базе радиометра «TN-WL-02» фирмы «Thomson&Nielsen Electronic Ltd.» (Канада) для непрерывной регистрации объемной активности аэрозолей дочерних продуктов распада в воздухе и расчета коэффициента радиоактивного равновесия. В **Табл. 1** представлены приборы с их техническими характеристиками.

Табл. 1. Перечень средств измерений,

№ п/п	Наименование и тип прибора	Тип детектора	Фирма (страна)	Измеряемая величина	Диапазон и погрешность измерений
1	2	3	4	5	6
1	Интегральные средства измерений ОА и ЭРОА радона в воздухе				
1.1	Трековый Комплекс КСИРА 2010Z	Нитратцеллюлозный пленочный трековый детектор	“Радон-Сервис” (Россия)	ОА радона в воздухе	Диапазон экспозиций (А*Т) от 200 до $3 \cdot 10^5$ Бк*м ⁻³ *сутки с погрешностью не более 25 %
1.2	Трековый Комплекс ТРЕК-РЭИ-1	Нитратцеллюлозный пленочный трековый детектор	“НИИЦ-РБ КО” (Россия)	ОА радона в воздухе	Диапазон экспозиций (А*Т) от 200 до $3 \cdot 10^5$ Бк*м ⁻³ *сутки с погрешностью не более 25 %
2	Квазиинтегральные средства измерений ОА и ЭРОА радона в воздухе				
2.1	Многофункциональный комплекс “Камера”	Угольные адсорберы	НИТОН (Россия)	ОА радона в воздухе	Диапазон измерения ОА радона при экспозиции 1-6 суток от 10 Бк/м ³ и более
2.2	Радиометр радона РГГ-01Т	Угольные адсорберы	НИИПиММ (Россия)	ОА радона в воздухе	Диапазон измерения ОА радона 40 - $2 \cdot 10^5$ Бк/м ³ с погрешностью 30%
3	Средства измерений ОА и ЭРОА радона мгновенного типа				
3.1	Радиометры радона				
3.1.1	Радиометр РАМОН-01	Спектрометрический ППД	МЧП “СОЛО”	ОА аэрозолей ДПР и ДПТ	Диапазон измерения ЭРОА радона $4 \cdot 2 \cdot 10^5$ Бк/м ³ с погрешностью 30%
3.1.2	Многофункциональный комплекс “Камера” (аэрозольный модуль)	-	“НИТОН” (Россия)	ОА аэрозолей ДПР и ДПТ	Диапазон измерения ОА ДПР от 1 Бк/м ³ и более; ОА ДПТ от 0,1 Бк/м ³ и более
3.1.3	Радиометр “РАА-02”	ППД	НИИРГ (Россия)	ОА аэрозолей ДПР и ДПТ	Диапазон измерения ЭРОА радона от 15 до $2 \cdot 10^5$ Бк/м ³ с погрешностью не более 25%
3.1.4	Радиометр “РГА-01Т”	Сцинтилляционный детектор	НИИПиММ (Россия)	ОА аэрозолей ДПР и ДПТ	Диапазон измерения ЭРОА радона от 15 до $2 \cdot 10^5$ Бк/м ³ с погрешностью не более 30%
3.2	Мониторы радона и аэрозолей ДПР в воздухе				
3.2.1	Радиометр радона РРА-01М	ППД с электростатическим осаждением ²¹⁸ Po)	МТМ “Защита” (Россия)	ОА радона в воздухе	
3.2.2	Многофункциональный комплекс “Камера”	Угольные адсорберы	“НИТОН” (Россия)	ОА радона в воздухе	
3.2.3	Радиометр радона РГГ-01Т	Угольные адсорберы	“НИИПиММ” (Россия)	ОА радона в воздухе	
4	Мониторы радона				
4.1	Радон-монитор “AlphaGUARD RQ2000”	Импульсная ионизационная камера с 3D-спектрометрической обработкой сигнала	“Genitron Instrum.” (Германия)	Непрерывное измерение ОА радона, температуры, давления и отн. влажности воздуха	

4.2	Радон-монитор "AlphaGUARD PQ2000-T&N"	Детектор по п.3.1 с TTL-входом и аэрозольным модулем "WLM-02T&N"	"Genitron Instrum." (Германия)	Непрерывное измерение ОА и ЭРОА радона, температуры, давления и отн. влажности воздуха
4.3	Радон-монитор "AlphaGUARD PQ2000-S" с почвенным зондом (глубина отбора проб воздуха от 0,2 до 10 м)	Импульсная ионизационная камера с 3d-спектрометрической обработкой сигнала	"Genitron Instrum." (Германия)	Непрерывное измерение ОА радона, температуры, давления и отн. влажности воздуха

Блок детектирования БДГА-03П с сцинтилляционным плёночным детектором предназначен для измерения низких уровней объемной активности α -активных инертных газов ^{222}Rn ^{220}Th в воздухе. Применяется он в составе систем радиационного контроля.

Радиометр α -активных газов РГА-01П предназначен для измерения объемной активности α -излучающего нуклида ^{222}Rn . Применяется при проведении геологоразведочных работ, на горнодобывающих предприятиях, а также в лабораториях и производствах, связанных с переработкой и применением материалов, содержащих и выделяющих ^{222}Rn . Радиометр состоит из пульта УИО-01П, устройства детектирования с воздухопрокачивающим устройством УДГА-01П и щупа для забора воздуха из скважин.

Радиометры РКС-02С предназначены для измерения объемной активности альфа- и бета-излучающих нуклидов, в том числе йода в воде. Применяются для радиационного контроля объектов природной среды, радиационного контроля на объектах с ядерными энергетическими установками, а также в лабораториях и производствах, связанных с радиоактивными веществами. В зависимости от выполняемых функций радиометры имеют два варианта исполнения: **РКС-02С** для измерения β -активности радионуклидов в воде и газообразных пробах, а так же для измерения активности радионуклидов йода в воде и **РКС-02С1** измерения α - и β -активности радионуклидов в воде и газообразных пробах, а так же для измерения активности радионуклидов йода в воде.

Радиометры имеют два варианта исполнения: **РКС-02С** для измерения β -активности радионуклидов в воде и газообразных пробах, а так же для измерения активности радионуклидов йода в воде и **РКС-02С1** измерения α - и β -активности радионуклидов в воде и газообразных пробах, а так же для измерения активности радионуклидов йода в воде.

Радиометр объёмной активности радона РГА-06П определяет мгновенную активность радона, рассчитывает эквивалентную равновесную объёмную активность (ЭРОА) радона в единицах Бк/м³ и в единицах величин скрытой энергии МэВ/л, эквивалентную равновесную объёмную активность радона при проведении интегральных измерений. Предусмотрена возможность измерения объёмной активности торона-220. Метод измерения заключается в прокачке контролируемого воздуха через измерительную кювету с помощью воздуходувки со скоростью 8л/мин и регистрации альфа-излучения радона-222 и торона-220 пленочным сцинтиллятором с чувствительной поверхностью 3000 см², размещенным в измерительной кювете объемом 2,7 л. Особенностью сцинтиллятора является низкая адсорбция продуктов распада радона на его поверхности. Фильтр типа АФА-РСП во входном штуцере исключает попадание продуктов распада радона в измерительный объём кюветы. Фотоумножитель ФЭУ-167 регистрирует сцинтилляции. Радиометр конструктивно выполнен в виде алюминиевого цилиндра, вмещающего блок детектирования (БД) и измерительный пульт. БД, расположенный в нижней части корпуса, включает в себя кювету, узел воздуходувки, ФЭУ с делителем, узлы высоковольтного питания и первичной обработки информации. В верхней части цилиндрического корпуса размещен отсек с электроникой, на боковой поверхности - панель управления и индикации с буквенно-цифровым дисплеем и клавиатурой задания режимов работы. Работа с прибором осуществляется в режиме меню. Информация выводится на 4-х строчный дисплей, управление осуществляется четырьмя кнопками. Радиометр имеет три измерительных диапазона времени измерения: 300 секунд, 2000 сек., и 360 часов) и один служебный режим. Результат любого измерения автоматически заносится в архив объемом 200 результатов измерений продуктов распада радона в Бк/м³ и МэВ/л и мгновенной объёмной активности торона в Бк/м³. При запуске измерения содержание архива анализируется. Во время измерения на дисплей выводится сообщение о выполняемом этапе и время, оставшееся до окончания измерения.



для