

## **ПРИМЕНЕНИЕ АСПИРАЦИОННОГО МЕТОДА В ИЗМЕРЕНИИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

А.М. Хворых<sup>1</sup>, Н.Ю. Юдина<sup>1</sup>, В.А. Попов<sup>1</sup>, Ш.Х. Урунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

**Аннотация.** Настоящая статья рассматривает применение аспирационного метода в измерении объемной активности радона в окружающей среде. Данный метод обеспечивает возможность контролировать процесс сбора образцов и проводить измерения в реальном времени, что делает его эффективным инструментом для мониторинга радона в различных средах. Исследования, проведенные с применением аспирационного метода, позволяют получить ценные данные о концентрации радона и его дочерних продуктов, что является важным вопросом для обеспечения радиационной безопасности и здоровья человека.

**Ключевые слова:** радон, радиометрия, нормы радиационной безопасности, дочерние продукты распада, метод Маркова, эквивалентная равновесная объемная активность.

## **APPLICATION OF ASPIRATION METHOD IN MEASUREMENT VOLUMETRIC ACTIVITY OF RADON IN THE ENVIRONMENT**

A.M. Khvorykh<sup>1</sup>, N.Yu. Yudina<sup>1</sup>, V.A. Popov<sup>1</sup>, Sh.H. Urunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

**Abstract.** This article discusses the application of the aspirational method in measuring the volumetric activity of radon in the environment. This method provides the ability to control the sampling process and conduct real-time measurements, making it an effective tool for radon monitoring in various environments. Research conducted using the aspirational method provides valuable data on radon concentration and its progeny, which is crucial for ensuring radiation safety and human health.

**Keywords:** radon, radiometry, radiation safety standards, daughter decay products, Markov method, equivalent equilibrium volume activity.

Радон – это радиоактивный элемент таблицы Менделеева, который образуется в результате распада урана и тория в земной коре. Данный газ является одним из основных источников ионизирующего излучения, а его дочерние продукты распада (ДПР) несут большую опасность для дыхательной системы человека. Обнаружение радона и его ДПР является важным условием радиационной безопасности. Для того, чтобы контролировать уровень радона в воздухе помещений требуются точные и надёжные методы измерения. В данной статье рассматриваются различные способы измерения объёмной активности радона.

Рассмотрим пассивные методы измерения, которые основываются на естественные процессы диффузии и накопления радона в детекторах за определённый период времени. Также данные методы не требуют использования внешних источников энергии.

Электростатический метод, основанный на электростатике, использует электрические поля для притяжения и удержания ДПР радона на поверхности детектора.

Трековый метод измерения объёмной активности радона и его ДПР использует чувствительные материалы, которые сохраняют следы, оставленные альфа-частицами радона и его дочерними продуктами во время их распада.

Термолюминесцентный метод измерения объёмной активности радона и его ДПР основывается на фундаментальном принципе некоторых материалов сохранять энергию, полученную ими от альфа-частиц. При нагревании эта энергия высвобождается в виде света.

Активные методы измерения отличаются тем, что требуют использования внешних источников энергии для проведения измерения. Эти методы дают возможность получить более прямую, точную и контролируемую оценку концентрации радона в окружающей среде.

Сцинтилляционный метод – это метод, использующий сцинтилляционные детекторы для регистрации радиационных взаимодействий, вызванных радоном и его ДПР. В основе метода лежит, возбуждение атомов в материале при взаимодействии альфа-частиц или гамма-квантов, что вызывает испускание световой вспышки. Далее эти вспышки регистрируются фотоэлектронным умножителем или фотодиодом для последующего анализа.

Полупроводниковый метод измерения объёмной активности радона основан на использовании полупроводниковых детекторов для регистрации радиационных взаимодействий, которые генерируют электрические сигналы под воздействием заряженных частиц.

Ионизационный метод измерения объёмной активности радона основан на ионизации атомов воздуха под действием альфа-частиц, которые испускает радон и его ДПР. Для этого метода обычно применяют ионизационные камеры или пропорциональные счётчики, которые фиксируют электрические сигналы, возникшие в результате ионизации атомов воздуха.

Аспирационные методы измерения объёмной активности радона относятся к активным методам. Методы основаны на прокачке воздуха через фильтры, способные захватывать радон и его ДПР, с помощью вентиляторов или насосов. После чего используют различные методы измерения концентрации радона, такие как спектрометрия, сцинтилляционный анализ и т.д. Рассмотрим аспирационный метод и модель кинетики накопления ДПР радона на воздушном фильтре подробнее.

Методы измерения объёмной активности дочерних продуктов радона включают аспирационный подход к осаждению этих продуктов на воздушном фильтре. Это позволяет оценить объёмную активность дочерних продуктов радона с большой точностью и объективностью. Эффективность улавливания дочерних продуктов фильтром равна  $\eta$  при прокачке воздуха через фильтр со скоростью  $\vartheta$ , м<sup>3</sup>/с.

Изменение количества атомов  $i$ -го изотопа на фильтре вызвано тремя основными процессами: первым – осаждением атомов на фильтр, вторым – добавлением атомов за счёт распада ядер предшествующего изотопа с интенсивностью  $\lambda_{i-1}N_{i-1}$ , и третьим – радиоактивным распадом ядер собственного изотопа с интенсивностью  $\lambda_i N_i$ . Это изменение можно представить уравнением (1):

$$\frac{dN_i}{dt} = C_i \vartheta \eta - \lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1}$$

(1)

где  $\eta$  – коэффициент осаждения ДПР на фильтр.

Решение уравнения (1) можно записать в виде системы (2)

$$\left\{ \begin{array}{l} N_A = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_A} F_{A1}(t), \text{ядер} \\ N_B = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_B} F_{B1}(t) + \frac{C_B \eta \vartheta}{\lambda_B} F_{B2}(t), \text{ядер} \\ N_C = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C1}(t) + \frac{C_B \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C2}(t) + \frac{C_C \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C3}(t), \text{ядер} \end{array} \right.$$

(2)

где  $F_{A1}(t) = 1 - \exp(-\lambda_A t)$ ,

$$F_{B1}(t) = 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \exp(-\lambda_A t) + \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \exp(-\lambda_B t),$$

$$F_{B2} = 1 - \exp(-\lambda_B t),$$

$$F_{C1}(t) = 1 - \frac{\lambda_B \lambda_C}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} \exp(-\lambda_A t) + \frac{\lambda_A \lambda_C}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_B)} \exp(-\lambda_B t) - \frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_C - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_B)} \exp(-\lambda_C t),$$

$$F_{C2}(t) = 1 - \frac{\lambda_C}{\lambda_C - \lambda_B} \exp(-\lambda_B t) + \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} \exp(-\lambda_C t),$$

$$F_{C3}(t) = 1 - \exp(-\lambda_C t).$$

Если время прокачки фиксированное, где  $t = T$ , то по завершении прокачки на фильтре будет находиться следующее количество ядер ДПР:

$$N_A(T) = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_A} F_{A1}(T) = const,$$

$$N_A(T) = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_B} F_{B1}(T) + \frac{C_B \eta \vartheta}{\lambda_B} F_{B2}(T) = const2,$$

$$N_A(T) = \frac{C_A \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C1}(T) + \frac{C_B \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C2}(T) + \frac{C_C \eta \vartheta}{\lambda_C} F_{C3}(T) = const3.$$

Обозначим количество ядер ДПР на фильтре после окончания прокачки как  $n_A, n_B, n_C$ , а текущее время после окончания прокачки –  $\tau$ .

Тогда:

$$\begin{cases} \frac{dn_A(\tau)}{d\tau} = -\lambda_A n_A(\tau) \\ \frac{dn_B(\tau)}{d\tau} = -\lambda_B n_B(\tau) + \lambda_A n_A(\tau) \\ \frac{dn_C(\tau)}{d\tau} = -\lambda_C n_C(\tau) + \lambda_B n_B(\tau) \end{cases}$$

(3)

Начальные условия имеют вид:  $n_A(0) = N_A(T)$ ,  $n_B(0) = N_B(T)$ ,  $n_C(0) = N_C(T)$ .

Решение уравнений (3) имеют вид:

$$n_A(\tau) = N_A(T) e^{-\lambda_A \tau}$$

(4)

$$n_B(\tau) = N_B(T) e^{-\lambda_B \tau} + \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(T) (e^{-\lambda_A \tau} - e^{-\lambda_B \tau})$$

(5)

$$\begin{aligned}
n_C(\tau) = & N_C(T)e^{-\lambda_C\tau} - \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} N_B(T)e^{-\lambda_C\tau} + \frac{\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_C - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_A)} N_A(T)e^{-\lambda_C\tau} \\
& + \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} N_B(T)e^{-\lambda_B\tau} + \frac{\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} N_A(T)e^{-\lambda_A\tau} \\
& - \frac{\lambda_A\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_B)} N_A(T)e^{-\lambda_B\tau} \quad (6)
\end{aligned}$$

Введём обозначения:

$$L_{A1}(\tau) = e^{-\lambda_A\tau},$$

$$L_B(\tau) = e^{-\lambda_B\tau}, L_{B2}(\tau) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A\tau} - e^{-\lambda_B\tau}),$$

$$L_{C3}(\tau) = \lambda_A\lambda_B \left[ \frac{e^{-\lambda_A\tau}}{(\lambda_B - \lambda_A)(\lambda_C - \lambda_A)} + \frac{e^{-\lambda_B\tau}}{(\lambda_A - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_B)} + \frac{e^{-\lambda_C\tau}}{(\lambda_C - \lambda_B)(\lambda_C - \lambda_A)} \right].$$

Тогда уравнения (4), (5), (6) примут вид:

$$n_A(\tau) = N_A(T)L_{A1}(\tau) = \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_A} F_{A1}(T)L_{A1}(\tau),$$

$$\begin{aligned}
n_B(\tau) = & N_B(T)L_{B1}(\tau) + N_A(T)L_{B2}(\tau) \\
= & \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_B} F_{B1}(T)L_{B1}(\tau) + \frac{C_B\eta\vartheta}{\lambda_B} F_{B2}(T)L_{B1}(\tau) + \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_A} F_{A1}(T)L_{B2}
\end{aligned}$$

Или

$$n_B(\tau) = C_A\eta\vartheta \left[ \frac{F_{B1}(T)L_{B1}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{A1}(T)L_{B2}(\tau)}{\lambda_A} \right] + C_B\eta\vartheta \frac{F_{B2}(T)L_{B(?)}}{\lambda_B}$$

$$\begin{aligned}
n_C(\tau) = & N_C(T)L_{C1}(\tau) + N_B(T)L_{C2}(\tau) + N_A(T)L_{C3}(\tau) \\
= & \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_C} F_{C1}(T)L_{C1}(\tau) + \frac{C_B\eta\vartheta}{\lambda_C} F_{C2}(T)L_{C1}(\tau) + \frac{C_C\eta\vartheta}{\lambda_C} F_{C3}(T)L_{C(?)}) \\
& + \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_B} F_{B1}(T)L_{C2}(\tau) + \frac{C_B\eta\vartheta}{\lambda_B} F_{B2}(T)L_{C2}(\tau) + \frac{C_A\eta\vartheta}{\lambda_A} F_{A1}(T)L_{C(?)})
\end{aligned}$$

Или

$$\begin{aligned}
n_C(\tau) = & C_A\eta\vartheta \left[ \frac{F_{A1}(T)L_{C3}(\tau)}{\lambda_A} + \frac{F_{B1}(T)L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C1}(T)L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right] \\
& + C_B\eta\vartheta \left[ \frac{F_{B2}(T)L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C2}(T)L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right] + C_C\eta\vartheta \frac{F_{C3}(T)L_{C1}(\tau)}{\lambda_C}
\end{aligned}$$

Скорость счёта альфа-частиц от фильтра в любой момент времени  $\tau$  определяется активностью альфа-излучающих радионуклидов  $^{218}\text{Po}$  и  $^{214}\text{Po}$  :

$$m(\tau) = \varepsilon\lambda_A n_A(\tau) + \varepsilon\lambda_C n_C(\tau)$$

(7)

где  $\varepsilon$  —эффективность регистрации (светосила) измерительной установки.

Тогда:

$$m(\tau) = C_A \eta \varepsilon \vartheta \left\{ F_{A1}(T) L_{A1}(\tau) + \lambda_C \left[ \frac{F_{A1}(T) L_{C3}(\tau)}{\lambda_A} + \frac{F_{B1}(T) L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C1}(T) L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right] \right\} + C_B \eta \varepsilon \vartheta \lambda_C \left[ \frac{F_{B2}(T) L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C2}(T) L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right] + C_C \eta \varepsilon \vartheta * F_{C3}(T) L_{C1}(\tau)$$

Введём обозначения:

$$G_1(\tau) = \eta \varepsilon \vartheta \left\{ F_{A1}(T) L_{A1}(\tau) + \lambda_C \left[ \frac{F_{A1}(T) L_{C3}(\tau)}{\lambda_A} + \frac{F_{B1}(T) L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C1}(T) L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right] \right\},$$

$$G_2(\tau) = \eta \varepsilon \vartheta \left[ \frac{F_{B2}(T) L_{C2}(\tau)}{\lambda_B} + \frac{F_{C2}(T) L_{C1}(\tau)}{\lambda_C} \right],$$

$$G_3(\tau) = \eta \varepsilon \vartheta F_{C3}(T) L_{C1}(\tau).$$

Таким образом получили выражение для ожидаемой скорости счёта альфа-частиц от фильтра, выраженной через искомые значения концентрации ДПР в воздухе:

$$m(\tau) = C_A G_1(\tau) + C_B G_2(\tau) + C_C G_3(\tau).$$

(8)

Основной задачей обработки результатов измерения активности фильтра является получение информации об объёмных активностях ДПР в воздухе в момент отбора пробы -  $C_A, C_B, C_C$ . С этой целью результаты измерений аппроксимировались функцией  $m(\tau_i)$ , вида (8), по методу наименьших квадратов:

$$Y = \sum [m(\tau_i) - m_i]^2 = \min \quad (9)$$

Условие (9) выполняется при

$$\frac{\delta Y}{\delta C_A} = 0; \quad \frac{\delta Y}{\delta C_B} = 0; \quad \frac{\delta Y}{\delta C_C} = 0.$$

(10)

Подставляя в (10) значения  $Y(m(\tau_i), m_i)$  из уравнения (8), получаем систему из трёх уравнений относительно неизвестных  $C_A, C_B, C_C$ :

$$\begin{cases} C_A \sum G_1^2(\tau_i) + C_B \sum G_1(\tau_i) * G_2 \tau_i + C_C \sum G_1(\tau_i) G_3(\tau_i) - \sum m_i G_1(\tau_i) = 0 \\ C_A \sum G_1(\tau_i) G_2(\tau_i) + C_B \sum G_2^2(\tau_i) + C_C \sum G_2(\tau_i) G_3(\tau_i) - \sum m_i G_2(\tau_i) = 0 \\ C_A \sum G_1(\tau_i) G_3(\tau_i) + C_B \sum G_2(\tau_i) G_3(\tau_i) + C_C \sum G_3^2(\tau_i) - \sum m_i G_3(\tau_i) = 0 \end{cases}$$

Решая данную систему любым численным методом, можно определить исходные значения объёмной активности дочерних продуктов распада радона в воздухе в момент прокачки через фильтр.

Аспирационный метод мониторинга радона предоставляет целый ряд преимуществ. Во-первых, он обеспечивает реальное время мониторинга, позволяя

оперативно реагировать на изменения концентрации радона. Во-вторых, его высокая чувствительность и точность измерений позволяют обнаруживать даже низкие концентрации радона. Кроме того, данный метод обеспечивает контроль над процессом сбора образцов и измерений, что повышает надежность и точность результатов. И, наконец, его широкое применение в различных средах и условиях, включая домашние помещения и рабочие пространства, делает его эффективным инструментом для контроля радиационного загрязнения.

Аспирационный метод мониторинга радона имеет свои недостатки. Во-первых, он может быть более затратным из-за необходимости специализированного оборудования, такого как вентиляторы или насосы. Кроме того, сложность настройки и наладки оборудования для аспирации воздуха и сбора образцов требует определенных навыков и времени. Его результаты также могут быть искажены влиянием вентиляционных систем или других факторов, изменяющих поток воздуха и концентрацию радона. Наконец, необходимость использования энергии для привода вентиляторов или насосов увеличивает энергопотребление системы и затраты на электроэнергию.

Подводя итог вышесказанному, несмотря на некоторые ограничения, аспирационный метод является важным инструментом для измерения объемной активности радона и может быть эффективно использован в различных приложениях, где требуется мониторинг радона и его дочерних продуктов.

### Список литературы

1. Kusnetz, H.L. Radon daughters in mine atmosphere. A field method for determining concentrations / H.L. Kusnetz // Am. Ind. Hyg. Assoc. J. – 1956. - №17. – P.85-88.
2. Rolle R. Rapid working level monitoring / R. Rolle // Health Phys. – 1972. - №22. – P.223-225.
3. Яковлева, В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе: учебное пособие / В.С. Яковлева; Национальный исследовательский Томский политехнический университет– Томск: Изд-во ТПУ, 2019.
4. Сердюкова, А.С. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе / А.С. Сердюкова, Ю.Т. Капитанов. - Москва, 1979. - 294 с.
5. Салтыков, Л.Д. Радиационная безопасность при разведке и добыче урановых руд / Л.Д. Салтыков, И.Л. Шалаев, Ю.А. Лебедев, Л.В. Горбушина – М.: Атомиздат, 1977.

6. Полуэктов А.В., Макаренко Ф.В., Ягодкин А.С. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33-41.

### References

1. Kusnetz, H.L. Radon daughters in mine atmosphere. A field method for determining concentrations / H.L. Kusnetz // Am. Ind. Hyg. Assoc. J. – 1956. - №17. – P.85-88.

2. Rolle R. Rapid working level monitoring / R. Rolle // Health Phys. – 1972. - №22. – P.223-225.

3. Yakovleva, V.S. Methods for determining the volumetric activity of radon isotopes and decay products in the air: textbook / V.S. Yakovleva; National Research Tomsk Polytechnic University – Tomsk: TPU Publishing House, 2019.

4. Serdyukova, A.S. Isotopes of radon and short-lived products of their decay in nature / A.S. Serdyukova, Yu.T. Captains. - Moscow, 1979. - 294 p.

5. Saltykov, L.D. Radiation safety during exploration and mining of uranium ores / L.D. Saltykov, I.L. Shalaev, Yu.A. Lebedev, L.V. Gorbushina - M.: Atomizdat, 1977.

6. Poluektov A.V., Makarenko F.V., Yagodkin A.S. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data // Modeling of systems and processes. - 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 33-41.