
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.1

DOI 10.25587/SVFU.2023.78.54.002

Метод исследования объемной активности радона в водной среде жидкостно-сцинтилляционным спектрометром

Г. А. Игнатьева ✉, В. Н. Кононов, С. Н. Мамаева

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ galich_88@mail.ru

Аннотация. В настоящее время наблюдается рост раковых заболеваний, в том числе рак легких в Республике Саха (Якутия), причем в регионах с повышенным уровнем естественной радиации отмечается отличие количества онкологических заболеваний по сравнению с другими регионами с нормальным радиационным фоном. В связи с чем существует необходимость исследования радиационного фона и его влияния на организм человека, влияния ионизирующих излучений на рост и развитие онкологических заболеваний. Целью данной работы является разработка методики определения концентрации радона в водной среде путем определения соотношения между мгновенной и равновесной активностями радона в водной настойке измельченной урановой руды с применением жидкостной сцинтилляционной альфа- и бета-спектрометрии. В ходе проведения экспериментов был разработан модифицированный метод пробоподготовки, были рассчитаны доли альфа- и бета-распадов дочерних продуктов распада радона (ДПР), измерены их активности на жидкостном сцинтилляционном спектрометре SL-300 с минимально детектируемой активностью в 1 Бк/л, получены график динамики уменьшения объемной активности радона и его ДПР, сравнительный график распада радона в зависимости от времени. Разработанная методика позволит проводить более точный анализ водных проб из водоемов районов с месторождением урана. В дальнейшем на основании результатов данного стартового исследования можно определить зависимость уровня заболеваемости раком легких от концентрации радона в окружающей среде, формировать фундаментальные представления о роли радиации в возникновении и развитии раковых заболеваний.

Ключевые слова: радон, радий, дочерние продукты распада, эквивалентная равновесная объемная активность радона, период полураспада, жидкостная сцинтилляционная спектрометрия, альфа- и бета-активность, радиоактивный распад, радон в жидкостях.

Для цитирования: Игнатьева Г. А., Кононов В. Н., Мамаева С. Н. Метод исследования объемной активности радона в водной среде жидкостно-сцинтилляционным спектрометром. Вестник СВФУ. 2023, Т. 20, №2. С. 15–24. DOI: 10.25587/SVFU.2023.78.54.002.

Method of studying the volumetric activity of radon in aqueous medium by liquid scintillation spectrometer

G. A. Ignateva ✉, V. N. Kononov, S. N. Mamaeva

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ galich_88@mail.ru

Abstract. Currently, there is an increase in cancers, including lung cancer in the Republic of Sakha (Yakutia), and in regions with an increased level of natural radiation, there is a difference in the number of oncological diseases compared to other regions with a normal radiation background. In this connection, there is a need to study the radiation background and its effect on the human body, the effect of ionizing radiation on the growth and development of oncological diseases. The purpose of this work is to develop a methodology for determining the concentration of radon in an aqueous medium by determining the ratio between instantaneous and equilibrium radon activity in an aqueous tincture of crushed uranium ore using liquid scintillation alpha and beta spectrometry. During the experiments, a modified sample preparation method was developed, the proportions of alpha and beta decays of radon daughter decay products (DDP) were calculated, their activity was measured on a liquid scintillation spectrometer SL-300 with a minimum detectable activity of 1 Bq/l, a graph of the dynamics of the decrease in the volumetric activity of radon and its DDP, a comparative graph of radon decay was obtained depending on the time. The developed methodology will allow for a more accurate analysis of water samples from reservoirs of areas with a uranium deposit. In the future, based on the results of this initial study, it is possible to determine the dependence of the incidence of lung cancer on the concentration of radon in the environment, to form fundamental ideas about the role of radiation in the occurrence and development of cancer.

Key words: radon, radium, decay daughter products, equivalent equilibrium volumetric activity of radon, half-life period, liquid scintillation spectrometry, alpha-beta activity, radioactive decay, radon in liquids.

For citation: Ignateva G. A., Kononov V. N., Mamaeva S. N. Method of studying the volumetric activity of radon in aqueous medium by liquid scintillation spectrometer. Vestnik of NEFU. 2023, Vol. 20, No. 2. Pp. 15–24. DOI: 10.25587/SVFU.2023.78.54.002.

Введение

В настоящее время наблюдается большое количество больных с онкологическими заболеваниями, в том числе раком легких, в регионах, в которых наблюдается повышенный уровень концентрации радона в окружающей среде, который вносит основной вклад в формирование суммарной эффективной дозы облучения населения. По данным 2019 года в Республике Саха (Якутия) выявлено 2719 новых случаев злокачественных новообразований. Ведущими нозологиями в общей структуре онкологической заболеваемости являются злокачественные новообразования: легкого – 14,7%, молочной железы – 10,1%, желудка – 6,8%, кожи (кроме меланомы) – 6,6% [1]. В связи с этим существует необходимость выявления зависимости уровня заболеваемости раком легких в зависимости от концентрации радона в биосистемах окружающей среды, т.е. является актуальной задача определения концентрации радона в окружающей среде, в том числе задача определения степени содержания радона в водоемах [2].

Радон является радиоактивным газом без запаха, цвета и вкуса с периодом полураспада $T_{1/2} = 3,82$ суток, который образуется в процессе природного радиоактивного распада урана, присутствующего во всех горных породах и почвах. Этот газ, имеющий плотность примерно в 8 раз больше плотности воздуха, хорошо растворяется в воде. В органических растворителях и в жировой ткани человека растворимость радона в десятки раз выше, чем в воде [3].

В настоящее время определение концентрации радиоактивного элемента производится в течении нескольких суток путем измерения объемной активности с помощью фильтров из активированного угля, ионизационными методами, сцинтилляционными методами, оценкой концентрации дочерних продуктов распада (далее – ДПР), гамма-спектрометрическими методами или методами измерения радона после его выделения из воды при барботаже газа через пробу [2].

Измерение объемной активности радона и вычисление его эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) с модельными взвешивающими коэффициентами является сложной задачей, решаемой при использовании твердотельных эталонов ^{226}Ra , ионизационных камер, полупроводниковых гамма-спектрометров с детекторами из особо чистого германия, и других приборов [4, 5]. Данные экспериментальные методы требуют достаточно больших временных затрат, на основе более сложной схемы проведения эксперимента с применением большого количества аппаратов с более низкой чувствительностью детектирования. Таким образом, разработка менее затратного по времени и более простого в проведении эксперимента метода измерения объемной активности является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка методики определения концентрации радона в водной среде путем расчета соотношения мгновенной и ЭРОА радона в водной настойке измельченной урановой руды с применением метода жидкостной сцинтилляционной альфа- и бета-спектрометрии.

Материалы и методы исследования

Эксперимент определения концентрации радона в водной среде был проведен на основе схемы процесса распада ^{226}Ra (рис. 1), разработанной в НИИ ядерной физики имени Скобельцына МГУ имени Ломоносова [6] и графика объемной активности радиоактивных элементов в зависимости от времени (рис. 2).

На рис. 1 представлена схема распада ^{226}Ra , где указаны периоды полураспадов, вид распада и его доля в процентах.

В схеме кружочком обозначен распад радия ^{226}Ra , в ходе которого в 94,6% случая образуется ^{222}Rn с одновременным испусканием α -частицы и гамма-кванта.

^{222}Rn образовывается с постоянной скоростью и распадается с образованием α -частицы. Его активность со временем t будет меняться в соответствии с законом радиоактивного распада [7]:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где A – активность, A_0 – начальная активность, λ – постоянная распада, t – время.

На рис. 2 показаны зависимости активностей радона и радия от времени, которые объясняют явление векового равновесия.

Для проведения экспериментов был подготовлен образец урановой руды, доставленной из Алданского улуса, которая настаивалась в герметичном сосуде с водой в течение 38 дней (рис. 3), достаточных для достижения векового равновесия радия и радона, когда их активности совпадают (рис. 2).

В соответствии со схемой (рис. 1) для данного эксперимента область интереса процессов распада радиоактивных элементов определяется, начиная с α -распада ^{222}Rn и заканчивая на линии β -распада ^{210}Pb . Во время настаивания бутылки с водой накапливается ^{210}Pb с достаточно большим периодом полураспада 22,5 лет, распады

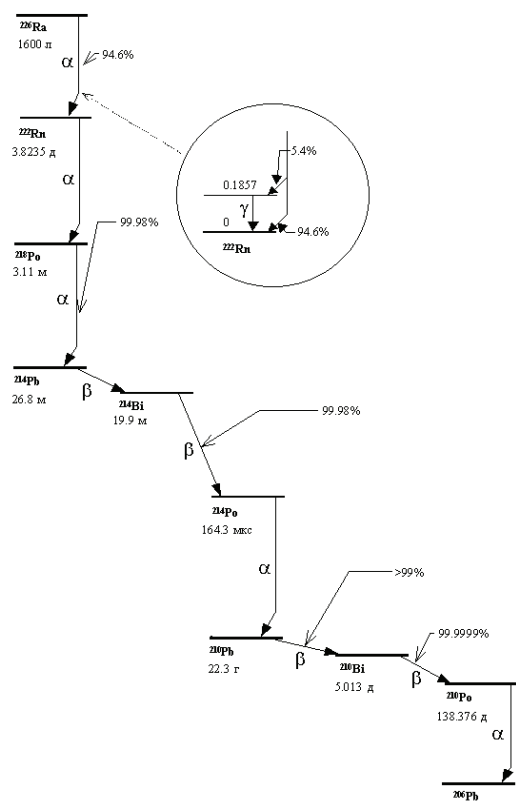


Рис. 1. Схема распада ^{226}Ra
Fig. 1. Decay scheme of ^{226}Ra

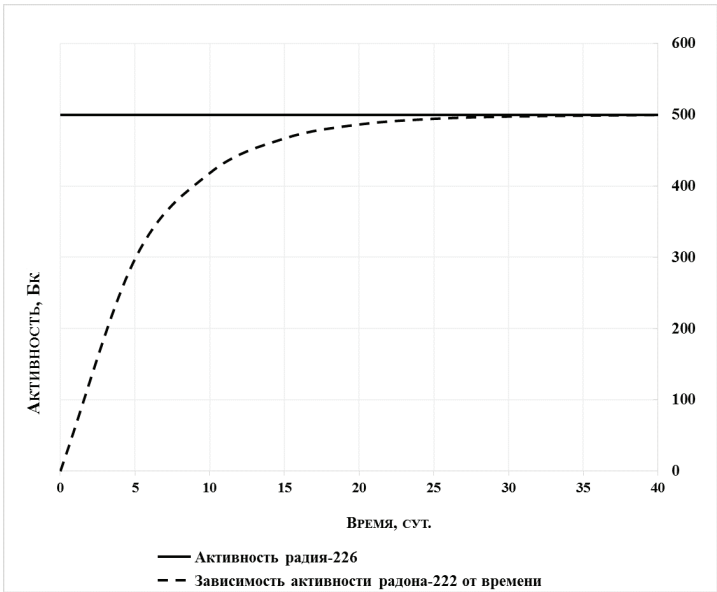


Рис. 2. Зависимость активности от времени: ^{222}Rn – штрихованная линия, ^{226}Ra – сплошная линия
Fig. 2. Time dependence of activity: ^{222}Rn – hatched line, ^{226}Ra – solid line

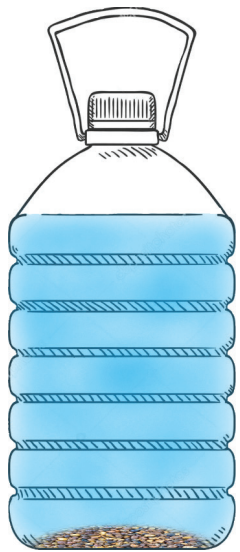


Рис. 3. Герметичный сосуд с настойкой воды с урановой рудой
Fig. 3. Sealed vessel with tincture of water with uranium ore

которого не влияют на измерения концентрации радона. Вода с растворенным в ней радонам и его пятью продуктами распада (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb) отделяется от рудосодержащего образца. Из подготовленной настойки были взяты две пробы с объемами 10 мл (обозначили их как пробы №1 и №2). Проба №2 предварительно очищается от радона методом продувки воздуха (барботаж). По истечении срока полного распада четырех короткоживущих ДПР радона (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), периоды полураспада которых равны: 3,11 мин, 26,8 мин, 19,9 мин, 164,3 мкс соответственно, в пробе №2 остаются ^{210}Pb и его ДПР. Полученные пробы смешиваются с сцинтилляционным коктейлем Ultima Gold LLT в соотношении 1:1 и измеряются на низкофоновом жидкостном сцинтилляционном спектрометре (далее – ЖСС) SL-300 фирмы Hidex (Финляндия). Дистилляция в этом случае исключена, т. к. радон легко улетучивается при кипячении [8]. Образцы хранились в холодильнике при температуре 13-15 °С во избежание получения псевдосигналов [9]. Каждая проба измерялась по 10 раз с длительностью 120 секунд при каждом измерении.

ЖСС SL-300, который позволяет измерять содержание трития в воде до 1 Бк/л (1 распад в секунду в литре жидкости), представляет собой стационарный прибор для измерений активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов методом отношений тройных и двойных совпадений TDCR в жидком сцинтилляторе без предварительной калибровки и без использования реперных эталонных источников.

Информация от трех ФЭУ, установленных под углом 120° друг к другу, анализируется с помощью двух многоканальных анализаторов.

Полученные значения переводятся в Бк/л по формуле:

$$A_v = \frac{CPM}{\varepsilon \cdot V \cdot 60}, \tag{2}$$

где CPM – количество отсчетов в минуту, ε – эффективность регистрации, V – объем пробы в литрах. Эффективность регистрации определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{CPM}{DPM}, \tag{3}$$

где DPM – количество распадов в минуту.

Однако практика измерений на приборе в реальных образцах воды показала существование сильной зависимости показаний прибора от уровней космической радиации.

В спокойные периоды солнечной активности фон соответствовал 30-40 распадам в минуту, а во время магнитных бурь фон доходил до 50 распадов.

В ходе эксперимента были получены значения объемной активности радона и его ДПР (в Бк/л, поскольку измеряется активность в жидкости), образующихся при распадах самого радона и его дочерних элементов, таких как ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , с применением закона радиоактивного распада ^{222}Rn .

Результаты и обсуждения

В данном исследовании были измерены полные объемные активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов подготовленных проб с применением вышеуказанных методик. С помощью метода жидкостной сцинтилляционной альфа- и бета-спектрометрии регистрировались альфа- и бета-излучения радионуклидов в жидкостях: ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , т. е. три альфа-распада и два бета-распада.

Результаты измерения пробы №1 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Динамика уменьшения объемной активности радона и его ДПР (проба №1)

Table 1

Dynamics of the decrease in the volumetric activity of radon and its daughters (sample No. 1)

№	Дата измерения	Сутки	Объемная активность, Бк/л (с вычетом фоновое значения)	Время измерения
1	08.04.2022	0	2886,13±22,93	16:07
2	11.04.2022	3	1529,0±21,85	11:55
3	12.04.2022	4	1250,41±16,36	12:03
4	13.04.2022	5	1067,38±10,05	12:23
5	14.04.2022	6	870,74±16,66	15:21
6	15.04.2022	7	758,62±13,83	13:38
7	25.04.2022	17	166,7±7,57	16:00
8	26.04.2022	18	140,96±4,02	12:58
9	27.04.2022	19	128,39±1,8	11:15
10	29.04.2022	21	101,6±5,56	14:41
11	03.05.2022	25	86,37±2,03	13:23
12	04.05.2022	26	82,75±3,05	13:23
13	05.05.2022	27	76,63±3,28	12:53
14	06.05.2022	28	67,33±3,69	12:30
15	07.05.2022	29	64,49±1,61	13:17
16	11.05.2022	33	65,35±2,21	10:23
17	12.05.2022	34	58,98±2,69	15:46
18	13.05.2022	35	63,21±1,46	12:35
19	14.05.2022	36	63,12±3,12	14:43
20	16.05.2022	38	61,65±3,27	15:08
21	17.05.2022	39	63,63±1,26	15:35
22	18.05.2022	40	60,28±2,23	14:44

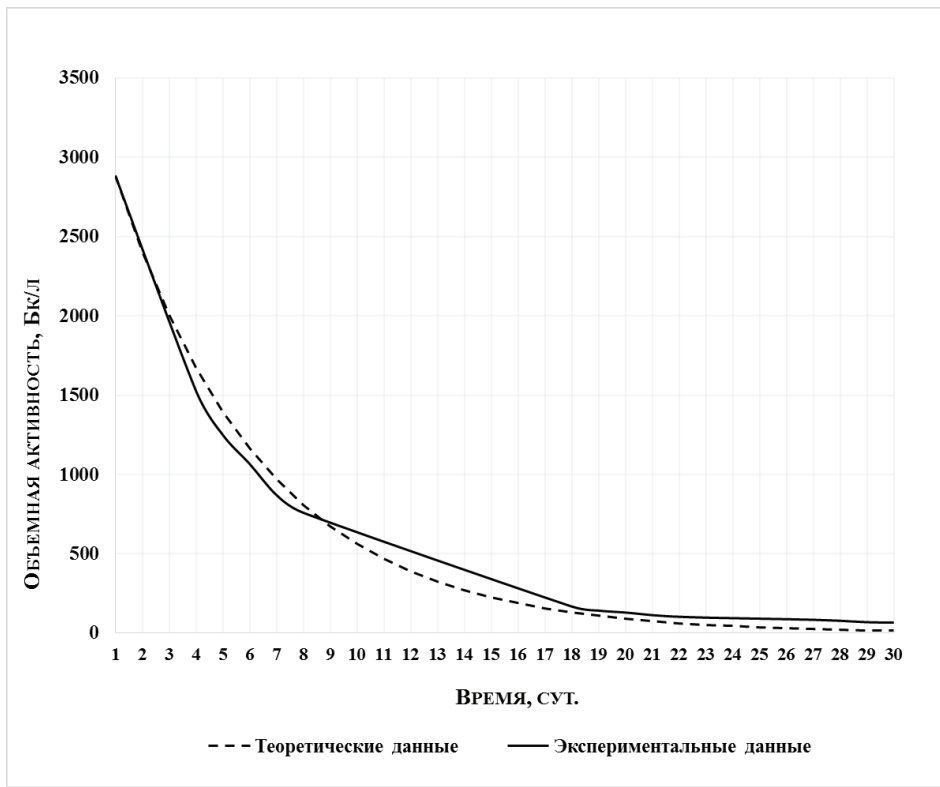


Рис. 4. Сравнительный график распада радона в зависимости от времени
Fig. 4. Comparative graph of radon decay depending on time

Ежедневно проводились наблюдение и фиксация суммарных объемных активностей альфа- и бета-распадов в течение времени, необходимом для полного распада радона и его ДПР. При этом полная активность уменьшалась вдвое каждые четверо суток в соответствии с периодом полураспада радона.

С помощью экспоненциального закона радиоактивного распада (1) рассчитываются изменения активности ^{222}Rn , значения которых вычитаются из измеряемых на ЖСС значений полных активностей и, таким образом, получаются реальные значения активности ДПР радона, соответствующие эквивалентной равновесной объемной активности радона.

Как видно из графика (рис. 4), радон и его ДПР в зависимости от времени активно распадаются. Для сравнения был построен также график теоретических расчетных данных распада радона (рис. 4).

Результаты исследований пробы №1, представленные в табл. 1 и графике сравнений экспериментального и теоретического зависимостей распадов радона (рис. 4), показали, что в данной пробе выявлено достаточное количество радона и его ДПР, что позволяет использовать данный образец в качестве экспериментального образца в данном исследовании с условием проведения его очистки с целью удаления радиоактивных элементов, наличие которых может усиливать фоновое излучение.

Для исследований пробы №2 были учтены время для распада четырех короткоживущих ДПР радона (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), периоды полураспада которых равны: 3,11 мин, 26,8 мин, 19,9 мин, 164,3 мкс, соответственно.

В табл. 2 показаны измерения объемной активности в зависимости от времени.

Таблица 2

Изменения объемной активности радона и его ДПР после барботаж (проба №2)

Table 2

Changes in the volumetric activity of radon and its daughters after barbotage (sample No. 2)

№	Дата измерения	Сутки	Объемная активность, Бк/л (с вычетом фонового значения)	Время измерения
1	08.04.2022	0	569,91±36,67	16:30
2	08.04.2022	0	157,54±8,89	17:27
3	08.04.2022	0	104,5±4,64	18:04
4	08.04.2022	0	65,4±1,79	18:27
5	08.04.2022	0	62,73±3,97	18:55
6	08.04.2022	0	55,5±2,06	19:22
7	11.04.2022	3	46,51±1,47	12:18
8	12.04.2022	4	43,33±1,84	12:26
9	13.04.2022	5	43,66±1,12	12:46
10	14.04.2022	6	51,24±1,71	15:44
11	15.04.2022	7	53,56±1,74	14:01
12	27.04.2022	19	54,34±2,98	11:38
13	03.05.2022	25	57,35±2,15	13:46
14	04.05.2022	26	56,06±1,96	13:46
15	05.05.2022	27	51,84±2,08	13:16
16	06.05.2022	28	50,28±1,71	12:56

В этой таблице представлено поведение распада ДПР радона, которые остались в воде.

Очевидно, что через три часа почти все первые 4 ДПР радона распались, а остальные ДПР – ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po не распались, период полураспада которых 22 года, 5 дней, 138 дней, соответственно.

В качестве фона прибора была рассмотрена дистиллированная вода, которая использовалась для приготовления настойки из урановой руды. Измерение фонового излучения, включающее фон космического излучения и прибора, производилось одновременно с проведением ежедневных измерений проб. Активность фонового излучения вычиталась из активности исследуемой пробы и тем самым исключалось влияние колебаний космической радиации, фон прибора и возможного присутствия трития в воде на измерение полной альфа- и бета-активностей.

Для определения активности ^{222}Rn рассчитывается разность начальной активности пробы №1 и полученной активности пробы №2, которая делится на 5,02 (этот коэффициент

был рассчитан с учетом поправок, связанных с периодом полураспада ^{214}Po , который значительно меньше мертвого времени счетчика) [5]:

$$A_{\text{Rn}} = \frac{(A_1 - A_2)}{5,02}, \quad (4)$$

где A_{Rn} – активность ^{222}Rn , A_1 – полная альфа- и бета-активность первой пробы, A_2 – остаточная альфа- и бета-активность второй пробы.

$$A_{\text{Rn}} = \frac{2886,13 - 55,50}{5,02} = 563,87 \text{ Бк / л} \quad (5)$$

По результатам исследования объемная активность ^{222}Rn в настойке урановой руды составила 592,18 Бк/л.

На основе данного метода определения значения объемной активности радона можно произвести эксперименты по выявлению радона и его концентрации в водоемах.

Важно заметить, что данный метод имеет свои преимущества, заключающиеся в том, что он является более чувствительным методом исследования, чем существующие методы исследования, в том числе метод осаждения дочерних продуктов распада. Кроме того, данный метод можно применять при малых значениях концентрации радона в водной среде и также требует незначительные временные затраты.

Заключение

В данной работе впервые разработан модифицированный метод пробоподготовки для проведения исследования образцов горной породы Эльконского месторождения урана в водной среде для разработки модельного эксперимента по исследованию образцов из водоемов, которое может быть использовано для изучения образцов из водоемов регионов с месторождением урана. Разработанная методика измерения полной активности радона, с помощью которого в дальнейшем можно определить концентрацию радона в водной среде, позволит проводить анализ за короткие сроки (в течение нескольких часов) водных проб из водоемов районов с месторождением урана и определить зависимость уровня заболеваемости раком легких от концентрации радона в окружающей среде. Таким образом, представляемое стартовое исследование может быть применено в формировании фундаментальных представлений о роли радиации в возникновении и развитии раковых заболеваний.

Л и т е р а т у р а

1. Каприн, А. Д. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность) / Под редакцией А. Д. Каприна, В. В. Старинского, А. О. Шахзадовой. Москва : МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. – 2020. – 252 с.
2. Радиационно-гигиенические проблемы влияния радона на состояние здоровья населения / Ф. И. Зуевич, М. Н. Тихонов, Л. В. Довгуша [и др.]. – Санкт-Петербург, Полиграф-Ателье, 2011. – 244 с.
3. Бекман, И. Н. Радон : враг, врач и помощник : курс лекций. – Москва : МГУ, 2005. – 23 с. – URL: <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad2SS.pdf> (дата обращения: 19.11.22).
4. Мостафа, М. Ю. Прототип первичного эталона объемной активности радона / М. Ю. Мостафа, М. В. Жуковский, М. Е. Васянович. – АНРИ. – 2017. – №3 (90). – С. 2–15.
5. Standardization of ^{222}Rn by LSC and comparison with α - and γ -spectrometry / P. Cassette, M. Sahagia, L. Grigorescu [et al.] // Applied radiation and isotopes. – 2006. – Т. 64. – №. 10-11. – С. 1465-1470.
6. Сайт Московского государственного университета : [сайт]. – Москва, 2011. – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/public/radium.htm> (дата обращения: 19.11.22).
7. Мухин, К. Н. Экспериментальная ядерная физика : Т. 1 Физика атомного ядра : учебное пособие [в 3-х томах] / К. Н. Мухин // 6-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 384 с.
8. Лобач, Д. И. О разработке метода измерения содержания радона в воде / Д. И. Лобач, М. Г.

Личко // Сборник трудов 3-го международного симпозиума «Актуальные проблемы дозиметрии», 24–26 октября 2001. – Минск : Международный экологический университет им. А. Д. Сахарова.

9. Самойлов, И. В. Методика определения органически связанного трития в биологических объектах / И. В. Самойлов, А. Н. Шатров, Л. С. Ибраева // Химия и химические технологии. – Радиохимия, 2015. – № 9.

References

1. Kaprin, A. D. (2020). Malignant neoplasms in Russia in 2019 (morbidity and mortality). A. D. Kaprin, V. V. Starinsky, A. O. Shakhzadova (eds.). Moscow: P. A. Herzen Moscow Research Oncological Institute - branch of the Federal State Budgetary Institution «NMITs Radiology» of the Ministry of Health of Russia, 252 p. (in Russian)
2. Zuevich, F. I., Tikhonov, M. N., Dovgusha, L. V. (2011). Radiation-hygienic problems of the influence of radon on the state of public health. St. Petersburg: Polygraph-Atelier, 244 p. (in Russian)
3. Beckman, I. N. (2005). Radon: enemy, doctor and assistant: a course of lectures. Moscow: Moscow State University, 23 p. [Online] Available from: <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad2SS.pdf> [date of access: 11/19/22]. (in Russian)
4. Mostafa, M. Yu. (2017). Prototype of the primary standard of radon volumetric activity/ M. Yu. Mostafa, M. V. Zhukovsky, M. E. Vasyanovich (eds). ANRI. No. 3 (90), pp. 2–15. (in Russian)
5. P. Cassette, M. Sahagia, L. Grigorescu [et al.] (2006). Standardization of ^{222}Rn by LSC and comparison with α - and γ -spectrometry. In: Applied radiation and isotopes. 2006, Vol. 64. No. 10-11, pp. 1465-1470.
6. Website of Moscow State University: [website]. Moscow, 2011. Available from: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/public/radium.htm> [date of access: 11/19/22]. (in Russian)
7. Mukhin, K. N. (2008). Experimental nuclear physics: Vol. 1 Physics of the atomic nucleus: textbook [in 3 volumes]. 6th ed., corrected and revised. St. Petersburg: Lan, 384 p. (in Russian)
8. Lobach, D. I. (2001). On the development of a method for measuring the radon content in water. In: D. I. Lobach, M. G. Lichko (eds). Proceedings of the 3rd international symposium «Actual problems of dosimetry», October 24–26, 2001. Minsk: A.D. Sakharov International Ecological University (in Russian)
9. Samoilov, I.V., Shatrov, A.N., and Ibraeva, L.S.(2015). Method for determination of organically bound tritium in biological objects, In: Chemistry and Chemical Technologies. - Radiochemistry, 2015. No. 9. (in Russian)

ИГНАТЬЕВА Галина Андреевна – ст. преп. каф. общей и экспериментальной физики ФТИ, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

E-mail: galich_88@mail.ru

IGNATEVA Galina Andreevna – Senior lecturer of the Department "General and experimental physics", Institute of Physics and technology, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov.

КОНОНОВ Владлен Николаевич – м. н. с. лаборатории «Радиационные технологии» ФТИ, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

KONONOV Vladlen Nikolaevich – Junior Research Scientist of the Radiation Technologies Laboratory, Institute of Physics and technology, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov.

E-MAIL: vladlenkononov@mail.ru

МАМАЕВА Саргылана Николаевна – к. ф.-м. н., зав. каф. общей и экспериментальной физики ФТИ, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

E-mail: sargylana_mamaeva@mail.ru

MAMAEVA Sargylana Nikolaevna – candidate of physical and mathematical Sciences, Head of the Department "General and experimental physics", Senior Researcher, Radiation Technologies Laboratory, Institute of Physics and technology, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov.