

И. В. Жук¹, К. В. Гусак¹, Д. А. Хакимов^{1,2}¹*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –
Сосны Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*²*Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА В ПРОБАХ МИНЕРАЛЬНОЙ РАДОНОВОЙ ВОДЫ**

Аннотация. Представлены результаты исследования по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости для определения концентрации радона-222 в пробах минеральной радоновой воды. Исследования проб радоновой воды проводились в лабораторных условиях на стационарном гамма-спектрометре на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора. Измерения концентрации в пробах проведены в соответствии с МВИ.МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и концентрация гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» для стандартных пластиковых сосудов «Дента, 0,1 л» и «Маринелли, 1 л», а также стеклянных емкостей объемом 0,5 л с крышками под закрутку и под закатку. Результаты исследований показали, что утечка радона из стеклянной емкости с металлической крышкой под закатку минимальна. Данный способ отбора проб и герметизации измерительной емкости позволяет повысить точность представляемых результатов измерений за счет уменьшения поправок на пробоподготовку при расчете расширенной неопределенности измерений. Стеклянная емкость объемом 0,5 л с металлической крышкой под закатку использована при проведении измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных из скважин и питьевого фонтана санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» (Дятловский район, Гродненская область). Диапазон значений концентрации составил 760–2100 Бк/кг. Выбранная измерительная емкость, способ ее герметизации и геометрия измерений может использоваться для будущих измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных в санаториях Республики Беларусь.

Ключевые слова: минеральные радоновые воды, радон-222, гамма-спектрометрия, концентрация радона, эманиация радона

Для цитирования: Жук, И. В. Использование метода гамма-спектрометрии для определения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды / И. В. Жук, К. В. Гусак, Д. А. Хакимов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 82–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-82-88>

Igor V. Zhuk¹, Krystina V. Husak¹, Dilshod A. Hakimov^{1,2}*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan,***USING THE GAMMA SPECTROMETRY METHOD TO DETERMINE THE CONCENTRATION
OF RADON IN SAMPLES OF MINERAL RADON WATER**

Abstract. The results of a study on the choice of the optimal measurement geometry, measuring capacity and method of sealing the measuring capacity for determining the concentration of radon-222 in samples of mineral radon water are presented. Studies of radon water samples were carried out in laboratory conditions on a stationary gamma spectrometer based on a semiconductor Ge(Li) detector. The concentration measurements in the samples were carried out in accordance with MVI. MN 3421-2010 “Methodology for measuring the volumetric and concentration of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors” for standard plastic vessels “Denta, 0.1 l” and “Marinelli, 1 l”, and glass containers with a volume of 0.5 l with lids for twisting and seaming. The results of the research showed that the leakage of radon from a glass container with a metal lid for sealing is minimal. This method of sampling and sealing the measuring vessel makes it possible to increase the accuracy of the presented measurement results by reducing the corrections for sample preparation when calculating the expanded measurement uncertainty. A glass container with a volume of 0.5 l with a metal cap for seaming was used to measure the concentration of radon in samples of mineral radon water taken from wells and a drinking fountain of the Radon sanatorium of Belagrozdravnitsa JSC (Dyatlovo District, Grodno Region). The concentration range was 760–2100 Bq/kg. The selected measuring container, the method of its sealing and the measurement geometry can be used for future measurements of the radon concentration in samples of mineral radon water taken in the sanatoriums of the Republic of Belarus.

Keywords: mineral radon waters, radon-222, gamma spectrometry, specific activity of radon, radon emanation

For citation: Zhuk I. V., Husak K. V., Hakimov D. A. Using the gamma spectrometry method to determine the concentration of radon in samples of mineral radon water. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 82–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-82-88>

Введение. В природе существует три природных радиоактивных ряда, которые начинаются с радионуклидов: ряд тория ($4n$) – начинается с тория-232 (^{232}Th), ряд радия ($4n + 2$) – с урана-238 (^{238}U) и ряд актиния ($4n + 3$) – с урана-235 (^{235}U). Каждый из этих рядов заканчивается образованием различных стабильных изотопов свинца [1]. Концентрация этих радиоизотопов в воде зависит от типа породы, наличия разломов, разнообразия минералов, присутствующих в породе, пористости-проницаемости; физико-химических свойств и характера геологических водоносных горизонтов [2].

Источниками радона (Rn) являются природные концентрации урана (U) и радия-226 (^{226}Ra) в почвах и горных породах [3]. Наряду с этим вода как универсальный растворитель также играет роль в процессах поступления U и ^{226}Ra в глобальный круговорот веществ. Соприкасаясь с материалом пород при фильтрации через поры и трещины, вода растворяет соли данных элементов и выводит их из недр земной коры на поверхность. Концентрации радона в воде зависят от концентрации тория, урана, радия и других материнских элементов в горных породах, омываемых ею, коэффициента эманирования, пористости или трещиноватости горных пород и скорости движения воды. Рыхлые или трещиноватые породы характеризуются повышенными концентрациями радона. Количество радона в воде превышает концентрацию радия в десятки и сотни раз [4].

Радон – радиоактивный одноатомный инертный газ, самый тяжелый из благородных газов: его плотность при 0 °C равна 9,81 кг/м³, что почти в 7,6 раз больше плотности воздуха. Растворимость радона в воде составляет 460 мл/л. Все изотопы радона радиоактивны и имеют короткие периоды полураспада: период полураспада ^{222}Rn равен 3,82 сут, ^{220}Rn (торона) – 55,6 сут, ^{219}Rn (актиона) – 3,96 сут. Ввиду очень коротких периодов полураспада изотопов радона ^{219}Rn и ^{220}Rn в воде содержится лишь 222-й изотоп радона – ^{222}Rn и дочерние продукты его распада (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Bi , ^{210}Po и др.) [5, 6].

Воды, содержащие радон, широко используют для лечебного воздействия в санаториях. Радоновые ванны можно приготовить как искусственным образом из препарата радия-226, который имеется в виде растворенных солей, так и с использованием природных минеральных радоновых вод, добываемых из пробуренных скважин. Ванны, приготавливаемые из минеральных радоновых вод, ценятся из-за их уникального минерального состава. В табл. 1 приведены концентрации радона-222 в минеральных водах некоторых мировых курортов [7].

Таблица 1. Концентрации радона-222 в минеральных водах некоторых мировых курортов
Table 1. Radon-222 concentrations in mineral waters of some world resorts

Название курорта	Концентрация радона в воде
<i>Россия</i>	
Пятигорск	500–7880 Бк/л
Белокуриха	240–375 Бк/л
«Увильды», южный Урал	1,2–17,6 кБк/л
<i>Германия</i>	
Бад-Брамбах, федеральная земля Саксония	1,3–27,9 кБк/л
Баден-Баден, федеральная земля Баден-Вюртемберг	До 70 кБк/л
Бад-Шлема, федеральная земля Саксония	до 182 кБк/л
<i>Австрия</i>	
Гаштайн – бальнеологический курорт и климат, в Тирольских Альпах	До 8 кБк/л
Бадгастайн Бад-Гаштайн, федеральная земля Зальцбург	740 Бк/л (средняя)
<i>Япония</i>	
Мисаса, уезд Тобаку префектуры Тоттори	82–3000 Бк/л
Мисаса онсэн	130 кБк/л

Окончание табл. 1

Название курорта	Концентрация радона в воде
<i>Другие страны</i>	
Хмельник, Винницкая область, Украина	3,7–7,5 кБк/л
Цхалтубо, Грузия	520 Бк/л
Яхимов, Чехия	0,7–6,3 кБк/л
Искья, Италия	До 5 кБк/л
Хевиз, Венгрия	49–393 Бк/л
Икаррия, Греция	До 8 кБк/л

Минеральные радоновые воды по концентрации в них радона подразделяют на пять групп [7]: 1 – очень слабой концентрации, 37,5–375 Бк/л; 2 – слабой концентрации, 375–1500 Бк/л; 3 – средней концентрации, 1,5–4,5 кБк/л; 4 – сильной концентрации, 4,5–7,5 кБк/л; 5 – очень сильной концентрации, 7,5 кБк/л.

В Беларуси природные минеральные радоновые воды до настоящего времени обнаружены и эксплуатируются в основном в Дятловском и Гродненском районах Гродненской области, а также в Минской области (санаторий «Сосновый бор» в г. п. Радошковичи Молодечненского района). Так, в 1989 г. пробурены и введены в эксплуатацию четыре скважины, принадлежащие санаторию «Радон» (филиал «Санаторий Радон» ОАО «Белагроздравница», Гродненская область). Минеральной радоновой водой из этих же скважин обеспечивается санаторий «Альфа Радон» (филиал «Санаторий Альфа Радон» ООО «ТОРВЛАД», Гродненская область). В санаториях «Озерный», «Поречье» (Гродненская область) и «Сосновый бор» (Минская область) пробурены и эксплуатируются по одной скважине. Добытая из этих скважин подземная минеральная вода используется для организации лечебных процедур в виде радоновых ванн, ванн для орошения, для подводного вытяжения и других процедур.

Почти все радионуклиды, обнаруженные в воде, имеют природное происхождение. Особо опасными элементами в воде, которые могут наносить вред здоровью человека, являются радий и радон. Радон является альфа-излучателем, распадающимся на цепочку потомков гамма-излучателей и альфа-излучателей, а это означает, что атомы радона в воде могут распадаться или превращаться в другие атомы. Присутствие радона-222 в воде может представлять опасность для здоровья людей и окружающей среды, поскольку радон-222 растворяется в воде, что может приводить к потреблению радона человеком и переносу в физические и биологические материалы, такие как отложения, растительность и рыба [8].

Определение концентрации радона-222 в питьевой воде сопряжено с трудностями, поскольку радон легко эмануирует из воды при работе с ней. При взбалтывании и переливании воды из одной емкости в другую происходит эманация растворенного радона. В воде, оставленной для отстаивания, радиоактивность радона снижается, а при кипячении радон полностью высвобождается из воды в атмосферу.

Цель работы – проведение исследований по выбору оптимальной измерительной емкости с достаточной степенью герметизации для измерения концентрации радона-222 методом гамма-спектрометрии.

Материалы и методы исследования. Исследования по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости проводились в лаборатории экспериментальных ядерно-физических измерений и экспертных анализов радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны (ОИЭЯИ – Сосны) на стационарном гамма-спектрометре на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора ДГДК-80Б. Концентрация радона-222 в пробах радоновой воды измерялась в соответствии с МВИ.МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» (далее – МВИ.МН 3421-2010).

Пробы воды из одного источника помещались в следующие сосуды:

пластиковые сосуды «Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л»;

стеклянная банка объемом 0,5 л с винтовой резьбой под завинчивающуюся металлическую крышку (далее – банка с крышкой под закрутку);

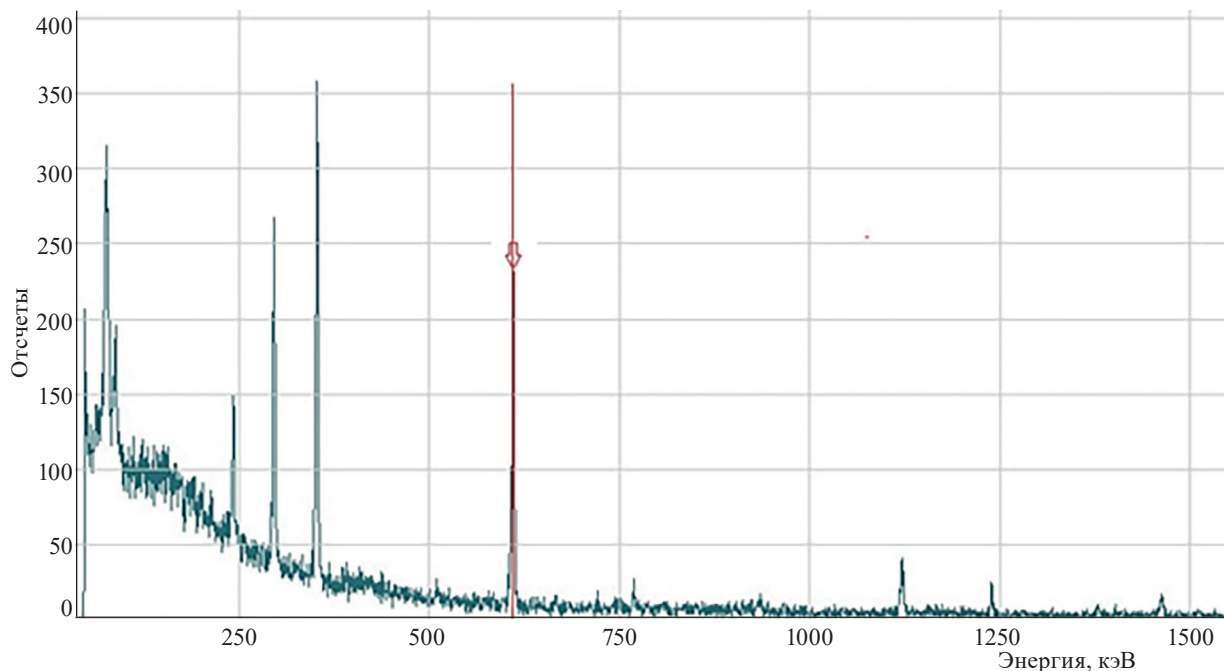


Рис. 1. Гамма-спектр пробы минеральной радоновой воды, полученный с помощью гамма-спектрометра на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора ДГДК-80Б (стрелкой показана линия 609,3 кэВ)

Fig. 1. Gamma spectrum of a sample of mineral radon water, obtained using a gamma spectrometer based on a semiconductor Ge (Li) detector DGDK-80B (the arrow shows the 609.3 keV line)

стеклянная банка объемом 0,5 л с металлической крышкой, закрывающаяся при помощи закаточной машинки (далее – банка с крышкой под закатку).

Для нахождения значения активности радона-222 использовалась МВИ.МН 3421-2010. Линия, по которой определялась активность радона-222, принадлежит Bi-214 – дочернему продукту радона-222 с энергией гамма-квантов 609,3 кэВ (квантовый выход 46,1 %). На рис. 1 представлен анализируемый спектр пробы минеральной радоновой воды.

Калибровка гамма-спектрометра по эффективности регистрации в геометриях измерений, соответствующих исследуемым емкостям, проводилась с помощью образцового радиоактивного раствора, который содержал радионуклиды Mn-54, Co-57, Co-60, Cd-109, Ce-139, Cs-137 и Am-241 с известными активностями. Данные калибровки по линии Cs-137 661,6 кэВ использовались для расчета коэффициента, используемого в формуле для определения концентрации радона в воде для каждой геометрии измерений (стеклянная банка, «Дента», «Маринелли») с учетом отношения квантовых выходов для линии 609,3 и 661,6 кэВ (46,1 и 85,1 % соответственно).

Расчет удельной активности радона-222 (Бк/кг) в пробе производился согласно МВИ.МН 3421-2010 по формуле

$$УА = (Rn^{222}) = \frac{n_{\text{пробы}} \cdot \left(\frac{A}{n}\right)_{st}}{m_{\text{пробы}}} \cdot e^{\lambda\tau}, \tag{1}$$

где $n_{\text{пробы}}$ – скорость счета в пике полного поглощения для линии с энергией 609,3 кэВ для искомой пробы, имп/с; $m_{\text{пробы}}$ – масса искомой пробы, кг; $\left(\frac{A}{n}\right)_{st}$ – коэффициент, полученный при помощи образцового радиоактивного раствора, содержавшего радионуклид Cs-137; λ – постоянная распада радона-222, равная $0,181 \text{ сут}^{-1}$; τ – время, прошедшее от отбора пробы до измерения, сут; $e^{\lambda\tau}$ – поправка на распад радона.

Результаты и их обсуждение. Пробы радоновой воды, помещенные в каждую из исследуемых емкостей, многократно измерялись через некоторые промежутки времени на протяжении 20 дней и определялась концентрации радона-222 на момент измерения. Зависимость логарифма

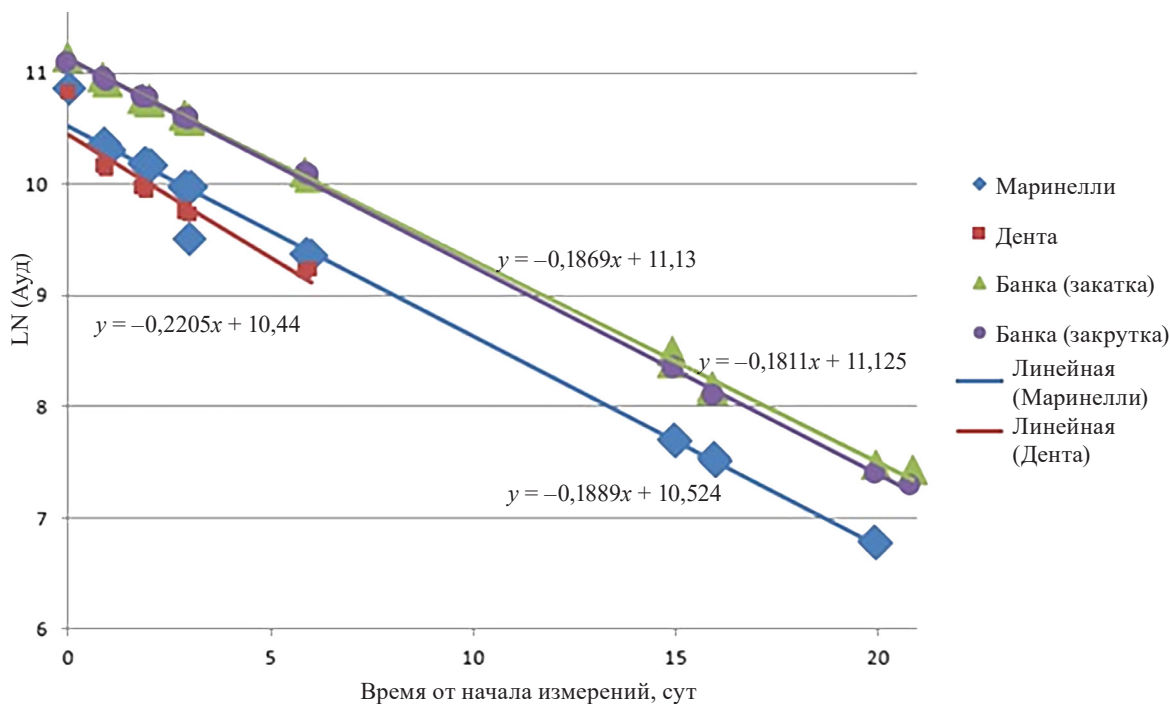


Рис. 2. Зависимость логарифма измеренной активности от времени, прошедшего с момента пробоотбора, и линейная аппроксимация этой зависимости

Fig. 2. The dependence of the logarithm of the measured activity on the time elapsed since sampling, and a linear approximation of this dependence

измеренной активности от времени, прошедшего с момента пробоотбора, а также линейная аппроксимация этой зависимости представлены на рис. 2.

Из графика видно, что линии у пластиковых сосудов («Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л») лежат ниже стеклянных. Измеренная концентрация радона в пробах воды в этих сосудах оказалась в 2–2,4 раза ниже, чем в стеклянных емкостях.

Первые измерения в геометриях «Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л» не лежат на прямых. Это показывает, что в первые сутки после помещения проб воды в пластиковые емкости активность радона резко падает (в 2 раза).

Все данные хорошо аппроксимируются прямыми линиями, тангенс угла наклона которых равен постоянной распада λ . На рис. 2 значения тангенса угла наклона прямых линий отображены в уравнениях линейной аппроксимации (первый множитель в уравнении). Установлено, что постоянная распада радона-222 равна $0,181 \text{ сут}^{-1}$. Для проб воды в стеклянных банках величина постоянной распада близка к справочной, и наилучший результат показывает проба из стеклянного измерительного сосуда в виде банки под закатку. Это позволяет сделать вывод, что утечка радона из стеклянной измерительной емкости с металлической крышкой под закатку практически отсутствует.

Емкость в виде стеклянной банки с металлической крышкой под закрутку также имеет схожие характеристики и может быть использована для отбора проб минеральной радоновой воды и последующих измерений на гамма-спектрометре.

Измерительные емкости из пластика показывают двукратное снижение активности радона в первые сутки после пробоотбора. Эти измерительные емкости можно использовать (при невозможности использовать другие или отсутствии калибровочных измерений в данных геометриях измерений) с соблюдением выдержки проб воды в них в течение суток и применением поправки в 200 % для сосуда «Маринелли, 1 л» и 240 % – для сосуда «Дента, 0,1 л».

Отбор проб минеральной радоновой воды в санатории «Радон». Способ отбора проб воды в выбранную оптимальную измерительную емкость был опробован при отборе проб минеральной радоновой воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» (Дятловский район,

Гродненская область). Пробы отобраны 25.03.2020 г. с 9 до 12 ч из скважин № 1–4, а также в питьевом фонтанчике, организованном в беседке на территории санатория.

Перед отбором проб из скважины в течение не менее 4 ч проводилась выкачка радоновой воды из ствола скважины для исключения отбора радоновой воды с пониженной в результате радиоактивного распада радона концентрацией радона-222.

Из каждого места отбора осуществлялся забор от одной до пяти проб. Пробы отбирали в стеклянные банки объемом 0,5 л с крышкой под закрутку и с крышкой под закатку, после чего банку закрывали жестяной крышкой с помощью ручной закаточной машинки. Как уже было установлено, указанный способ обеспечивает герметичность пробы и исключает утечку радона. После отбора пробы транспортировались в течение дня (около 4 ч) в ОИЭЯИ – Сосны (г. Минск) для проведения лабораторных анализов.

Результаты измерения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» в 2020 г. представлены в табл. 2 в крайнем правом столбце. Для сравнения также даны измерения, проведенные в 2012, 2015 и 2018 гг.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения концентрация радона в пробах минеральной радоновой воды санатория «Радон»

T a b l e 2. The results of measuring the concentration of radon in samples of mineral radon water of the sanatorium “Radon”

№ скважины	Глубина скважины, м	Глубина установки насоса, м	Производительность насоса, м ³ /ч	Концентрация радона-222, Бк/кг			
				2012 г.	2015 г.	2018 г.	2020 г.
1	306	85	10	590 ± 120	610 ± 120	655 ± 140	760 ± 160
2	307	85	2	1930 ± 390	2070 ± 410	1550 ± 310	2100 ± 400
3	295	85	4	1360 ± 270	1340 ± 270	1400 ± 300	1500 ± 300
4	304,6	85	10	990 ± 200	1010 ± 200	900 ± 180	1250 ± 250
Самоизлив *	–	–	–	Не измерялась	Не измерялась	150 ± 20	180 ± 40

* Питьевой фонтанчик примерно в 300 м от территории санатория.

Как видно из табл. 2, полученные результаты хорошо согласуются с данными измерений концентрации радона в пробах минеральной воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница», полученными в предыдущие годы.

Заключение. В ходе исследований по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости для отбора проб минеральной радоновой воды и ее последующего измерения на гамма-спектрометре в лабораторных условиях показано, что утечка радона из стеклянной емкости с металлической крышкой под закатку минимальна. Данный способ отбора проб и герметизации измерительной емкости позволяет повысить точность представляемых результатов измерений за счет уменьшения поправок на пробоподготовку при расчете расширенной неопределенности измерений. Выбранная измерительная емкость, способ ее герметизации и геометрия измерений могут использоваться для будущих измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных в санаториях Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. Геворкян, Р. Г. Курс физики / Р. Г. Геворкян. – М.: Высш. школа, 1979. – 656 с.
2. Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards / S. Suresh [et al.] // Journal of Radiation Research and Applied Sciences – 2020. – Vol. 13, № 1. – P. 12–26. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1693175>
3. Bonotto, D. M. Radon in groundwaters from Guarany aquifer, South America: environmental and exploration implications / D. M. Bonotto, L. Caprioglio // Appl. Radiat. Isot. – 2002. – Vol. 57, № 6. – P. 931–940. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00230-0)
4. Бекман, И. Н. Радиохимия: учеб. пособие: в 7 т. / И. Н. Бекман. – М.: изд. Мархотин П. Ю., 2015. – Т. 6: Экологическая радиохимия и радиоэкология. – 400 с.

5. Матвеев, А. В. Радонопродуцирующий потенциал пород платформенного чехла территории Беларуси / А. В. Матвеев, М. И. Автушко // *Літасфера*. – 2015. – № 2 (43). – С. 143–149.
6. Радон в природных и техногенных комплексах Беларуси / А. В. Матвеев [и др.] // *Літасфера*. – 1996. – № 5. – С. 151–161.
7. Исследование содержания радона в подземной минеральной воде санаториев Беларуси / М. К. Киевец [и др.] // VI Международная конференция «Ядерные технологии XXI век»: доклады, Минск, 25–27 окт. 2016 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед.; редкол.: А. В. Кузьмин [и др.]. – Минск, 2016. – С. 238–245.
8. Hamzah, Z. Determination of Radon Activity Concentration in Water Using Gamma Spectrometry and Liquid Scintillation Counter Techniques / Z. Hamzah, A. Saat, M. Kassim // 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment, 1–3 June 2011, Melaka, Malaysia. – 2011. – P. 191–193. <https://doi.org/10.1109/ISESEE.2011.5977087>

References

1. Gevorkyan R. G. *Physics Course*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 656 p. (in Russian).
2. Suresh S., Rangaswamy D. R., Srinivasa E., Sannappa J. Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 12–26. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1693175>
3. Bonotto D. M., Caprioglio L. Radon in groundwaters from Guarany aquifer, South America: environmental and exploration implications. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, vol. 57, no. 6, pp. 931–940. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00230-0) 2002
4. Beckman I. N. *Radiochemistry. Vol. 6: Ecological Radiochemistry and Radioecology*. Moscow, ed. Markhotin P. Yu., 2015. 400 p. (in Russian).
5. Matveev A. V., Avtushko M. I. Radon-producing potential of the rocks of the platform cover on the territory of Belarus. *Litasfera = Lithosphere*, 2015, no. 2 (43), pp. 143–149 (in Russian).
6. Matveev A. V., Kudel'skii A. V., Aizberg R. E., Naidenkov Yu., Karabanov A. K., Kalora M. Kh., Starodubova A. P. Radon in natural and technogenic complexes Belarus. *Litasfera = Lithosphere*, 1996, no. 5, pp. 151–161 (in Russian).
7. Kieverts M. K. [et al.]. Study of radon content in underground mineral water of sanatoriums of Belarus. *VI Mezhdu-narodnaya konferentsiya «Yadernye tekhnologii XXI vek»: doklady, Minsk, 25–27 oktyabrya 2016 g.* [4th International Conference “Nuclear Technologies 21st Century”: Reports, Minsk, 25–27 October. 2016]. Minsk, 2016, pp. 238–245 (in Russian).
8. Hamzah Z., Saat A., Kassim M. Determination of Radon Activity Concentration in Water Using Gamma Spectrometry and Liquid Scintillation Counter Techniques. *3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment, 1–3 June 2011, Melaka, Malaysia*. 2011, pp. 191–193. <https://doi.org/10.1109/ISESEE.2011.5977087>

Информация об авторах

Жук Игорь Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь)

Гусак Кристина Валерьевна – заведующий сектором экспертной идентификации ИИИ лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь) E-mail: k.husak@sosny.bas-net.by

Хакимов Дилшод Абдухалимович – аспирант, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь); младший научный сотрудник, Самаркандский государственный университет (Университетский бульвар, 15, 140104, Самарканд, Узбекистан). E-mail: hakimov.d@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Igor V. Zhuk – Ph. D (Engineering), Head of the Laboratory of Experimental Nuclear Physics Research and Expert Analysis of Radioactive Materials, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus).

Krystina V. Husak – Head of the Expert Identification Sector of the Institute for Radiochemical Research of Natural Environments and Expertise of Radioactive Materials, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k.husak@sosny.bas-net.by

Dilshod A. Hakimov – Ph. D. Student, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus); Junior Researcher, Samarkand State University (15, University boulevard, 140104, Samarkand, Uzbekistan). E-mail: hakimov.d@sosny.bas-net.by