

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОБООТБОРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МЕТОДОМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА-222 В ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ

**В.С. Семенищев, А.В. Воронина, С.М. Титова, Л.А. Томашова**

E-mail: vovius82@mail.ru

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия*

**АННОТАЦИЯ:** Статья посвящена исследованию влияния различных факторов на результат гамма-спектрометрического определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде при пробоотборе. Определено влияние наличия воздуха в пробоотборной емкости, рН воды и температурного режима хранения пробы. Показано, что попадание воздуха в пробоотборную емкость существенно снижает (в два и более раза) результаты анализа. Наблюдаемая зависимость снижения результата относительно контрольной пробы от соотношения объема воздуха к объему воды в емкости близка к логарифмической. Так, при объеме воздуха 40 мл в двухлитровой емкости результат определения радона был примерно на 10 % ниже, чем в контрольной пробе. В то же время закисление пробы азотной кислотой до рН 1,2–2,5 и однократный цикл замораживания/размораживания пробы не приводят к статистически достоверному отличию результата от контрольной пробы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радон, радиохимический анализ, подземная вода, условия пробоотбора, питьевая вода.

Снабжение населения чистой питьевой водой остается одной из важнейших задач, особенно в промышленно развитых и густонаселенных районах. Помимо воды централизованных источников водоснабжения, население использует для питьевых целей подземную воду из скважин и родников. В числе прочих природных компонентов такая вода может содержать природные и, значительно реже, искусственные радионуклиды. Среди природных радионуклидов наиболее высокие удельные активности характерны для  $^{222}\text{Rn}$ , радиоактивного инертного газа, являющегося продуктом распада ряда  $^{238}\text{U}$ . Основная опасность  $^{222}\text{Rn}$  и дочерних продуктов его распада связана с облучением легких, что приводит к повышенному риску заболевания раком легких [1].

© Семенищев В.С., Воронина А.В., Титова С.М., Томашова Л.А., 2020

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Свердловской области в рамках научного проекта № 20-43-660055

Так, по данным [2], в России ингаляционное поступление радона влияет на смертность от рака легкого (7–14 %) и на общую смертность (0,2–0,7 %).

Согласно подходу, изложенному в отчете UNSCEAR 2000 [3], соотношение между концентрацией радона в питьевой воде и концентрацией в воздухе обычно оценивается в 10 000 к 1. Исходя из этого, концентрация радона в водопроводной воде 100 Бк/л приводит к его концентрации в воздухе 10 Бк/м<sup>3</sup>, что составляет 5 % от установленного допустимого уровня для радона в воздухе в жилых помещениях (200 Бк/м<sup>3</sup>) [4]. Таким образом, ориентировочное значение 100 Бк/л будет гарантировать, что радон в питьевой воде не вносит значительный вклад в содержание радона внутри помещений. Данная величина принята в качестве предельно допустимого содержания радона в большинстве стран. Тем не менее, принятые в ряде стран нормативы существенно отличаются от этой величины как в меньшую, так и в большую сторону (табл. 1).

**Таблица 1.** Примеры нормативов на содержание <sup>222</sup>Rn в питьевой воде в различных странах

Table 1. Examples of the different countries' norms of the <sup>222</sup>Rn content in drinking water

Страна	Предельное допустимое содержание <sup>222</sup> Rn в питьевой воде, Бк/л	Нормативный документ
США (maximum contaminant level)	11,1	US-EPA [5]
Россия	60	НРБ-99/2010 [4]
Украина	100	НРБУ-97/Д 2000 [6]
Страны ЕС (кроме Ирландии, Португалии, Испании, Финляндии)	100	Council Directive 2013/51/EURATOM [7]
Рекомендация Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)	100	WHO Guidelines for Safe Drinking-Water Quality; Fourth Edition 2011 [8]
Австралия	100	Australian Drinking Water Guidelines 6 [9]
США (alternative higher maximum contaminant level)	148	US-EPA [4]
Ирландия, Португалия, Испания	500	[10]
Финляндия	1000	[10]
Босния и Герцеговина, Ямайка	не нормируется	[11, 12]

Для анализа содержания радона в питьевых водах в настоящее время применяется несколько методов, основанных на прямой гамма-спектрометрии, эманометрии и жидкосцинтилляционной спектрометрии (ЖСС). В табл. 2 приведена краткая сравнительная характеристика данных методов.

**Таблица 2.** Сравнительная характеристика методов анализа  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде [10]Table 2. Comparative characteristics of methods for the  $^{222}\text{Rn}$  analysis in drinking water [10]

Метод	Минимальная определяемая активность, Бк/л	Объем пробы, л	Общее время анализа, ч	Пробоподготовка
Жидкосцинтилляционная спектрометрия	0,05–1	0,01–2	3–8	Различная в зависимости от типа сцинтиллятора
Ионизационные камеры	0,3	0,02–0,2	< 1	Проводится дегазация
Ячейка Лукаса	0,3–1	0,05–1	1–3	Проводится дегазация
Гамма-спектрометрия	5–10	0,1–2	4–13	Не требуется

Из рассмотренных методов гамма-спектрометрия является наименее чувствительным. Тем не менее, чувствительности гамма-спектрометрического измерения (5–10 Бк/л) вполне достаточно для проведения анализа содержания радона в питьевой воде с целью определения ее пригодности к употреблению, т. к. существующие во всех странах нормативы лежат выше минимальной определяемой активности. Благодаря простоте, относительной дешевизне и отсутствию необходимости в манипуляциях с пробой воды этот метод является весьма распространенным в мировой практике.

В данной работе проведен экспериментальный анализ воздействия условий пробоотбора на результаты определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде методом гамма-спектрометрии с целью определения наиболее значимых факторов (наличие воздуха в пробе, pH и температура хранения пробы), оказывающих влияние на результат анализа.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментов использована природная подземная вода с повышенным содержанием радона (~ 75–85 Бк/л) из родника Памяти (западная часть г. Екатеринбурга Свердловской обл., Россия 56°50'19"N, 60°25'25"E, рис. 1). Концентрации основных элементов представлены в табл. 3, pH воды варьировался в пределах от 7,3 до 7,4. Пробы воды перед измерением выдерживали в герметичных полипропиленовых бутылках емкостью 1,5–5 л в течение минимум 3–5 ч (как правило, 12–20 ч) для установления радиоактивного равновесия радона с короткоживущими дочерними радионуклидами ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ ). Активность радона в пробах измеряли на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ» по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа  $^{214}\text{Bi}$

( $E = 609 \text{ кэВ}$ ) в стандартной геометрии Маринелли (1 л). Поскольку для различных проб время выдержки было разным (пробы, отобранные в один день, измеряли на следующий день по очереди, а время измерения одной пробы составляло 3000 с), активности радона пересчитывали на момент отбора по формуле (1):

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $A_0$  – удельные активности  $^{222}\text{Rn}$  в пробе (Бк/л) на момент измерения и на момент отбора, соответственно;

$t$  – время между отбором и измерением, ч;

$\lambda$  – постоянная распада  $^{222}\text{Rn}$ ,  $0,01089 \text{ ч}^{-1}$ .

Значение рН проб воды измеряли на рН-метре Satorius PB-11 (Германия) с комбинированным электродом. Диапазон измерения рН-метра от -1 до 15, погрешность измерения  $\pm 0,01$  единицы рН. Химический состав воды определяли на масс-спектрометре NexION 350 (Perkin Elmer, США).



Рис. 1. Местоположение и внешний вид родника Памяти.  
Fig. 1. Location and exterior sight of the Spring of Memory.

**Таблица 3.** Основной химический состав воды из родника Памяти (г. Екатеринбург), дата отбора 02.02.2020 г.

Table 3. The main chemical composition of water from the spring of Memory (Ekaterinburg), the date of sampling: February 02. 2020

Элемент	Li	Na	K	Rb
Концентрация, мг/л	0,013	2,67	3,36	0,0033
Элемент	Mg	Ca	Sr	Ba
Концентрация, мг/л	16,1	14,6	0,096	0,049
Элемент	Al	Si	Fe	Mn
Концентрация, мг/л	0,0001	9,14	0,885	0,072
Элемент	S (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Cl	Br	Общая минерализация
Концентрация, мг/л	23,7 (71,0)	4,87	0,015	123

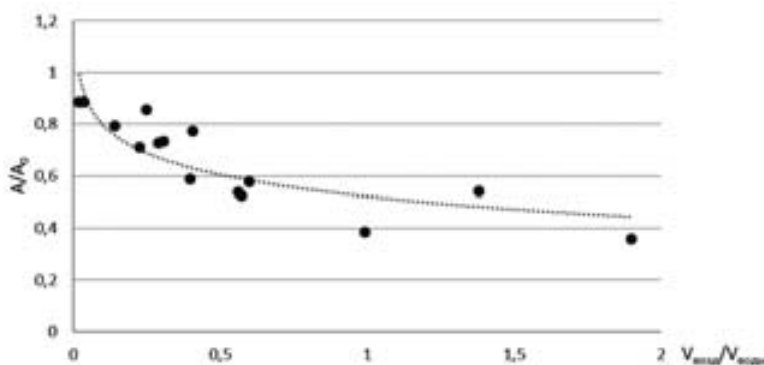
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Радон обладает относительно низкой растворимостью в воде, порядка 0,01 моль/кг\*бар при 293 К [13]. Коэффициент распределения <sup>222</sup>Rn между воздухом и водой при 293 К составляет приблизительно 0,23–0,25 [14]. Таким образом, при контакте радонсодержащей воды с воздухом можно ожидать достаточно интенсивного перехода радона в газовую фазу. С другой стороны, определение радона гамма-спектрометрическим методом осуществляется по его дочерним изотопам <sup>214</sup>Pb и <sup>214</sup>Bi, которые в случае достаточной герметичности контейнера будут оставаться в нем и могут переходить обратно в водную фазу. Для разрешения данной неопределенности была получена зависимость результата анализа от отношения объема воздуха к объему воды в пробоотборной емкости ( $V_{\text{возд}}/V_{\text{воды}}$ ).

В данном эксперименте воду из родника набирали в 2 и 5-литровые емкости, оставляя в них некоторое количество воздуха. Для сравнения одну из емкостей при этом наполняли водой полностью. Эксперимент проводили в несколько этапов в течение февраля-марта 2020 г., при этом, как было показано ранее [15], удельная активность <sup>222</sup>Rn в данном роднике несколько варьируется в течение года. Поэтому в качестве показателя использовали отношение удельной активности радона в конкретной емкости (A) к активности контрольной пробы без воздуха (A<sub>0</sub>), отобранной в тот же день. Отобранные пробы находились в одинаковых емкостях при одинаковых условиях хранения, что минимизировало влияние сорбции радона и его дочерних продуктов распада из жидкой фазы на результаты. Полученные данные представлены на рис. 2.

Показано, что попадание воздуха в емкость с пробой оказывает существенное негативное влияние на результат. Так, уже при объеме воздуха

40 и 70 мл в 2-литровой емкости определение радона был примерно на 10 % ниже, чем в контрольной пробе. При отношении объема воздуха к объему воды от 0,5 активность радона снижалась в два и более раза. В целом полученная зависимость носит близкий к логарифмическому характер. Наблюдаемые закономерности можно объяснить переходом радона в воздушную фазу, что приводит либо к нахождению его дочерних продуктов распада в газовом состоянии, либо к их адсорбции на стенках сосуда, соприкасающихся с газовой фазой.



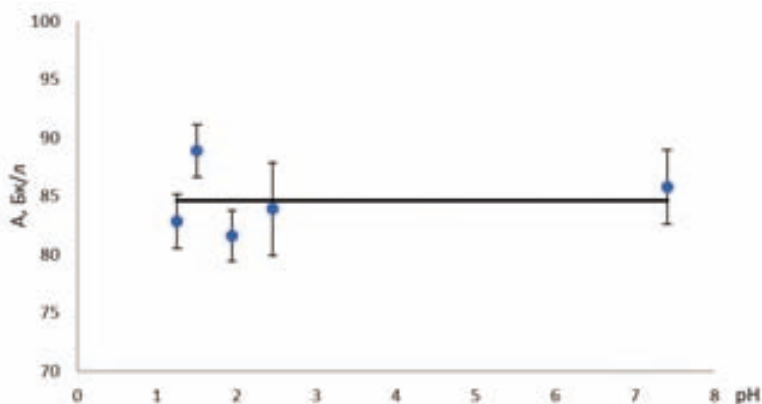
**Рис. 2.** Влияние отношения объема воздуха к объему воды в пробоотборной емкости ( $V_{\text{возд}}/V_{\text{воды}}$ ) на результат определения  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде ( $A_0/A$ ).

**Fig. 2.** The impact of the air volume to water volume relation in a sampler ( $V_{\text{возд}}/V_{\text{воды}}$ ) on the result of the  $^{222}\text{Rn}$  determination in drinking water ( $A_0/A$ ).

Как правило, массовая концентрация радионуклидов в природных водах довольно низка, при этом они могут находиться в воде в различных формах, таких как ионная, коллоидная и псевдорadioколлоидная. Радионуклиды в составе коллоидных частиц адсорбируются на стенках сосуда, что может привести к искажению результата анализа. Для предотвращения этого эффекта в большинстве методик анализа радионуклидов в природных водах в качестве меры консервации пробы при отборе предписывается закисление до pH 1–2. Для радона, как для инертного газа, коллоидное состояние не характерно, однако гамма-спектрометрическое измерение проводится по его дочерним радионуклидам  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , склонным образовывать коллоидные формы.

По данным масс-спектрометрического анализа концентрации стабильных свинца и висмута в воде из родника Памяти, имели низкое значение и составляли 0,017 мкг/л ( $8,4 \cdot 10^{-11}$  моль/л) и 0,32 мкг/л ( $1,5 \cdot 10^{-9}$  моль/л) соответственно. В работе исследовано влияние закисления пробы воды на результат определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$ . В эксперименте пробы воды

закисляли до pH от 1 до 2,5 непосредственно на месте отбора добавлением заранее рассчитанного количества концентрированной азотной кислоты. После отбора и закисления пробы герметично закрывали, выдерживали в течение нескольких часов и измеряли на гамма-спектрометре. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Влияние pH пробы на результат определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде.

Fig. 3. Impact of the pH sample on the result of the  $^{222}\text{Rn}$  specific activity determination in drinking water.

В рамках проведенного исследования установлено, что определенное значение удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде в пределах погрешности не зависело от pH. Таким образом, при анализе  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде закисление пробы не требуется.

**Таблица 4.** Влияние однократного цикла замораживания–размораживания пробы на результат определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде  
Table 4. Influence of the sample single frosting/defrosting cycle on the result of  $^{222}\text{Rn}$  specific activity determination in drinking water

Температурные условия	Дата отбора пробы	Результат измерения удельной активности $^{222}\text{Rn}$ , Бк/л
Параллель 1		
Без заморозки	03.02.2020	73,6 ± 1,9
С заморозкой		77,2 ± 2,3
Параллель 2		
Без заморозки	25.02.2020	76,9 ± 2,0
С заморозкой		80,1 ± 1,8

Исследовано также влияние замораживания пробы на результат определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде. В данном эксперименте пробы воды отбирали одновременно с контрольной пробой, замораживали при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего размораживали при комнатной температуре и измеряли на гамма-спектрометре. Полученные результаты приведены в табл. 4. Экспериментальные данные показали, что результаты определения удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде были несколько выше, чем в случае проб воды без замораживания, однако данные различия не являются статистически достоверными. Расхождение результатов между параллелями можно объяснить сезонными вариациями содержания радона в роднике. Таким образом, случайное замораживание пробы при транспортировке или хранении в случае отбора проб в зимний период не приводит к искажению результата измерения.

### ВЫВОДЫ

В рамках представленной работы исследовано влияние содержания воздуха в пробоотборной емкости, pH воды и температурного режима хранения пробы на результаты анализа радона в пробах подземных вод. Установлено, что попадание воздуха в пробоотборную емкость существенно снижает (в два и более раза) результат анализа, при этом вид полученной зависимости аналитического сигнала от соотношения объемов воздуха и воды в емкости близок к логарифмическому. Закисление пробы азотной кислотой до pH от 1,2 до 2,5 и однократный цикл замораживания/размораживания не приводят к статистически достоверному отличию результата от контрольной пробы.

Таким образом, при отборе проб природных вод для анализа радона необходимо уделять наибольшее внимание отсутствию пузырьков воздуха в пробоотборной емкости. При этом температурные условия хранения пробы и кислотность воды не имеют существенного значения с точки зрения получаемых результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновский Г.П., Яρμοшенко И.В., Жуковский М.В. Радон, курение и вирус папилломы человека как факторы риска рака легкого в эпидемиологическом исследовании экологического типа // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10. № 2. С. 106–114.
2. Яρμοшенко И.В. Радон как фактор облучения населения России // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 2 (18). С. 108–116.
3. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources Режим доступа: [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf) (дата обращения 02.03.2020).
4. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». М.: Энергоатомиздат, 2010. 222 с.



5. United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1991) Radon Measurement Proficiency (RMP) Program Handbook. EPA 520/1-91-006. Washington (DC): Office of Radiation Programs.
6. ДНАОП -97. НРБУ-97/Д 2000 (ДНАОП 0.03-3.24-97 (ДГН 6.6.1-6.5.061-98)) Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Режим доступа: [https://dnaop.com/html/43243/doc-%D0%94%D0%9D%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_-97/](https://dnaop.com/html/43243/doc-%D0%94%D0%9D%D0%90%D0%9E%D0%9F_-97/) (дата обращения 02.03.2020).
7. European Commission. Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 (2013) Laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0051&rid=7> (дата обращения 02.03.2020).
8. World Health Organization. Guidelines for Safe Drinking-Water Quality; Fourth Edition 2011. Режим доступа: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf) (дата обращения 02.03.2020).
9. Australian Drinking Water Guidelines 6 (2011) – Version 3.5 Updated August 2018. Режим доступа: <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines> (дата обращения 02.03.2020).
10. *Jobbagy V., Altitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M.* A brief overview on radon measurements in drinking water // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 173. P. 18–24.
11. *Kasić A., Kasumović A., Adrović F., Hodžić M.* Radon measurements in well and spring water of the Tuzla area, Bosnia and Herzegovina // *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2016. Vol. 67(4). P. 332–339.
12. *Smith L., Voutchkov M.* Assessment of Radon Levels in Drinking Water Wells in St. Catherine, Jamaica // *Journal of Health and Pollution*. 2017. Vol. 7(16). P. 31–37.
13. *Lerman A.* Geochemical Processes. New York: Wiley-Interscience, 1979. 481 p.
14. *Schubert M., Kopitz J., Chalupnik S.* Sample volume optimization for radon-in-water detection by liquid scintillation counting // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 134. P. 109–113.
15. *Семеничев В.С., Воронина А.В., Никифоров А.Ф.* Определение радона-222 в природных источниках питьевой воды в окрестностях города Екатеринбурга // *Водное хозяйство России*. 2014. № 4. С. 95–101.

*Для цитирования:* Семеничев В.С., Воронина А.В., Титова С.М., Томашова Л.А., Влияние условий пробоотбора на результаты анализа удельной активности радона-222 в питьевой воде методом гамма-спектрометрии // *Водное хозяйство России*. 2020. № 3. С. 128–138.

#### **Сведения об авторах:**

**Семеничев Владимир Сергеевич**, канд. хим. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: [vovius82@mail.ru](mailto:vovius82@mail.ru)

**Воронина Анна Владимировна**, канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский фе-

деральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: av.voronina@mail.ru

**Титова Светлана Михайловна**, ассистент, кафедра редких металлов и наноматериалов, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: avotitms@mail.ru

**Томашова Любовь Алексеевна**, аспирант, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: tomashoval@yandex.ru

EFFECT OF SAMPLING CONDITIONS ON THE RESULTS  
OF THE RADON-222 SPECIFIC ACTIVITY ANALYSIS IN DRINKING  
WATER WITH GAMMA/SPECTROMETRY

**Vladimir S. Semenishchev, Anna V. Voronina, Svetlana M. Titova,  
Lyubov A. Tomashova**

E-mail: vovius82@mail.ru

*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract:** The article deals with researches of the different factors' impact upon the result of gamma/spectrometric determination of <sup>222</sup>Rn specific activity in drinking water during sampling. We determined the impact of the air presence in a sampler, pH of water and temperature regime of the sample storage. We have shown that occasional ingress of air in a sampler considerably (two and more times) decreases the analysis results. The observed dependence of the result decrease (in comparison with the reference sample) on the air volume to water volume relation in the sample is close to the logarithmic dependence. Thus, the 40 ml volume of air in a two-liter sampler gave approximately 10 % lower result of the radon determination in comparison with that in the reference sample. At the same time, the sample acidulation with nitric acid to pH = 1,2–2,5 and a sample single frosting/defrosting cycle did not result in statistically reliable distinction of the result from that of the reference sample.

**Key words:** radon, radiochemical analysis, groundwater, sampling conditions, drinking water.

**About the authors:**

Vladimir S. Semenishchev, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; vovius82@mail.ru

Anna V. Voronina, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: av.voronina@mail.ru

Svetlana M. Titova, Assistant Lecturer, Ural Federal University Chair of Rare Metals and Nano/materials, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: avotitms@mail.ru

Lyubov A. Tomashova, Post-graduate Student, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: tomashoval@yandex.ru

**For citation:** Semenishchev V.S., Voronina A.V., Titova S.M., Tomashova L.A., *Effect of sampling conditions on the results of the Radon-222 specific activity analysis in drinking water with Gamma/spectrometry // Water Sector of Russia. 2020. No. 3. P. 128–138.*

## REFERENCES

1. *Malinovskiy G.P., Yarmoshenko I.V., Zhukovskiy M.V.* Radon, kureniye i risk papillomy cheloveka kak factory riska raka legkogo v epidemiologicheskom issledovaniiy ekologicheskogo tipa [Radon, smoking and human papilloma virus as the carcinoma of lung risk factors in a epidemiological study of the ecological type] // Radiatsionnaya gigiena. 2017. T. 10. No. 2. P. 106–114.
2. *Yarmoshenko I.V.* Radon kak factor oblucheniya naseleniya Rossiya [Radon as a factor of the Russian population exposure to radiation] // Biosfernaya sovместimost: chelovek, region, tekhnologiya. 2017. No. 2 (18). P. 108–116.
3. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources Rezhim dostupa: [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf) (data obrashcheniya 02.03.2020).
4. SanPiN 2.6.1.2523-09 “Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009)”. [“Radiation safety norms” (NRB-99/2009)]. M.: Energoatomizdat, 2010. 222 p.
5. United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1991) Radon Measurement Proficiency (RMP) Program Handbook. EPA 520/1-91-006. Washington (DC): Office of Radiation Programs.
6. DNAOP -97. NRB-97/D 2000 (DNAOP 0.03-3.24-97 (DGN 6.6.1-6.5.061-98)) Normi radiatsionnoy bezpeki Ukraini [Norms of radiation safety in Ukraine] (NRB-97). Rezhim dostupa: [https://dnaop.com/html/43243/doc-%D0%94%D0%9D%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_-97/](https://dnaop.com/html/43243/doc-%D0%94%D0%9D%D0%90%D0%9E%D0%9F_-97/) ((data obrashcheniya 02.03.2020).
7. European Commission. Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 (2013) Laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. Rezhim dostupa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0051&rid=7> ((data obrashcheniya 02.03.2020).
8. World Health Organization. Guidelines for Safe Drinking-Water Quality; Fourth Edition 2011. Rezhim dostupa: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf) (data obrashcheniya 02.03.2020).
9. Australian Drinking Water Guidelines 6 (2011) – Version 3.5 Updated August 2018. Rezhim dostupa: <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines> ((data obrashcheniya 02.03.2020).
10. *Jobbagy V., Altzitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M.* A brief overview on radon measurements in drinking water // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 173. P. 18–24.
11. *Kasić A., Kasumović A., Adrović F., Hodžić M.* Radon measurements in well and spring water of the Tuzla area, Bosnia and Herzegovina // Archives of Industrial Hygiene and Toxicology. 2016. Vol. 67(4). P. 332–339.
12. *Smith L., Voutchkov M.* Assessment of Radon Levels in Drinking Water Wells in St. Catherine, Jamaica // Journal of Health and Pollution. 2017. Vol. 7(16). P. 31–37.
13. *Lerman A.* Geochemical Processes. New York: Wiley-Interscience, 1979. 481 p.
14. *Schubert M., Kopitz J., Chalupnik S.* Sample volume optimization for radon-in-water detection by liquid scintillation counting // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 134. P. 109–113.
15. *Semenishchev V.S., Voronina A.V., Nikiforov A.F.* Opredeleniye radona-222 v prirodnykh istochnikakh pitevoy vody v okrestnostyakh gorods Ekaterinburga [The radon-222 determination in drinking water natural sources in outskirts of the city of Ekaterinburg] // Water Sector of Russia. 2014. No. 4. P. 95–101.