Анализ содержания радона и радия в родниках города Екатеринбурга и его окрестностей

В.С. Семенищев , А.В. Воронина, Л.А. Томашова, Ю.И. Насонова

vovius82@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Несмотря на развитие централизованных систем водоснабжения, родники остаются важным источником питьевой воды. В работе представлены результаты исследования качества воды в родниках г. Екатеринбурга и его окрестностей по радиационному фактору. Определена удельная активность радия-226 в воде 20 родников. **Методы.** Определение удельных активностей радона-222 осуществляли методом гамма-спектрометрии по линии равновесного висмута-214. Для определения радия-226 отбирали 5-литровые пробы воды, концентрировали радий на сорбенте Т-5, после чего выделяли радий на тонкослойном сорбенте MnO_2 -ПЭ и измеряли на альфа-спектрометре. **Результаты.** В большинстве случаев удельная активность радия-226 была ниже предела обнаружения (0,2–0,3 Бк/л), при этом максимальная обнаруженная активность составляла $1,03 \pm 0,27$ мБк/л, что соответствует дозе внутреннего облучения за счет ежедневного употребления такой воды $0,21 \pm 0,05$ мкЗв/год. Обнаружено отсутствие корреляции между удельной активностью радия-226 и содержанием радона-222, урана-238 и щелочноземельных элементов. В период 09.2020–06.2021гг. проведен мониторинг содержания радона-222 в семи родниках, в которых ранее было зафиксировано превышение уровня вмешательства по удельной активности радона. Установлены существенные сезонные колебания активности радона: в некоторых родниках максимальное значение в три раза превышало минимальное. В большинстве случаев наблюдалось повышение активности радона в родниковой воде в зимний период, что можно объяснить как повышением растворимости радона при понижении температуры воды, так и снижением дебета родников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радон-222, радий-226, родник, качество воды, питьевая вода, г. Екатеринбург.

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

© Семенищев В.С., Воронина А.В., Томашова Л.А., Насонова Ю.И., 2021

Для цитирования: Семенищев В.С., Воронина А.В., Томашова Л.А., Насонова Ю.И., Анализ содержания радона и радия в родниках города Екатеринбурга и его окрестностей // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 5. С. 84–96. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-6.

Дата поступления 07.07.2021.

ANALYSIS OF RADON AND RADIUM CONTENT IN SPRINGS OF EKATERINBURG CITY AND ITS SETTLEMENTS

Vladimir S. Semenishchev , Anna V. Voronina,
Lyubov A. Tomashova, Yulia I. Nasonova

vovius82@mail.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Significance. Despite development of central water supply systems, springs still remain to be important sources of drinking water. In this work, the study of water quality in springs of Yekaterinburg city and its settlements was performed with the attention to radiological factor. Activity concentrations of radium-226 were determined in water of 20 springs. **Methods.** Determination of the radon-222 activities of was performed using gamma-spectrometry via the equilibrium bismuth-214 gamma line. To determine radium-226, 5-liter water samples were taken, the radium was preconcentrated on a T-5 sorbent; then radium was separated on a thin-layer MnO_2 -PE sorbent followed by measurement on an alpha spectrometer. **Results.** In the vast majority of cases, activity concentrations of radium-226 were lower than the detection limit (0.3 Bq/L); the maximal activity concentration of 1.03 ± 0.27 was found that corresponded to the internal dose of $0.21 \pm 0.05 \mu\text{Sv/y}$ due to daily consumption of this water. No correlations were found between content of radium-226 and concentrations of radon-222, uranium-238 and alkaline earth ions. At the period of 09.2020 – 06.2021, monitoring of radon activity was performed in seven springs with previously found high radon content. Significant seasonal variations of radon activity were found; for some springs the difference between the minimal and the maximal activity reached 3. In the most cases, increase of radon activity occurred in water during winter that can be explained by both an increase of radon solubility in cold water and a decrease of flowrate.

Keywords: radon-222, radium-226, springs, water quality, drinking water, Ekaterinburg city.

Financing: The study has been done with financial support of RFFR (Russian Fund for Fundamental Researches) and the Sverdlovsk Oblast Government within the framework of scientific project No. 20-43-660055.

For citation: Vladimir S. Semenishchev, Anna V. Voronina, Lyubov A. Tomashova, Yulia I. Nasonova. Analysis of radon and radium content in springs of Ekaterinburg city and its settlements // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 5. С. 84–96. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-6.

ВВЕДЕНИЕ

Подземная вода – скважины и родники – один из источников питьевого водоснабжения не только в малых населенных пунктах, но и в крупных городах. Однако такие нецентрализованные источники питьевой воды должны подлежать контролю, поскольку вода может содержать различные токсичные и радиоактивные вещества [1–4]. Согласно Директиве Евросоюза 2013/51/EURATOM¹, при оценке радиологического риска от употребления природных подземных вод следует уделять внимание таким природным радионуклидам, как Rn-222, Ra-226, Ra-228 и Pb-210, поскольку данные изотопы вносят наибольший вклад в дозу внутреннего облучения. Опасность радона связана преимущественно с облучением легочной ткани и повышенным риском возникновения рака легких [5]. Основная часть радона, присутствующего в воздухе, поступает за счет диффузии из почвы. Тем не менее, использование в домашних условиях воды, содержащей повышенные уровни радона, также может стать существенным источником этого радионуклида в воздухе помещений [6]. Как правило, радоновый риск, вызванный употреблением питьевой воды, намного ниже риска от ингаляции радона поэтому с учетом возможного ежедневного потребления воды среднестатистическим человеком установлены достаточно высокие нормативы на содержание Rn-222. В России эта величина составляет 60 Бк/л², в других странах она варьирует от 11 до 1000 Бк/л, при этом ВОЗ рекомендует значение 100 Бк/л [7]. Изотопы радия, как правило, встречаются в природных водах в существенно меньшей концентрации, чем радон [8], и проявляют себя в организме как типичные остеотропные радионуклиды [9].

В работе [10] представлен анализ содержания природных радионуклидов (²²²Rn, ²³⁸U и ²³²Th), и химических поллютантов (Be, B, Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Ba, Hg и Pb) в воде родников Свердловской области, использующейся населением в качестве нецентрализованных источников питьевого водоснабжения. При этом было обнаружено семь родников с превышением уровня вмешательства по радону-222 (60 Бк/л). Цель данного исследования – анализ содержания радия-226 в родниках Свердловской области, а также мониторинг сезонных колебаний удельной активности радона в ранее выявленных семи родниках с его повышенным содержанием.

¹ 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 07.07.2021).

² СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». М.: Энергоатомиздат, 2010. 222 с.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен мониторинг сезонных колебаний удельной активности радона-222 в семи родниках Екатеринбурга и его окрестностей. Пробы воды из родников отбирали с сентября 2020 г. по июнь 2021 г. с периодичностью раз в месяц в герметичные пластиковые бутылки емкостью 1,5–2 л. Перед измерением выдерживали в течение минимум 3–5 ч (как правило, 12–20 ч) для установления радиоактивного равновесия радона с короткоживущими дочерними радионуклидами (^{218}Po , ^{218}At , ^{214}Pb и ^{214}Bi). Активность радона в пробах измеряли на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре «Атом-тех МКС-1315 АТ» по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа ^{214}Bi ($E = 609$ кэВ) в стандартной геометрии Маринелли (1 л). Активности радона пересчитывали на момент отбора по формуле:

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

где A и A_0 – удельные активности ^{222}Rn в пробе (Бк/л) на момент измерения и на момент отбора, соответственно; t – время между отбором и измерением, ч; λ – постоянная распада ^{222}Rn , $0,01089$ ч $^{-1}$.

Определение ^{226}Ra в воде источников проводили по следующей схеме. Пробу воды объемом 5 л отбирали в пластиковую бутылку и пропускали через колонку объемом 4 мл, содержащую 2 г сорбента Т-5, представляющего гидратированный диоксид титана, производства компании «Термоксид», при расходе воды 0,3 л/ч для предварительного концентрирования радия. После этого радий вымывали из колонки 20 мл 1М раствора HCl. Раствор упаривали почти досуха, разбавляли дистиллированной водой и доводили pH до 6–7. Радий из полученного концентрата сорбировали на сорбенте MnO_2 -ПЭ (тонкослойный диоксид марганца, нанесенный на полиэтилен [11]), получая тонкий источник альфа-излучения. Измерение конечного источника проводили на альфа-спектрометре Мультирад-АС в течение 6–95 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены удельные активности радона-222 и радия-226 в родниках Екатеринбурга и окрестностей. Карта расположения исследованных родников представлена на рис. 1.

Результаты показали, что удельные активности радия-226 в исследованных родниках крайне низки: в большинстве родников активность радия-226 была ниже предела обнаружения (0,2–0,3 мБк/л) и только в четырех из них она статистически достоверно отличалась от нуля. Наибольшая активность радия-226, составившая $1,03 \pm 0,27$ мБк/л, обнаружена в роднике возле храма по адресу Чернышевского, 33. С учетом дозового коэффициента для радия-226, равного $2,8 \cdot 10^{-4}$ мЗв/Бк, рассчитано, что доза внутреннего

Таблица 1. Содержание радия-226 и радона-222

в воде исследованных родников

Table 1. Activity concentrations of Ra-226 and Rn-222 in water of the tested springs

№	Родник	Дата отбора	Удельная активность Rn-222, Бк/л	Удельная активность Ra-226, мБк/л
1	Потопаевский ключик	07.10.2020	122 ± 8	$< 0,2$
2	Московский	08.10.2020	$24,8 \pm 2,2$	$< 0,2$
3	Серебряный ключ	08.10.2020	< 5	$< 0,2$
4	Платонида	11.10.2020	126 ± 5	$< 0,2$
5	Памяти	17.10.2020	70 ± 6	$< 0,2$
6	Поющий ключ	08.11.2020	84 ± 4	$0,1 \pm 0,35$
7	Медвежья слеза	21.12.2020	39 ± 13	$< 0,2$
8	Северский	21.12.2020	88 ± 6	$0,46 \pm 0,34$
9	Калиновский	28.01.2021	$57,1 \pm 1,6$	$< 0,2$
10	Около дома ул. Труда, 9	28.01.2021	137 ± 11	$< 0,2$
11	Павловский	10.02.2021	156 ± 7	$0,71 \pm 0,35$
12	Чусовской	18.02.2021	$23,2 \pm 1,7$	$< 0,2$
13	Янтарный ключ	18.02.2021	7 ± 6	$< 0,2$
14	Пышминский	08.03.2021	10 ± 9	$0,06 \pm 0,21$
15	Возле храма на ул. Черняховского, 33	10.05.2021	8 ± 7	$1,03 \pm 0,27$
16	с. Камышево, ул. Уральская, 19	17.05.2021	$4,4 \pm 3,8$	$0,33 \pm 0,30$
17	Дарьин ключ	08.06.2021	$19,6 \pm 2,0$	$0,10 \pm 0,24$
18	Семь ключей	08.06.2021	$20,6 \pm 2,4$	$< 0,2$
19	Золотой ключик	08.06.2021	$44,9 \pm 1,4$	$< 0,2$
20	Горнощитский	22.06.2021	$42,6 \pm 1,4$	$< 0,2$

облучения за счет ежедневного употребления такой воды составит $0,21 \pm 0,05$ мкЗв/год, что существенно ниже предельного уровня внутреннего облучения за счет радионуклидов в питьевой воде, рекомендованного ВОЗ (100 мкЗв/год). Таким образом, радиационный риск, связанный с естественным содержанием радия-226 в воде исследованных родников, можно считать незначительным.

Рис. 1. Карта расположения исследованных родников (получено с помощью программы Google Earth): номера меток соответствуют родникам, указанным в табл. 1; красные метки – родники, в которых была осуществлен мониторинг сезонных колебаний радона.

Fig. 1. The map of location of the springs (obtained using Google Earth). Numbers of the springs correspond to those in Table 1. Red labels mean the springs where monitoring of temporal variations of radon was performed.

Поскольку при анализе проб родниковых вод на радий-226 одновременно был проведен анализ содержания радона-222, а также элементный анализ на масс-спектрометре, было интересно оценить наличие возможных корреляций между активностями радия-226 и содержанием других компонентов, в частности, радона-222 (дочерний продукт распада радия-226), урана-238 (материнский изотоп для радия-226) и щелочноземельных элементов (химические аналоги радия). Результаты приведены на рис. 2.

В научной литературе представлены достаточно противоречивые сведения о корреляции между активностями радона-222 и радия-226 в природных водах, что, вероятно, связано с условиями их миграции в различных водах. Так, в работе [12] на примере 48 проб подземных вод из Южной

Польши показано наличие корреляции между радоном и радием, однако для линейной аппроксимации коэффициент корреляции составил лишь $R^2 = 0,31$. Наиболее масштабный обзор на основе анализа 2143 различных источников воды выполнен в исследовании [8], в котором установлено, что для соотношения активностей $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ в природных водах характерен широкий диапазон значений от $2,26 \cdot 10^{-6}$ до 9,7 с медианным значением, присущим родниковым и подземным водам, равным 0,0035.

По результатам проведенных в рамках данного исследования измерений установлено практически полное отсутствие корреляций между радоном и радием в родниковых водах: по итогам формальной линейной обработки получен коэффициент корреляции $R^2 = 0,002$. Скорее всего, это связано с малым количеством экспериментальных данных при большом естественном разбросе соотношения активностей $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ в природных водах. Аналогичным образом было показано отсутствие корреляций между содержанием радия-226 и концентрациями урана и щелочноземельных элементов в родниковых водах. Таким образом, не удалось выявить надежный фактор, который мог бы служить индикатором повышенного содержания радия в природных подземных водах.

За период 09.2020–06.2021 гг. проведен мониторинг содержания Rn-222 в семи родниках, в которых ранее было зафиксировано превышение уровня вмешательства по удельной активности радона. Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 3. Родники Северский (№ 8) и на ул. Труда 9 (№ 10) замерзали и не функционировали в феврале-марте 2021 г, вода из остальных родников используется на протяжении всего года.

По полученным результатам можно сделать вывод, что для большинства родников сезонность существенно влияла на активность радона. Для четырех родников (Потопаевский, Поющий, Родник Памяти и родник на ул. Труда, 9) наблюдалось заметное повышение удельной активности радона в зимне-весенний период в среднем с января по март 2021 г. Это можно объяснить увеличением растворимости радона в воде при понижении температуры. Кроме того, для этих родников наблюдалось снижение дебета скважины в холодный период, тогда как скорость распада радионуклидов уранового ряда, а, следовательно, и скорость поставки радона не меняется со временем – таким образом, удельная активность радона в воде может повышаться за счет снижения количества воды. Наиболее сильные колебания активности радона отмечены в роднике Северский (A11) – от 50 до 154 Бк/л, т. е. разница между максимальным и минимальным значениями составила 3,06 раза. Это связано с особенностями данного родника – низким дебетом и наличием застойной зоны. Для родника Памяти такая разница составила 3,0 раза.

Рис. 3. Сезонные колебания удельной активности Rn-222 в родниках:

УВ – уровень вмешательства по радону-222 (60 Бк/л).

Fig. 3. Temporal variations of activity concentration of Rn-222 in springs.

УВ is the allowed limit for Rn-222 in water (60 Bq/L).

На примере колебаний удельной активности радона в роднике Калиновский становится очевиден практический смысл мониторинга природной радиоактивности в родниковых водах. В октябре–декабре 2020 г., а также в июне 2021 г. удельная активность радона в воде этого родника была ниже уровня вмешательства, однако она превышала его в остальные периоды. Таким образом, для более надежного принятия решения о пригодности использования воды из того или иного родника для питьевых целей целесообразно проводить хотя бы несколько измерений в разное время года.

ВЫВОДЫ

В рамках представленной работы проведен анализ содержания радия-226 в 20 родниках Екатеринбурга и его окрестностей. Установлено, что только в четырех родниках активность радия-226 статистически достоверно отличалась от нуля, тогда как в большинстве случаев она была ниже предела обнаружения (0,2–0,3 мБк/л). Наибольшая активность радия-226 составила $1,03 \pm 0,27$ мБк/л. Рассчитано, что доза внутреннего облучения за счет ежедневного употребления такой воды составит $0,21 \pm 0,05$ мкЗв/год. В этом случае радиационный риск от радия в родниковых водах можно считать пренебрежимо малым.

Для исследованных родников показано практически полное отсутствие корреляции между удельной активностью радия-226 и содержанием радона-222, урана-238 и щелочноземельных элементов. В ходе проведенных исследований не удалось выявить надежный фактор, который мог бы служить индикатором повышенного содержания радия в природных подземных водах.

В период 09.2020 – 06.2021гг. был проведен мониторинг содержания Rn-222 в семи родниках, в которых ранее было зафиксировано превышение уровня вмешательства по удельной активности радона (60 Бк/л). Определены существенные сезонные колебания удельной активности радона, при этом в отдельных родниках разница между минимальной и максимальной активностями достигала три раза. В основном отмечалось заметное повышение активности радона в зимний период, что можно объяснить лучшей растворимостью радона в воде при низких температурах и понижением дебета родников. Таким образом, экспериментально показано, что для надежного принятия решения о пригодности воды из того или иного родника для питьевых целей целесообразно осуществлять многократные измерения удельной активности радона в разное время года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идрисова Г.З., Сергеева И.В., Пономарева А.А., Сергеева Е.С., Шевченко Е.Н. Оценка экологического состояния родников западного Казахстана на основе гидрохимических и микробиологических показателей // Поволжский экологический журнал. 2019. № 2. С. 206–221.
2. Жинжакова Л.З., Воробьева Т.И., Чередник Е.А. Состав родниковых вод Кабардино-Балкарской республики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 5. С. 40–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-3.
3. Vasile M., Loots H., Jacobs K., Verheyen L., Sneyers L., Verrezen F., Bruggeman M. Determination of ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Ra and uranium isotopes in drinking water in order to comply with the requirements of the EU 'Drinking Water Directive.' *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. № 109. P. 465–469.
4. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A. Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejęw, Poland. *Nukleonika*. 2004. № 49(1). P. 1–5.
5. Малиновский Г.П., Ярмошенко 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.
6. Harley N.H., Chittaporn P., Cook G.B., Fisenne I.M. Radon water to air transfer measured in a bathroom in an energy-efficient home with a private well. *Radiation Protection Dosimetry*, 2014, no 160(1–3), p. 231–234. DOI:10.1093/rpd/ncu085.
7. 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, pp. 18–24.
8. Girault F., Perrier F., Przylibski T.A. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. *Geological Society*, London, Special Publications, 2016, no 451(1), pp. 131–154. DOI: 10.1144/SP451.3
9. Almayahi B.A., Tajuddin A.A., Jaafar M.S. Radiobiological long-term accumulation of environmental alpha radioactivity in extracted human teeth and animal bones in Malaysia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, no 129, pp. 140–147.
10. Семенищев В.С., Титова С.М., Воронина А.В. Определение качества воды в родниках Екатеринбурга и Свердловской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 5. С. 126–138. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-5-8.
11. Семенищев В. С., Оглезнева В. Ю., Титова С. М., Малышев А. С., Филинкова В. К. Изучение закономерностей осаждения тонких сорбционно-активных пленок диоксида марганца на различных полимерных носителях. Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. № 21(3). С. 380–390. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3471.
12. Bem H., Długosz-Lisiecka M., Mazurek-Rudnicka D., Szajerski P. Occurrence of ^{222}Rn and $^{226,228}\text{Ra}$ in underground water and ^{222}Rn in soil and their mutual correlations for underground water supplies in southern Greater Poland. *Environmental Geochemistry and Health* (2021). DOI: 10.1007/s10653-020-00792-z.

REFERENCES

1. Idrisova G.Z., Sergeyeva I.V., Ponomareva A.L., Sergeyeva Y.S., Shevchenko Y.N. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rodnikov zapadnogo Kazakhstana na osnove gidrokhimicheskikh i mikrobiologicheskikh pokazateley [The West Kazakhstan springs ecological status assessment based on hydro/chemical and micro/biological indicators]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2019, no 2, p. 206–221.
2. Zhinzhakova L.Z., Vorobyeva T.I., Cherednik Y.A. Sostav rodnikovykh vod Kabardino-Balkarskoy respubliki [The Kabardino-Balkaria Republic spring water composition]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2019, no 5, p. 40–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-3
3. Vasile M., Loots H., Jacobs K., Verheyen L., Sneyers L., Verrezen F., Bruggeman M. Determination of ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Ra and uranium isotopes in drinking water in order to comply with the requirements of the EU 'Drinking Water Directive'. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, no 109, p. 465–469.
4. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A. Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejo'w, Poland. *Nukleonika*, 2004, no 49(1), p. 1–5.
5. Malinovskiy G.P., Yarmoshenko I.V., Zhukovskiy M.V. Radon, kurenije i risk papillomy cheloveka kak factory riska raka legkogo v epidemiologicheskoy issledovaniyi 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, vol. 10, no 2, p. 106–114.
6. Harley N. H., Chittaporn P., Cook G. B., Fisenne I. M. Radon water to air transfer measured in a bathroom in an energy-efficient home with a private well. *Radiation Protection Dosimetry*, 2014, no 160(1–3), p. 231–234. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu085>.
7. 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.
8. Girault F., Perrier F., Przylibski T.A. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. *Geological Society*, London, Special Publications, 2016, no 451(1), p. 131–154. <https://doi.org/10.1144/SP451.3>.
9. Almayahi B.A., Tajuddin A.A., Jaafar M.S. Radiobiological long-term accumulation of environmental alpha radioactivity in extracted human teeth and animal bones in Malaysia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, no 129, p. 140–147.
10. Semenishchev V.S., Titova S.M., Voronina A.V. Determination of Water Quality in Springs of Ekaterinburg and Sverdlovsk Oblast. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2020, no 5, p. 126–138.
11. Semenishchev V.S., Oglezneva V.Y., Titova S.M., Malyshev A.S., Filinkova V.K. The study of regularities of precipitation of thin sorption-active manganese dioxide films onto various polymer supports. *Sorption and Chromatographic Processes*, 2021, no 21 (3), p. 380–390. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3471>.
12. Bem H., Długosz-Lisiecka M., Mazurek-Rudnicka D., Szajerski P. Occurrence of ^{222}Rn and $^{226,228}\text{Ra}$ in underground water and ^{222}Rn in soil and their mutual correlations for underground water supplies in southern Greater Poland. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00792-z>.

Сведения об авторах:

Семенищев 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; ORCID: 0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Воронина Анна Владимировна, канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой, 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: av.voronina@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

Насонова Юлия Игоревна, студент магистратуры, 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: july.nasonova@yandex

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

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

Yulia I. Nasonova, Post-graduate Student, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia a; e-mail: july.nasonova@yandex