


Мониторинг естественных радионуклидов ряда U-238 в родниках Екатеринбурга

В.С. Семенищев  , Ю.И. Насонова, С.М. Титова ,
А.В. Воронина , Е.И. Денисов

 vovius82@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Источники нецентрализованного водоснабжения – скважины и родники – до сих пор пользуются популярностью у населения даже в крупных городах. Однако вода таких источников может содержать значительные концентрации загрязняющих веществ, в т. ч. природные радионуклиды. В работе представлены результаты мониторинга содержания радона-222, а также определены удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 в семи родниках с превышением уровня вмешательства по радону-222, расположенных в окрестностях г. Екатеринбурга. **Методы.** Удельные активности радона в пробах воды измеряли непосредственно на гамма-спектрометре. В анализе Ra-226 проводили предварительное сорбционное концентрирование радия на сорбенте Т-5 с последующим выделением радия на тонкослойном плоском сорбенте MnO_2 -ПЭ. Анализ удельной активности Pb-210 выполняли в соответствии с методикой, разработанной компанией TrisKem International (Франция), основанной на селективном выделении свинца-210 на экстракционно-хроматографической смоле на основе краун-эфира. **Результаты.** Рассчитано, что среди исследованных радионуклидов вклад радона в годовую дозу облучения при употреблении родниковой воды составляет от 98,3 до 99,8 %. Таким образом, мониторинг радона является приоритетным для оценки пригодности по радиационному фактору природных питьевых вод подземного происхождения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: родники, радон-222, радий-226, уран-238, свинец-210, мониторинг.


Финансирование: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части госзадания, проект № FEUZ-2023-0013.

Для цитирования: Семенищев В.С., Насонова Ю.И., Титова С.М., Воронина А.В., Денисов Е.И. Мониторинг естественных радионуклидов ряда U-238 в родниках Екатеринбурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 70–81. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_6.

Дата поступления 21.07.2023.

MONITORING OF U-238 SERIES NATURAL RADIONUCLIDES IN SPRINGS NEAR EKATERINBURG

Vladimir S. Semenishchev  , Yulia I. Nasonova, Svetlana M. Titova ,
Anna V. Voronina , Eugeny I. Denisov

 vovius82@mail.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

© Семенищев В.С., Насонова Ю.И., Титова С.М., Воронина А.В., Денисов Е.И., 2023

ABSTRACT

Relevance. Sources of non-centralized water supply such as wells and springs are still popular even in large cities. At the same time, water from these sources may contain significant concentrations of pollutants including natural radionuclides. The article presents the results of a 1.5-year monitoring of Rn-222 activity concentrations in seven springs near Ekaterinburg as well as activity concentrations of U-238, Ra-226 and Pb-210 in water of these springs. **Methods.** Activity concentrations of Rn-222 were determined via gamma spectrometry, U-238 was determined by ICP-MS; both analyses were performed without sample pretreatment. Ra-226 and Pb-210 were analyzed in accordance with radiochemical methods including a radionuclide preconcentration from 5 – 10 L water sample, purification, source preparation and measurement. We have performed analysis of the Pb-210 specific activity according to the methods developed by TrisKem International (France) based on selective isolation of Pb-210 at extraction/chromatographic resin based on crown-ether. **Results.** It was calculated that the contribution of Rn-222 to the annual internal dose exposures was 98.3 – 99.8%. Thus, radon monitoring is a priority for evaluation of radiation safety of underground drinking water sources.

Key words: springs, radon-222, radium-226, uranium-238, lead-210, monitoring.

Financing: The work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (through the basic part of the government mandate, Project No. FEUZ-2023-0013).

For citation: Semenishchev V.S., Nasonova Y.I., Titova S.M., Voronina A.V., Denisov E.I. Monitoring of U-238 series natural radionuclides in springs near Ekaterinburg. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 70–81. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_6.

Received 21.07.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Источники нецентрализованного питьевого водоснабжения, такие как родники, скважины и колодцы, востребованы не только в сельской местности, но и в крупных городах. Несмотря на распространенное мнение о заведомой чистоте воды из таких источников («чем дальше родник от дороги, тем чище вода», «чем глубже скважина, тем чище в ней вода» и т. д.) и на то, что вода многих родников действительно удовлетворяет всем санитарно-гигиеническим требованиям [1], она зачастую может быть загрязнена как за счет хозяйственной деятельности человека, так и в результате естественных причин [2]. Среди загрязнителей, наиболее часто присутствующих в воде родников и скважин, можно выделить химические – тяжелые металлы [3–5], нефтепродукты [6, 7], ионные формы азота [8], патогенные микроорганизмы [9] и радиоактивные вещества [10–14]. Среди естественных радионуклидов, присутствующих в природных водах, наибольшую дозовую нагрузку вносят радионуклиды рядов U-238 (Ra-226, Rn-222, Pb-210 и Po-210) и Th-232 (Ra-228, Ra-224 и Th-228) [15]. В большинстве случаев наличие в родниковых водах этих радионуклидов обусловлено естественными процессами их выщелачивания из почв и горных пород, содержащих повышенные уровни урана или тория [16, 17].

Радон-222 является наиболее распространенным природным радионуклидом, присутствующим в подземных водах, благодаря его легкой миграции из урансодержащих минералов, инертности и относительно высокой растворимости в воде. В процессе использования радонсодержащей воды радон-222

может переходить в воздух, вызывая внутреннее облучение легочной ткани человека за счет ингаляции радона и его дочерних продуктов распада, что является второй по распространенности после курения причиной рака легких [18, 19]. Поэтому практически во всем мире контроль содержания радона является обязательным при использовании природных подземных вод, и значительное число публикаций посвящено мониторингу радона в подземных водах [20]. Помимо этого, повышенная активность радона в воде однозначно свидетельствует о повышенных концентрациях материнского урана в составе горных пород, через которые протекала вода, обогащаясь радоном. Следовательно, высокая активность радона в подземной воде может быть индикатором наличия в ней и других долгоживущих радионуклидов из ряда урана-238: обладающих высокой радиотоксичностью Ra-226, Pb-210 и Po-210.

Целью данного исследования является определение степени опасности содержания природных радионуклидов ряда урана-238 в воде родников, используемых населением г. Екатеринбурга в качестве нецентрализованных источников питьевого водоснабжения.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2020 г. при анализе родников Свердловской области, используемых населением в качестве нецентрализованных источников питьевого водоснабжения, было обнаружено семь родников с превышением уровня вмешательства по радону-222 [21], составляющему 60 Бк/л¹. В данном исследовании в этих семи родниках проводился мониторинг сезонных колебаний удельной активности радона, а также анализ содержания природных радионуклидов из ряда U-238: U-238, Ra-226 и Pb-210. Карта расположения родников представлена на рис. 1.

Для мониторинга Rn-222 пробы воды из родников отбирали с сентября 2020 г. по июнь 2022 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 (Po-218, At-218, Pb-214 и Bi-214). Активность радона в пробах измеряли на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ» (Атомтех, Беларусь) по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа Bi-214 (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 Rn-222 в пробе (Бк/л) на момент измерения и на момент отбора, соответственно;

t – время между отбором и измерением, ч;

λ – постоянная распада Rn-222, 0,01089 1/ч²;

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». М.: Энергоатомиздат, 2010. 222 с.

² МАГАТЭ – интерактивная карта нуклидов / IAEA Live Chart of Nuclides. Режим доступа: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

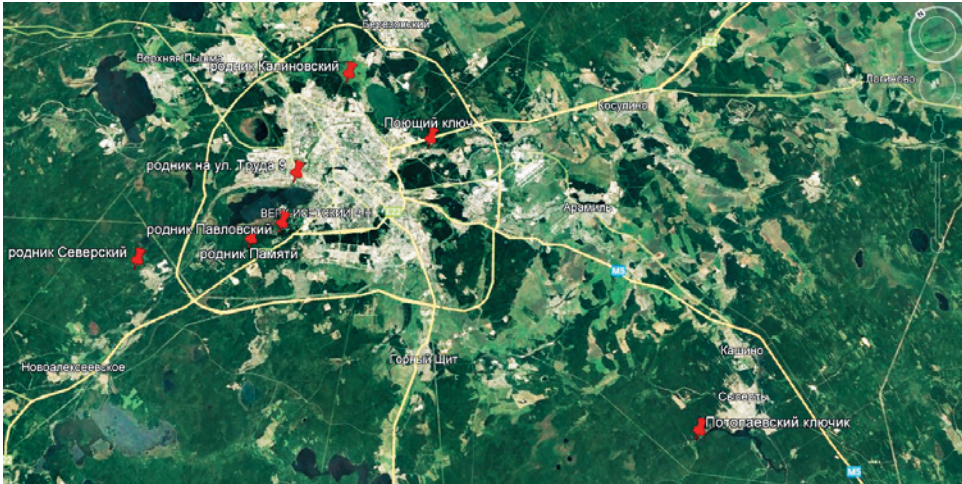


Рис. 1. Карта расположения родников в окрестностях Екатеринбурга, в которых было установлено превышение уровня вмешательства по Rn-222 (получено с помощью программы Google Earth).

Fig. 1. A map with location of seven springs with an elevated content of Rn-222 (obtained using the Google Earth software).

Концентрацию урана в воде родников определяли без предварительной подготовки на масс-спектрометре NexION 350 (Perkin Elmer, США) из проб, отобранных для определения радона. Обработку первичных результатов анализа осуществляли с помощью прикладного программного пакета TotalQuant. Активность U-238 в воде вычисляли, исходя из концентрации по формуле:

$$A = \frac{m}{M} \times N_A \times \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (2)$$

где m – масса радионуклида, г;
 M – молярная масса, г/моль;
 N_A – число Авогадро, моль⁻¹;
 $T_{1/2}$ – период полураспада, с.

Для определения удельных активностей Ra-226 и Pb-210 отбирали пробы воды объемом 10 л. Для анализа Ra-226 проводили предварительное сорбционное концентрирование радия в динамических условиях на сорбенте Т-5 (гидратированный диоксид титана), после чего радий десорбировали 1М раствором соляной кислоты. Полученный концентрат нейтрализовали до pH = 5,5–6,5 гидроксидом натрия, после чего проводили сорбцию радия на тонкослойном плоском сорбенте MnO₂-ПЭ и измеряли сорбент на альфа-спектрометре Мультирад-АС (НТЦ «Амплитуда», Россия) [22]. Анализ удельной активности Pb-210 выполняли в соответствии с методикой, разработанной компанией TrisKem International (Франция). Предварительное концентрирование свинца осуществляли путем соосаждения с гидроксидом железа (III). Селективное выделение Pb-210 проходило на экстракционно-хроматографической смоле SR Resin (TrisKem International, Франция), состоящей из 4,4'(5')-ди-трет-бутилциклогексил-18-краун-6, разбавленного н-октанолом

и нанесенного на инертный носитель [23]. Из полученного концентрата добавлением концентрированной серной кислоты осаждали сульфат свинца, фильтровали полученный осадок через полипропиленовый фильтр с диаметром пор 0,45 мм, выдерживали полученный источник в течение 3–4 недель для установления радиоактивного равновесия с дочерним Bi-210, после чего измеряли на низкофоновом альфа-бета-радиометре УМФ-2000 (Доза, Россия) с полупроводниковым детектором в течение 10 000 с.

Оценку доз внутреннего облучения за счет потребления радионуклидов с питьевой водой (D_i) рассчитывали в соответствии с уравнением:

$$D_i = A_i \times V \times \varepsilon_i, \quad (3)$$

где A_i – удельная активность радионуклида, Бк/л;

V – годовое потребление воды (2 л/сут = 730 л/год);

ε_i – дозовый коэффициент для данного радионуклида при пероральном потреблении взрослыми людьми: 10^{-8} Зв/Бк для Rn-222, $4,5 \times 10^{-8}$ Зв/Бк для U-238, $2,8 \times 10^{-7}$ Зв/Бк для Ra-226 и $6,9 \times 10^{-7}$ Зв/Бк для Pb-210 [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные по мониторингу содержания радона в воде родников приведены на рис. 2. Родники Северский и на ул. Труда 9 замерзали и не функционировали в конце зимы (февраль-март), остальные родники действовали 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, Памяти и 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 данных родников отмечено 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, в которой растворяется в среднем одинаковое количество радона.

Наиболее сильные колебания активности радона наблюдались в роднике Северский – от 50 до 154 Бк/л, т. е. разница между максимальным и минимальным значениями составила 3,06 раза. Вероятно, это связано с особенностями данного родника: он имеет достаточно низкий дебет, а также представляет собой проточный колодец, в отличие от остальных родников, изливающихся через смонтированные металлические или пластиковые трубы. За счет застойной зоны при сильном снижении дебета существенная часть радона успевает перейти в воздух. Аналогичным образом для родника Памяти такое соотношение составило 3,0.

Сильные вариации удельной активности радона в родниках Калиновский и Северский наглядно показывают практический смысл мониторинга природной радиоактивности в родниковых водах. В ряде периодов удельная активность радона в воде этих родников была ниже уровня вмешательства, однако

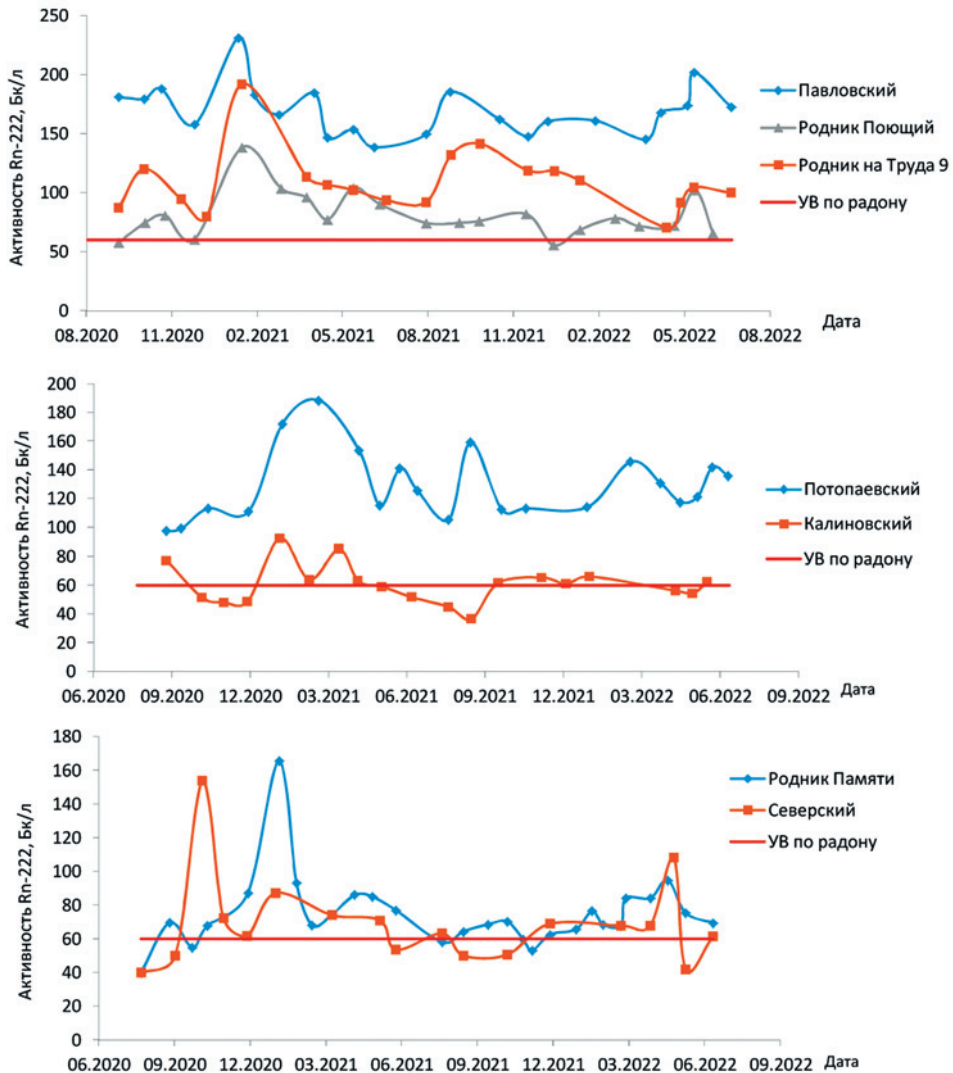


Рис. 2. Сезонные колебания удельной активности Rn-222 в родниках:
УВ – уровень вмешательства по радону-222 (60 Бк/л).

Fig. 2. Seasonal variations of Rn-222 activity concentrations in the springs:
УВ is the maximum allowed limit of Rn-222 in water (60 Bq/L).

она превышала его в остальные периоды. Таким образом, для более аргументированного принятия решения о пригодности использования того или иного родника для питьевых целей целесообразно проводить хотя бы несколько измерений в различное время года.

Удельные активности естественных радионуклидов ряда U-238 в воде родников г. Екатеринбурга представлены в табл. 1. Для Rn-222 приведено среднее значение активности по данным мониторинга в 2020–2022 гг. Результаты показали, что в отличие от радона для остальных радионуклидов ни в одном случае не было зафиксировано превышение уровня вмешательства. Наиболее низкие активности отмечены для Ra-226 – не более 0,9 мБк/л, при этом

только в трех пробах из семи удельная активность статистически достоверно отличалась от нуля. Удельные активности U-238 находились в пределах от 0,2 до 33 мБк/л, а удельные активности Pb-210 – от 2 до 19 мБк/л. Отметим, что значительных корреляций между активностями изученных четырех радионуклидов в родниковых водах не обнаружено. Скорее всего, это свидетельствует о том, что вода родников не имеет непосредственного контакта с урансодержащими горными породами, а радон поступает в воду через поры и трещины в породах из нижележащих слоев.

Таблица 1. Удельные активности естественных радионуклидов ряда U-238 в воде родников г. Екатеринбурга

Table 1. Activity concentrations of U-238 series natural radionuclides in water from the springs near Ekaterinburg

Родник	Удельные активности радионуклидов			
	U-238, мБк/л	Ra-226, мБк/л	Pb-210, мБк/л	Rn-222 (средн), Бк/л
Поющий ключ	19,78±0,14	не обнаружен	4,1 ± 2,8	81,3
Павловский	5,62±0,15	0,62 ± 0,27	5,6 ± 5,0	70,9
Памяти	2,21±0,11	не обнаружен	19 ± 14	76,0
На ул. Труда 9	32,6±0,5	не обнаружен	11 ± 12	108,9
Потопаевский ключик	3,06±0,04	0,87 ± 0,28	4 ± 16	169,9
Северский	0,20±0,04	не обнаружен	9 ± 3	129,3
Калиновский	5,89±0,04	0,72 ± 0,43	2 ± 5	60,5
Уровень вмешательства по радионуклиду	3000 мБк/л	490 мБк/л	200 мБк/л	60 Бк/л

Таблица 2. Годовые дозы внутреннего облучения за счет поступления естественных радионуклидов ряда U-238 с питьевой водой из родников г. Екатеринбурга

Table 2. Annual internal dose exposure due to U-238 series natural radionuclides in water from the springs near Ekaterinburg

Родник	Годовая доза внутреннего облучения за счет поступления радионуклида с питьевой водой, мкЗв/год					Вклад Rn-222 в годовую дозу облучения, %
	U-238	Ra-226	Pb-210	Сумма U-238 + Ra-226 + Pb-210	Rn-222	
Поющий ключ	0,65	–	2,07	2,72	593	99,5
Павловский	0,18	0,13	4,66	4,97	517	99,0
Памяти	0,07	–	9,80	9,87	555	98,3
На ул. Труда 9	1,07	–	5,37	6,44	795	99,2
Потопаевский ключик	0,10	0,18	2,83	3,11	1240	99,7
Северский	0,01	–	1,94	1,95	944	99,8
Калиновский	0,19	0,15	1,16	1,51	442	99,7

Таким образом, в отличие от Rn-222, удельные активности остальных радионуклидов ряда U-238 были незначительными. Между тем, более адекватную оценку риска для здоровья дает сравнение годовых доз внутреннего облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой, которые были рассчитаны для измеренных активностей радионуклидов (см. табл. 2).

В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) годовая доза внутреннего облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой не должна превышать 100 мкЗв. По данным табл. 2, в случае радона наблюдается кратное превышение рекомендованной дозы (до 12 раз), тогда как дозовая нагрузка урана, радия и свинца находилась в пределах 10 мкЗв. Среди радионуклидов ряда U-238 вклад Rn-222 в годовую дозу облучения составил от 98,3 % до 99,7 %. Таким образом, Rn-222 является дозообразующим радионуклидом среди изученных.

Следует отметить, что даже если вода формально удовлетворяет требованиям российского санитарного законодательства по радону (не более 60 Бк/л), годовая доза внутреннего облучения может существенно превышать уровень, рекомендованный МКРЗ. Рассчитано, что годовой дозе внутреннего облучения 100 мкЗв соответствует удельная активность радона 14 Бк/л, поэтому потенциально есть смысл пересмотреть норматив по радону в сторону ужесточения. Опыт других стран в этой сфере [25] показывает высокую вариативность подходов: наиболее жесткие ограничения (11,1 Бк/л) установлены в США, в большинстве стран (страны ЕС, Австралия и др.) предельно допустимая активность составляет 100 Бк/л, тогда как в ряде стран допускается 500 Бк/л (Ирландия, Португалия, Испания) и даже 1000 Бк/л (Финляндия).

Среди прочих естественных радионуклидов ряда U-238 самый существенный вклад в годовую дозу внутреннего облучения дает Pb-210, что связано с его высокой радиотоксичностью за счет медленного выведения, большого периода полураспада (22 года) и накопления в организме дочерних изотопов – высокоэнергетичного бета-излучателя Bi-210 и альфа-излучателя Po-210. Таким образом, при анализе природной воды следует особое внимание уделять определению содержания Rn-222 и в меньшей степени Pb-210.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования осуществлен мониторинг содержания радона-222, а также определены удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 в семи родниках в окрестностях г. Екатеринбурга. В результате мониторинга установлено, что во всех родниках наблюдаются значительные сезонные колебания удельной активности радона-222, при этом в воде родников Северский и Памяти разница между наибольшим и наименьшим значениями удельной активности составляла около трех раз. Такой значительный разброс этого показателя качества воды свидетельствует о необходимости организации регулярного мониторинга (хотя бы посезонно четыре раза в год) даже в родниках, в воде которых удельная активность радона на основании однократного измерения оказалась несколько ниже уровня вмешательства.

Удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 во всех случаях не превышали уровней вмешательства, составляя до $32,6 \pm 0,5$ мБк/л для U-238, до $0,87 \pm 0,28$ мБк/л для Ra-226 и до 19 ± 14 мБк/л для Pb-210. При этом, несмотря на значительно более высокую радиотоксичность этих радионуклидов по сравнению с Rn-222, их вклад в годовую дозу внутреннего облучения при употреблении родниковой воды составит не более 0,65, 0,18 и 9,8 мкЗв/год при максимально допустимой дозе облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой, рекомендованной МКРЗ, 100 мкЗв/год. В то же время, годовые дозы облучения, рассчитанные по среднему содержанию радона в воде родников, составят от 442 до 1240 мкЗв, что в разы превышает рекомендованный уровень.

Таким образом, среди радионуклидов ряда урана-238 вклад радона-222 в годовую дозу облучения при употреблении родниковой воды составляет более 98 %, что подтверждает приоритетность мониторинга радона-222 для оценки пригодности по радиационному фактору природных питьевых вод подземного происхождения. Продолжение работ будет нацелено на расширение мониторинга естественной радиоактивности в природных источниках питьевой воды в Свердловской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиева Э.Ф., Махмутов А.Р. Мониторинг отдельных показателей воды родников Бураевского района республики Башкортостан // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 12 (240). С. 56–59.
2. Пасечник Е.Ю., Льготин В.А., Савичев О.Г., Чилингер Л.Н., Хвощевская А.А., Чжоу Д. Химический состав родников как индикатор природно-техногенной эволюции городской экосистемы (на примере города Томска, юго-восток Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 195–206.
3. 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.
4. Ulniković V.P., Kurilić S.M. Heavy metal and metalloid contamination and health risk assessment in spring water on the territory of Belgrade City, Serbia // Environmental Geochemistry and Health. 2020. Vol. 42, Iss. 11. P. 3731–3751.
5. Ghobadi A., Cheraghi M., Sobhanardakani S., Lorestani B., Merrikhpour H. Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, West of Iran // Environmental Earth Science. 2020. Vol. 79. Iss. 18. 428 p.
6. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Оценка техногенного загрязнения подземного водного бассейна в районе ликвидированной шахты (Липовецкое каменноугольное месторождение, Приморский край) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013. № 2 (168). С. 106–115.
7. Козлова В.А., Сивохиц Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 107–119. DOI: 10.35567/19994508_2022_6_7.
8. Capraro F., Bizzotto A., Masiol M., Pavoni B. Chemical analyses of spring waters and factor analysis to monitor the functioning of a karstic system. The role of precipitations regimen and anthropic pressures // Journal of Environmental Monitoring. 2011. Vol. 13. Iss. 9. P. 2543–2549.
9. Iličić D., Palijan G. Persistence of coliform bacteria in spring water microcosms // Hrvatske Vode. 2019. Vol. 27. Iss. 109. P. 193–200.

10. 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.
11. Erden P.E., Dirican A., Seferinoğlu M., Yeltepe E., Şahin N.K. ^{238}U , ^{234}U and ^{226}Ra concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. P. 159–166.
12. Chau N.D., Michalec B. Natural radioactivity in bottled natural spring, mineral and therapeutic waters in Poland // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279. P. 121–129.
13. Singla A.K., Kansal S., Mehra R. Quantification of radon contamination in drinking water of Rajasthan, India // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 327. P. 1149–1157.
14. 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.
15. 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.
16. Крячюнас В.В., Кузнецова И.А., Игловский С.А., Баженов А.В., Дружинин С.В., Котова Е.И. Пространственное распределение естественных и техногенных радионуклидов в арктических почвах побережья залива Моллера, архипелаг Новая Земля // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 1. С. 147–153.
17. 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.
18. Vogeltanz-Holm N., Schwartz G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know? // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. P. 26–31.
19. Pacella D., Loffredo F., Quarto M. Knowledge, risk perception and awareness of radon risks: A Campania region survey // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2023. Vol. 16, Iss. 4. P. 100721.
20. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P. K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 247. P. 106852.
21. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Titova S.M., Tomashova L.A., Nasonova Y.I. Natural radioactivity in springs of Sverdlovsk region, middle Urals, Russia // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 329. No. 2. С. 857–863.
22. Семенищев В.С., Бетенеков Н.Д., Томашова Л.А. Определение ^{224}Ra и ^{226}Ra в питьевых водах // *Вода: химия и экология*. 2017. № 8 (110). С. 72–79.
23. Horwitz P., Chiarizia R., Dietz M. Acid dependency of the extraction of selected metal ions by a strontium-selective extraction chromatographic resin: calculated vs. experimental curves // *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 1992. Vol. 10. P. 337–361. DOI: 10.1080/07366299208918108.
24. ICRP Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60 ICRP Publication 119, Ann. ICRP, 41, Elsevier (2012)
25. Jobbágy 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.

REFERENCES

1. Zakieva E.F., Makhmutov A.R. Monitoring of individual indicators of water in the springs of the Buraevsky district of the Republic of Bashkortostan. *Life Safety*. 2020. № 12 (240). P. 56-59 (In Russ.).
2. Pasechnik E.Yu., Lgotin V.A., Savichev O.G., Chilingier L.N., Khvashevskaya A.A., Zhou D. Chemical composition of springs as an indicator of natural-technogenic evolution of the urban ecosystem (on the example of Tomsk city, south-east of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo/resources*. 2022. Vol. 333. № 7. С. 195-206. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3534 (In Russ.).
3. Zhinzhakova L.Z., Vorobieva T.I., Cherednik E.A. The composition of spring waters of the Kabardino-Balkarian Republic. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. № 5. P. 40–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-3 (In Russ.).

4. Ulniković V.P., Kurilić S.M. Heavy metal and metalloid contamination and health risk assessment in spring water on the territory of Belgrade City, Serbia. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42, Issue 11. P. 3731-3751. DOI: 10.1007/s10653-020-00617-z.
5. Ghobadi A., Cheraghi M., Sobhanardakani S., Lorestani B., Merrikhpour H. Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, *West of Iran*. *Environmental Earth Science*. 2020. Vol. 79, Issue 18. P. 428. DOI: 10.1007/s12665-020-09177-y.
6. Tarasenko I.A., Zinkov A.V. Assessment of technogenic pollution of the underground water basin in the area of the liquidated mine (Lipovetskoye coal deposit, Primorsky Krai). *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013. № 2 (168). P. 106–115 (In Russ.).
7. Kozlova V.A., Sivokhip Zh.T. Evaluation of the dynamics of water quality in the transboundary basin of the Ural River. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 6. P. 107–119 (In Russ.).
8. Capraro F., Bizzotto A., Masiol M., Pavoni B. Chemical analyses of spring waters and factor analysis to monitor the functioning of a karstic system. The role of precipitations regimen and anthropic pressures. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011. Vol. 13. Issue 9. P. 2543-2549. DOI: 10.1039/c1em10317b.
9. Iličić D., Palijan G. Persistence of coliform bacteria in spring water microcosms. *Hrvatske Vode*. 2019. Vol. 27. Iss. 109. P. 193–200.
10. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A. Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejo´w, Poland. *Nukleonika*. 2004. № 49(1). P. 1–5.
11. Erden P.E., Dirican A., Seferinoğlu M., Yeltepe E., Şahin N.K. ²³⁸U, ²³⁴U and ²²⁶Ra concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. 159–166. DOI: 10.1007/s10967-014-3105-2.
12. Chau N.D., Michalec B. Natural radioactivity in bottled natural spring, mineral and therapeutic waters in Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279. P. 121–129. doi: 10.1007/s10967-007-7276-6.
13. Singla A.K., Kansal S., Mehra R. Quantification of radon contamination in drinking water of Rajasthan, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 327. P. 1149–1157. DOI: 10.1007/s10967-021-07599-x
14. Girault F., Perrier F., Przylibski T.A. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. *Geological Society, London, Special Publications*. 2016. № 451(1). P. 131-154. doi: 10.1144/SP451.3.
15. Vasile M., Loots H., Jacobs K., Verheyen L., Sneyers L., Verrezen F., Bruggeman M. Determination of ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra 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. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.11.076
16. Kriauciunas V.V., Kuznetsova I.A., Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Druzhinin S.V., Kotova E.I. Spatial distribution of natural and technogenic radionuclides in arctic soils of the Moller gulf, Novaya Zemlya archipelago. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. № 1. P. 147-153. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-147-153.
17. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Tomashova L.A., Nasonova Yu.I., Analysis of the content of radon and radium in the springs of the city of Yekaterinburg and its environs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 5. P. 84–96 (In Russ.).
18. Vogeltanz-Holm N., Schwartz G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know? *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. P. 26–31. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.017.
19. Pacella D., Loffredo F., Quarto M. Knowledge, risk perception and awareness of radon risks: A Campania region survey. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2023. Vol. 16. Iss. 4. P. 100721. DOI: 10.1016/j.jrras.2023.100721.
20. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P. K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 247. P. 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
21. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Titova S.M., Tomashova L.A., Nasonova Y.I. Natural radioactivity in springs of Sverdlovsk region, middle Urals, Russia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 329. № 2. P. 857–863. DOI: 10.1007/s10967-021-07847-0 (In Russ.).

22. Semenishchev V.S., Betenekov N.D., Tomashova L.A. Determination of ^{224}Ra and ^{226}Ra in drinking water. *Water: Chemistry and Ecology*. 2017. № 8 (110). P. 72–79 (In Russ.).
23. Horwitz P., Chiarizia R., Dietz M. Acid dependency of the extraction of selected metal ions by a strontium-selective extraction chromatographic resin: calculated vs. experimental curves. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 1992. Vol. 10. P. 337–361. DOI: 10.1080/07366299208918108.
24. ICRP Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60 ICRP Publication 119, Ann. ICRP, 41, Elsevier (2012).
25. Jobbágy 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.

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

Насонова Юлия Игоревна, магистрант, 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.ru

Титова Светлана Михайловна, канд. техн. наук, доцент, кафедра редких металлов и наноматериалов, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID: 0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@mail.ru

Воронина Анна Владимировна, канд. хим. наук, 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; ORCID:0000-0002-1116-6335; e-mail: av.voronina@mail.ru

Денисов Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, 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: e.i.denisov@urfu.ru

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

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

Svetlana M. Titova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Rare Metals and Nano/materials, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@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; ORCID: 0000-0002-1116-6335; e-mail: av.voronina@mail.ru

Eugeniy I. Denisov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: e.i.denisov@urfu.ru