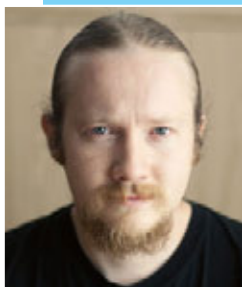


## РАДОН В ПОДЗЕМНЫХ ПИТЬЕВЫХ ВОДАХ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТЕЙ И МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ

© 2017 г. В.С. Семенищев, Н.Д. Бетенеков, А.Ф. Никифоров,  
С.В. Глазырин, Л.А. Томашова

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

**Ключевые слова:** подземные воды, питьевая вода, радон, природная радиоактивность, барботирование, активированный уголь, родники, скважины, гамма-спектрометрия.



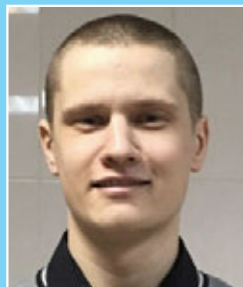
В.С. Семенищев



Н.Д. Бетенеков



А.Ф. Никифоров



С.В. Глазырин



Л.А. Томашова

Представлены результаты анализа содержания  $^{222}\text{Rn}$  в 18 родниках и 23 скважинах Екатеринбурга и Свердловской области, использующихся для питьевого водоснабжения. Из исследованных проб в семи родниках (39 %) и семи скважинах (30 %) обнаружено превышение уровня вмешательства по радону, при этом максимальная активность радона в воде достигала 1350 Бк/л.

Предложены способы удаления радона для подземных вод с превышением уровня вмешательства по радону. Показано, что из физических методов удаления радона наиболее эффективно барботирование воздуха через воду – удаляется более 99 %, наименее – отстаивание. Хорошие результаты получены также при абсорбции радона на активированных углях: при использовании угля марки Carbotech (Германия) удается удалить более 90 % радона, достоинством данного метода является отсутствие внутреннего облучения за счет перехода радона в приповерхностный слой воздуха.

В научном плане получены закономерности степени извлечения радона в зависимости от следующих факторов: времени отстаивания воды, температуры,

периода барботирования воздуха, вида активированного угля, скорости фильтрования воды через активированный уголь. Полученные результаты представляют практический интерес с точки зрения обеспечения радиационной безопасности населения при использовании для питьевых целей подземных источников водоснабжения.

Снабжение населения качественной питьевой водой – одна из актуальных экологических проблем XXI в. Несмотря на то что Россия занимает второе место в мире по обеспеченности водными ресурсами [1], качество воды в промышленно развитых регионах и крупных мегаполисах является довольно низким вследствие техногенного загрязнения водных объектов. Так, в докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 году», из 82 действующих створов государственной сети на территории Свердловской области створы с качеством воды 1 и 2 класса («условно чистая» и «слабо загрязненная») вообще не отмечены, тогда как вода с наихудшим качеством (5 класса – «экстремально грязная») зафиксирована в 9 створах [2]. В связи с низким качеством водопроводной воды в Екатеринбурге часть населения предпочитает использовать для питьевых целей альтернативные источники – бутилированную воду или самостоятельный отбор подземных вод из родников и скважин. Вопреки распространенному мнению о высоком качестве подземных вод, в результате как техногенного загрязнения, так и природных особенностей формирования химического состава около 70 % извлекаемой на питьевые нужды подземной воды на территории Свердловской области не соответствует по тем или иным показателям требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 [3] и нуждается в дополнительной водоподготовке [2].

Особое место среди химических загрязняющих веществ занимают природные и техногенные радионуклиды. С точки зрения радиационной безопасности населения, среди наиболее значимых природных радионуклидов, содержащихся в природных водах, следует отметить радионуклиды рядов  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) и  $^{232}\text{Th}$  ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ), а также  $^{40}\text{K}$ ; среди техногенных наиболее значимы такие долгоживущие радионуклиды, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ . При этом в подавляющем большинстве случаев радиоактивное загрязнение природных вод природными радионуклидами существенно преобладает над загрязнением техногенными. Так, исследования показали, что в водопроводной воде в некоторых районах Японии содержится до 4,3 Бк/л  $^{137}\text{Cs}$  и 3,7 Бк/л  $^{134}\text{Cs}$  [4]; в 2014 г. в речных водах Восточной Фукусимы (Япония) типичное содержание  $^{137}\text{Cs}$  составляло от 0,02 до 0,43 Бк/л, а  $^{134}\text{Cs}$  – от 0,006 до 0,14 Бк/л [5]. Типичные активности  $^{90}\text{Sr}$  составляют порядка 0,005 – 0,01 Бк/л [6], а наиболее высокие активности  $^{239}\text{Pu}$  по данным

[7] в водах Семипалатинского ядерного полигона составили всего лишь 0,099 Бк/л. В то же время активности природных радионуклидов в подземных (и особенно минеральных) водах могут достигать существенных значений. Так, например, в минеральных водах Турции удельные активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  составляют от  $<0,56$  до 165, от  $<0,42$  до 439 и от  $<0,42$  до 464 мБк/л соответственно [8]; в подземных водах Польши активность радия достигает нескольких сотен мБк/л [9]. Наиболее высокие удельные активности в подземных водах характерны для изотопа  $^{222}\text{Rn}$ , при этом типичные активности радона в грунтовых водах находятся в пределах 3,7 – 370 Бк/л [10, 11], хотя в некоторых активностей радона может превышать 1000 Бк/л [12]. Согласно НРБ-99/2009, уровень вмешательства для  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде составляет 60 Бк/л, а определение удельной активности  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде из подземных источников является обязательным [13]. Тем не менее, вероятность найти подземную воду с превышением уровня вмешательства по радону весьма высока. Так, например, по результатам обследования 2379 водозаборов в Чешской Республике было выявлено превышение нормы содержания радона в 31 % случаев [14].

В работе [15] выявлено, что основным радионуклидом, определяющим радиационное воздействие природных вод на здоровье населения, является  $^{222}\text{Rn}$ . Целью данного исследования стала оценка эффективности различных методов удаления радона из питьевых вод. Для этого в 2015–2016 гг. были исследованы родники и скважины в г. Екатеринбурге и его ближайших окрестностях. За основу взят список родников городского портала Екатеринбурга [16]. Помимо родниковых вод, исследован ряд проб воды из скважин в частных домах, коллективных садах и т. д. В данной работе проведен анализ содержания  $^{222}\text{Rn}$  методом гамма-спектрометрии в воде 18 родников и 23 скважин Екатеринбурга и Свердловской области, использующихся для питьевого водоснабжения. Предложены способы удаления радона для случаев подземных вод с превышением уровня вмешательства по радону.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа содержания радона пробы воды объемом не менее 1 л отбирали в герметичные емкости, после чего выдерживали в течение от 5 ч до 2 сут для установления радиоактивного равновесия радона с короткоживущими дочерними радионуклидами ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ ). Предварительно было рассчитано, что при выдержке пробы 3 ч достигается степень равновесия между радоном и продуктами распада более 99 %. Активность выдержанных проб измеряли на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ» по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа  $^{214}\text{Bi}$  (энергия – 608 кэВ, выход гамма-квантов – 43 % [17]) в стандартной геометрии Маринелли (1 л) без пробоподготовки.

В табл. 1, 2 представлены результаты определения радона в воде из родников и скважин. На рис. 1 отражены гамма-спектры воды из родника Памяти в г. Екатеринбурге (табл. 1, № 4) и скважины из частного дома, г. Сысерть (табл. 2, № 1).

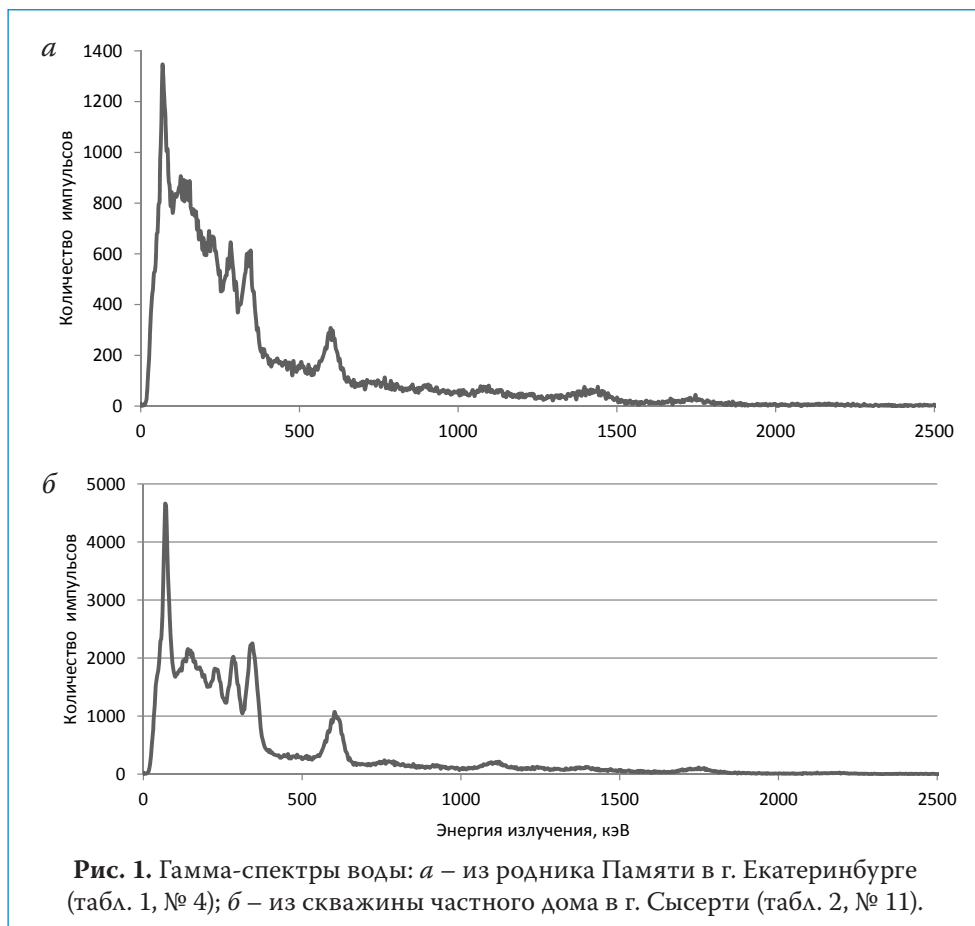
**Таблица 1.** Удельные активности  $^{222}\text{Rn}$  в воде из самоизливающихся родников

№	Название или местонахождение родника	Дата отбора пробы	$A_{^{222}\text{Rn}}$ , Бк/л
1	г. Екатеринбург, ул. Труда	28.09.2015	104,9
2	род. 7 ключей (мкр-н Сортировочный)	08.09.2015	18,9
3	род. Московский	15.09.2015	27,6
4	род. Памяти	06.10.2015	104,1
5	10-й км Чусовского тракта	21.09.2015	37,3
6	род. Поющий	02.12.2015	86,4
7	г. Екатеринбург, ул. Островского	17.12.2015	11,7
8	род. Молодежный	13.11.2015	37,0
9	род. Серебряный	29.09.2015	19,1
10	род. Европа-Азия	03.06.2016	20,5
11	пос. Северка, родник у церкви на ул. Набережная	24.05.2016	102,0
12	род. Парковый	16.10.2016	63,9
13	род. Потопаевский ключик (г. Сысерть)	30.09.2016	145,0
14	род. Павловский	06.11.2016	171,9
15	род. Чусовской	01.11.2016	37,6
16	род. Пышминский	25.10.2016	9,2
17	г. Екатеринбург, родник на ул. Миасская, 16	10.10.2016	6,9
18	г. Екатеринбург, родник у плотины Нижнеисетского пруда	09.10.2016	8,5

По результатам проведенного анализа родников можно сделать вывод, что в питьевых подземных водах определяющим фактором радиационной опасности является загрязнение радоном и короткоживущими продуктами его распада. В то же время, вопреки распространенному мнению, ни в одной из проб воды не было обнаружено (чувствительность анализа для  $^{137}\text{Cs}$  составляла 3 Бк/л) заметного содержания техногенных гамма-излучающих радионуклидов.

Таблица 2. Удельные активности  $^{222}\text{Rn}$  в воде из скважин

№	Местонахождение скважины	Дата отбора пробы	$A_{^{222}\text{Rn}}$ , Бк/л
1	Скважина общего пользования, пос. Палкинский торфяник	05.10.2015	24,0
2	Жилой дом, пос. Обуховский	18.12.2016	< 3
3	г. Екатеринбург, пер. Рыбинский	14.09.2015	19,0
4	г. Арамилы, ул. Набережная, 6	31.03.2016	97,7
5	пос. Палкино, ул. Береговая	25.05.2016	18,1
6	Жилой дом, пос. Атиг	27.03.2016	< 3
7	Жилой дом, с. Златогорова, Белоярский р-н	24.05.2016	< 3
8	ст. Решеты, база отдыха	25.05.2015	3,5
9	г. Екатеринбург, ул. Викулова, 160	27.05.2016	87,23
10	Жилой дом, пос. Асбест, Сысертский р-н	02.04.2016	91,5
11	Жилой дом, г. Сысерть	21.09.2015	1350
12	Жилой дом, пос. Садовый	21.12.2015	9,6
13	Жилой дом, пос. Палкино	05.10.2015	28,8
14	Жилой дом, пос. Залесье	17.12.2015	9,6
15	Скважина общего пользования, коллективный сад «Медик-2»	12.10.2015	10,2
16	Скважина общего пользования, коллективный сад «Мечта»	02.11.2015	38,4
17	Скважина общего пользования, коллективный сад «Поле чудес»	23.10.2016	< 3
18	Жилой дом, г. Двуреченск	01.12.2015	29,0
19	г. Арамилы, пер. Дорожный, 10	25.09.2016	292,0
20	пос. Патруши, ул. Строителей, 3	18.10.2016	402,0
21	пос. Патруши, ул. Советская, 131	04.10.2016	79,5
22	пос. Патруши, централизованный водопровод	04.10.2016	30,8
23	Жилой дом, пос. Прохладный	23.10.2016	11,8



В 14 из 41 исследованного источника питьевой воды обнаружено превышение уровня вмешательства по радону (60 Бк/л): в большинстве из таких источников активность радона составляла от 70 до 100 Бк/л. При этом, согласно п. 5.1.9 ОСПОРБ-99/2010 [18], в случаях, когда удельная активность радионуклидов в питьевой воде превышает уровень вмешательства не более, чем в 10 раз, должны осуществляться мероприятия по снижению содержания радионуклидов с учетом принципа оптимизации. В скважине индивидуального жилого дома в г. Сысерти удельная активность радона составила 1350 Бк/л, т. е. в 22,5 раза выше уровня вмешательства, согласно ОСПОРБ-99/2010 по показателям радиационной безопасности вода из источника считается непригодной для питьевого водоснабжения, а поиск и переход на альтернативный источник водоснабжения населения в таких случаях осуществляется в безотлагательном порядке [18].

Как отмечено выше, радон является главным радиоактивным загрязнителем, присутствующим в подземных водах. Поэтому целью дальнейших экспериментов было определение наиболее подходящих методов удаления радона из питьевой воды. Все эксперименты проведены на воде из родника Памяти, поскольку из всех источников с высокой активностью радона он является наиболее популярным и доступным для населения. В качестве возможных методов удаления радона протестированы отстаивание, кипячение, аэрация и сорбция на углях.

По результатам экспериментов построены зависимости степени удаления радона из воды от интенсивности или продолжительности фактора, влияющего на удаление. Степень удаления радона рассчитывали по формуле (1):

$$D = \left(1 - \frac{A_0 - A}{A_0}\right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $D$  – степень удаления;

$A_0$  – начальная активность радона в пробе;

$A$  – активность радона в пробе после удаления.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2–4 в виде зависимостей степени удаления радона от интенсивности или продолжительности фактора.

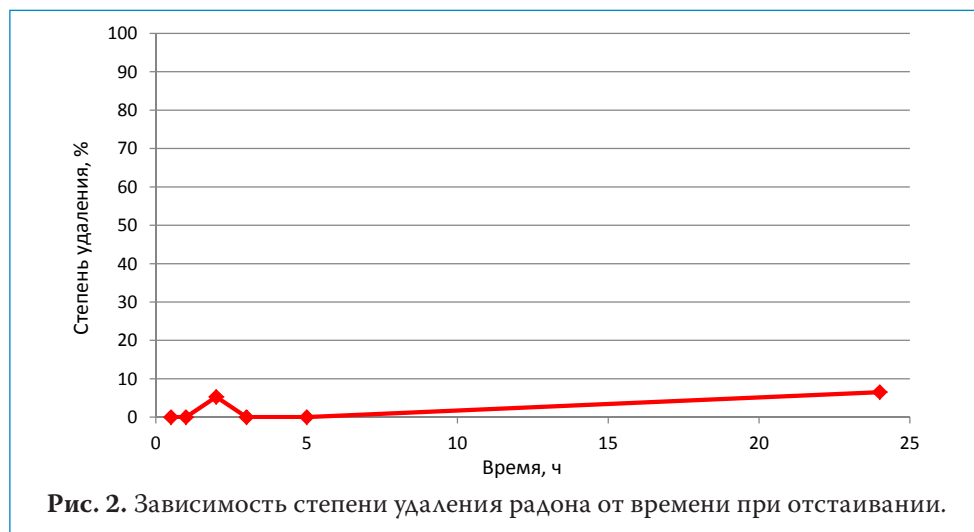


Рис. 2. Зависимость степени удаления радона от времени при отстаивании.

Экспериментальные данные показывают, что барботирование является наиболее эффективным из физических методов удаления радона. Так, уже при времени продувки 30 мин степень удаления близка к 90 %, а после 2 ч барботирования радон отгоняется практически полностью.

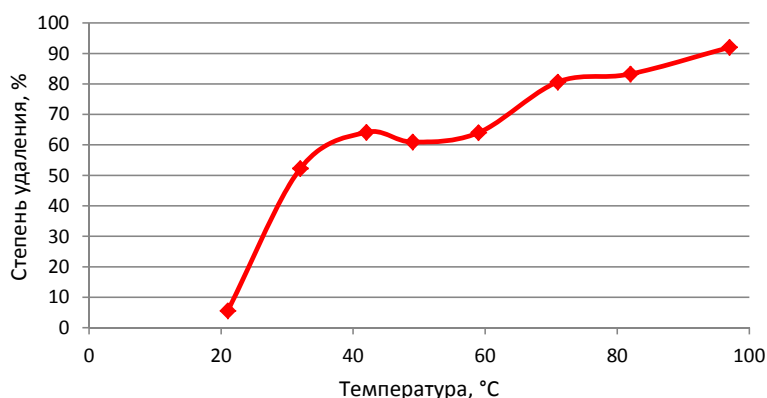


Рис. 3. Зависимость степени удаления радона от температуры при однократном нагревании воды.

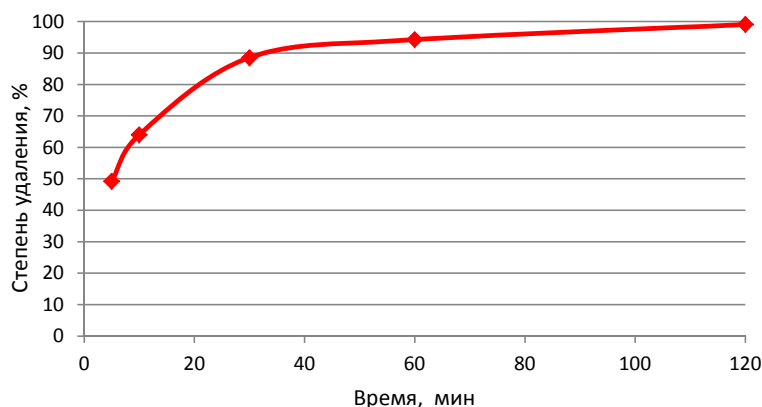


Рис. 4. Зависимость степени удаления радона из воды от времени барботирования воздуха.

Основной недостаток физических методов удаления радона – его переход в приповерхностный воздух и, как следствие, опасность облучения человека радоном и продуктами его распада. При таком подходе необходимы дополнительные средства для удаления радона из воздуха помещений и его рассеяния в атмосфере. В отличие от физических методов, метод абсорбции радона на углях позволяет избежать этих проблем. В экспериментах были использованы четыре вида активированных углей:

- активированный кокосовый уголь производства Carbotech (Германия) после отмывки от неорганических солей;
- активированный кокосовый уголь производства Carbotech (Германия), импрегнированный ионами серебра;



- активированный кокосовый уголь производства NWC (Малайзия);
- березовый активированный уголь (БАУ) производства России.

В колонку с внутренним диаметром 18 мм насыпали 20 мл пробы угля, промывали водопроводной водой, чтобы удалить мелкую фракцию и устанавливали сливом в пустую бутылку. С помощью перистальтического насоса на необходимой скорости пропускали воду из родника Памяти через колонку с углем. Пробу пропущенной воды выдерживали 3–4 ч для установления радиоактивного равновесия и измеряли активность радона на гамма-спектрометре. Безразмерную величину степени сорбции радона  $S$  рассчитывали по формуле

$$S = \frac{A_0 - A}{A_0}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – начальная активность радона в пробе;

$A$  – активность радона в пробе после удаления.

На первом этапе была исследована сорбционная способность всех углей при скорости пропускания 100 мл/мин. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Зависимость степени сорбции радона от марки угля

Марка угля	$S$ , мл/мин
БАУ	0,78
NWC	0,77
Carbotech	0,91
Carbotech, импрегнированный Ag	0,92

Как следует из данных табл. 3, наилучшим сорбентом является уголь марки Carbotech, причем наличие серебра на угле не оказывает какого-либо значимого влияния на степень сорбции. Далее проверили зависимость степени удаления радона на угле Carbotech от скорости пропускания воды. Экспериментальные данные представлены на рис. 5. Представленная на рис. 5 зависимость позволяет заключить, что увеличение скорости пропускания негативно сказывается на степени сорбции, т. к. уменьшается время взаимодействия воды с сорбентом.

В целом, можно сделать вывод, что при использовании активированного угля Carbotech метод абсорбции радона показывает высокую эффективность, сопоставимую с эффективностью нагревания. Однако значимым преимуществом метода абсорбции является тот факт, что радон не поступает в воздух, а фиксируется в замкнутом угольном фильтре, не создавая опасности для человека.

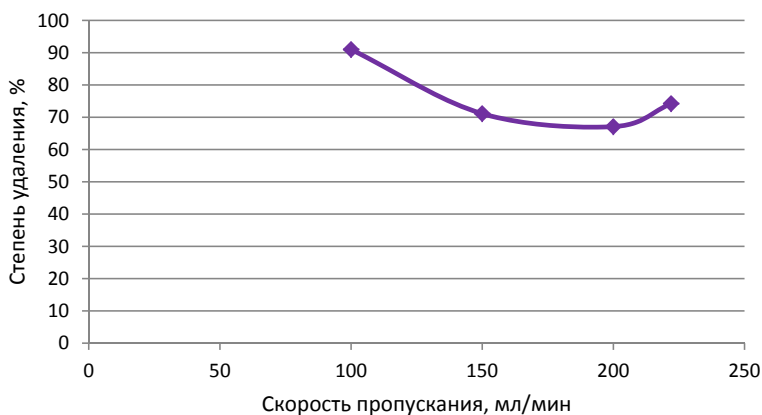


Рис. 5. Зависимость степени удаления радона от скорости пропуска воды.

### ВЫВОДЫ

В рамках проведенных исследований методом гамма-спектрометрии определено содержание радионуклидов в 41 питьевом источнике в г. Екатеринбург и Свердловской области. Наибольшая опасность представлена радоном и продуктами его распада. Техногенных радионуклидов не обнаружено ни в одной пробе. В 14 пробах воды из 41 выявлено превышение уровня вмешательства по радону (60 Бк/л). В среднем активность радона в таких источниках питьевого водоснабжения составляла от 70 до 100 Бк/л, в одном из источников (скважина индивидуального жилого дома в г. Сысерти) активность радона достигала 1350 Бк/л, что является недопустимым с точки зрения ее использования в питьевых целях.

Удаление радона, как наиболее значимого радиоактивного компонента природных вод, можно осуществлять с помощью аэрации, нагревания и сорбции на угольных фильтрах. Показано, что наиболее эффективным методом удаления радона из воды является аэрация (степень удаления – 99,1 % после 2 ч аэрации). Однако методы аэрации и нагревания создают опасность для окружающих, т. к. радиоактивные вещества поднимаются в воздух и в дальнейшем оседают в дыхательных путях человека и в помещении. Сорбция на углях позволяет добиться сопоставимой эффективности (92 %) без эмиссии радона в воздух, поэтому этот метод является наиболее предпочтительным.

Полученные результаты по удалению радона представляют практический интерес с точки зрения радиационной безопасности населения при использовании для питьевых целей подземных источников водоснабжения. В дальнейшем планируется продолжить работу по поиску источников

питьевой воды с повышенным содержанием радона. Кроме того, в настоящее время проводятся работы по определению других радиотоксичных дочерних изотопов рядов урана и тория (в первую очередь  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) в водах с повышенным содержанием радона, т. к. радон может служить косвенным признаком наличия этих радионуклидов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Central Intelligence Agency: The World Factbook – Total renewable total resources [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2201.html>
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 году» [Электр. ресурс]. Режим доступа: [http://www.minpriir.midural.ru/users/государственный\\_доклад\\_экология.pdf.pdf](http://www.minpriir.midural.ru/users/государственный_доклад_экология.pdf.pdf).
3. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. СанПиН 2.1.4.1074-01». М.: Минздрав России, 2002. 62 с.
4. *Shozugawa K., Riebe B., Walther C., Brandl A., Steinhauser G.* Fukushima-derived radionuclides in sediments of the Japanese Pacific Ocean coast and various Japanese water samples (seawater, tap water, and coolant water of Fukushima Daiichi reactor unit 5) // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2016. Vol. 307. P. 1787–1793.
5. *Ochiai S., Ueda S., Hasegawa H., Kakiuchi H., Akata N., Ohtsuka Y., Hisamatsu S.* Spatial and temporal changes of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations derived from nuclear power plant accident in river waters in eastern Fukushima, Japan during 2012–2014 // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2016. Vol. 307. P. 2167–2172.
6. *Pujol LL., Sanchez-Cabeza J.A.* Natural and artificial radioactivity in surface waters of the Ebro river basin (Northeast Spain) // *J. of Environmental Radioactivity*. 2000. Vol. 51. P. 181–210.
7. *León Vintrol L., Mitchell P.I., Omarova A., Burkitbayev M., Jiménez Nápoles H., Priest N.D.* Americium, plutonium and uranium contamination and speciation in well waters, streams and atomic lakes in the Sarzhai region of the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan // *J. of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. P. 308–314.
8. *Erden P.E., Dirican A., Seferinoğlu M., Yeltepe E., Şahin N.K.*  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. P. 159–166.
9. *Chau N.D., Michalec B.* Natural radioactivity in bottled natural spring, mineral and therapeutic waters in Poland // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279. P. 121–129.
10. Бекман И.Н. Радиохимия: курс лекций. М.: МГУ, 2006. 586 с.
11. Семинский К.Ж., Семинский А.К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. Т. 7. № 3. С. 477–493.

12. Lopes I., Vesterbacka P., Kelleher K. Comparison of radon (Rn-222) concentration in Portugal and Finland underground waters // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017. (Article in press) DOI:10.1007/s10967-017-5166-5.
13. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Энергоатомиздат, 2010. 222 с.
14. Чаславскы М., Данихелка П., Кржиж Л., Пашковский И.С., Суханкова Я. Радон в подземных водах как источник риска для здоровья населения // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2010. № 3. С. 270–275.
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.
16. Родники. Портал г. Екатеринбурга. [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://www.ekburg.ru/health/ecology/springs/>
17. Magill J., Pfenning G., Dreher R., Soti Z. Карта нуклидов (Karlsruher Nuclidkarte) – 8th edition. Nucleonica GmbH, 2012.
18. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (в ред. изм. № 1), утв. Постановлением гл. гос. санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43). М.: Энергоатомиздат, 2013. 93 с.

#### 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)

Бетенеков Николай Дмитриевич, д-р хим. 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: [betenekova\\_dina@mail.ru](mailto:betenekova_dina@mail.ru)

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. 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: [a.f.nikiforov@urfu.ru](mailto:a.f.nikiforov@urfu.ru)

Глазырин Сергей Владимирович, студент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Томашова Любовь Алексеевна, студент, 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](mailto:tomashoval@yandex.ru)