

УДК 504.064

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) В ДЕПОНИРУЮЩИХ СРЕДАХ (ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ)

Перевощиков Роман Дмитриевич,
rprevoshnikov@bk.ru

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения радиоактивной нагрузки в зоне влияния объектов горной добычи.

Цель: оценка удельной активности природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в депонирующих средах и анализ их пространственного распределения, а также измерение содержания K^+ в снежном покрове.

Объекты: почвы, донные отложения, снег.

Методы: Измерение удельной активности природных радионуклидов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) в пробах почв и донных отложений проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКС-01А «МУЛЬТИРАД» (Россия). Для обработки гамма-спектров использован программный пакет «Прогресс». Содержание калия в талой воде определено методом капиллярного электрофореза на КАВ «Капель 104».

Результаты. Удельная активность ^{40}K для большинства исследованных проб почв на территории Верхнекамского месторождения солей не превышает среднемировых значений, для проб донных отложений – других территорий с техногенным влиянием. В непосредственной близости от калийного предприятия наблюдается повышенное содержание K^+ в снежном покрове, обусловленное ветровым режимом территории. Миграция исследованных радионуклидов ограничивается зоной 2 км, ионов K^+ – зоной 3 км. Максимальные активности ^{226}Ra и ^{232}Th в исследованных пробах почв существенно ниже среднемировых значений. В почвах исследуемой территории обнаружены зоны с отношением значений активности $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra} < 1$, что служит индикатором техногенного воздействия. Конфигурация этих зон указывает на отсутствие их связи с деятельностью рудоуправления по добыче калийных солей. Полученные результаты могут применяться в радиационном мониторинге горнодобывающих предприятий, а также в экологической оценке с использованием данных радиационных наблюдений.

Ключевые слова:

Почвы, донные отложения, снег, естественные радионуклиды, радий, торий, калий, γ -спектрометр, Верхнекамское месторождение калийных солей.

Введение

Радиоактивное излучение элементов оказывает непрерывное влияние на биохимические и физиологические процессы в живых организмах. Радиоактивные элементы содержатся в горных породах, строительных и бытовых материалах, водах и атмосферном воздухе. Наибольшую роль при этом играют широко распространенные элементы: ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Определенный вклад вносит и космическое излучение. Суммарное воздействие всех природных источников радиоактивного излучения составляет 70–75 % всей радиационной нагрузки на человека. Вклад естественных радионуклидов в общую радиационную нагрузку населения распределяется следующим образом: радон – 54,3 %; горные породы – 15,9 %; продукты питания – 15,5 %; космическое излучение – 13,7 %; прочие источники – 0,6 % [1–3].

Неизбежным следствием разработки месторождений полезных ископаемых является возрастающее влияние техногенных факторов и радиационного загрязнения на основные природные среды [2], санитарно-эпидемиологическую обстановку населенных мест.

На сегодняшний день широко применяют гамма-спектрометрические измерения активности естественных радионуклидов в различных объектах окружающей среды для оценки экологического состояния территорий. Такие исследования активно

проводятся для почв, донных отложений и пляжных песков [4–13], различных отходов [14, 15], особенно активно в угольной отрасли [16–18], пищевой соли [19–22].

В процессе миграции естественные радионуклиды поступают в водные объекты, аккумулируются в почвах, грунтах и донных отложениях, их высокие концентрации могут создавать опасность для человека. Известно, что источниками естественных радионуклидов могут служить как природные объекты – породы с высоким содержанием естественных радионуклидов [23–25], так и техногенные объекты – предприятия по добыче, обогащению и переработке некоторых типов полезных ископаемых (углеводородов, угля, фосфатов, глины, металлические и неметаллические руды) [26, 27]. Внимание исследователей к радиационной обстановке на соляных месторождениях связано с перспективным развитием спелеотерапии [28]. В частности, использование для отделки помещений материалов на основе натуральной калийной соли является известным инструментом создания лечебного эффекта за счет ионизации воздуха [29].

Территория исследования находится на северо-востоке Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. На всех предприятиях подземным способом ведется добыча сильвинита, карналлита, каменной соли и рассолов. За годы активной деятельности на поверхности накопились огромные объемы отходов.

Целью работы является оценка удельной активности природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в депонирующих средах и анализ их пространственного распределения на территории Верхнекамского месторождения калийных солей. В исследуемой группе природных радионуклидов для рассматриваемой территории наибольший интерес представляет ^{40}K . В природе калий представлен одним радиоактивным изотопом ^{40}K (0,0117 %) и двумя стабильными изотопами ^{39}K (93,08 %), ^{41}K (6,91 %) [30]. ^{40}K – это единственный радиоактивный изотоп, который присутствует повсюду на Земле.

С целью дополнительного контроля атмосферической миграции вещества проведен отбор проб снега на прилегающей к рудоуправлению территории с последующим их анализом на содержание ионов калия в талой воде. Изучение снежного покрова широко применяется в практике геоэкологических исследований, так как снег способен накапливать продукты техногенеза, поступающие за счет аэрогенного рассеивания [31–33].

Полученные в данной статье результаты дают полезную информацию об уровне содержания природных радионуклидов в зоне влияния объектов горной добычи и представляют интерес для сравнительной оценки вклада разработки месторождений солей в формирование радиационной обстановки территорий.

Методы

В пределах изучаемого участка калийного месторождения был проведен отбор проб депонирующих сред – почв, донных отложений и снега. Почвенные пробы отбирались по заранее намеченным пунктам на территории в непосредственной близости к горнодобывающему предприятию. Пробы отбирались из верхнего почвенного слоя (интервал 0–0,4 м), всего отобрано 35 проб почв. Донные отложения (6 проб тонкодисперсной фракции) отбирались из ближайших водотоков на прилегающей к предприятию территории. Точки опробования снега намечались с учетом преобладающего направления ветра в непосредственной близости объектов размещения отходов. Отбор снежного покрова (9 проб) производился с помощью весового снегомера ВС-43 с учетом методики [34].

Для проб почв и донных отложений в лабораторных условиях проведены исследования удельной активности природных радионуклидов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th). Для гамма-спектрометрического анализа использовался прибор МКС-01А «МУЛЬТИРАД» (Россия). Для обработки гамма-спектров применяли программный комплекс «Прогресс». Погрешность удельной активности составляла $\pm(20\text{--}30)$ % от измеряемой величины.

Для энергетической калибровки спектрометра использован контрольный источник на основе ^{137}Cs и ^{40}K . Источник представляет собой сосуд Маринелли объемом 1 л, заполненный KCl, закрытый крышкой, в основании которого имеется цилиндрическое углубление, где закреплен источник ^{137}Cs (диск диаметром 29 мм, в центре которого находится активное пятно, герметизированное двумя полиамидными пленками

толщиной по 50 мкм). Активность источника составляет 1500 Бк, погрешность (при доверительной вероятности 0,95) составляет 20 %. На спектре от калибровочного источника гамма-спектрометра отображаются максимумы пиков полного поглощения ^{137}Cs (энергия 662 кэВ) и ^{40}K (энергия 1461 кэВ), скорость счета в определенном энергетическом диапазоне 620–700 кэВ. Для контроля собственных шумов гамма-спектрометрического тракта и учета вклада внешнего гамма-излучения в аппаратный спектр излучения исследуемого образца после проведения калибровки произведено измерение фона (в течение 1800 с). В исследуемых образцах почв и донных отложений перед измерением прокаливанием удалена их органическая часть, образцы были перемешаны и помещены в сосуд Маринелли до отметки 1 л.

Выявление допустимых норм воздействия природных радионуклидов проведено в соответствии с требованиями норм радиационной безопасности и с учетом их биологического влияния на организм человека по расчетной величине удельной эффективной активности Аэфф, которая отражает суммарную удельную активность естественных радионуклидов в исследуемом материале. Формула для ее расчета имеет вид:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,085A_{\text{K}},$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th (Бк/кг), находящиеся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов; A_{K} – удельная активность ^{40}K (Бк/кг).

До начала обильного таяния снега произведен отбор проб снежного покрова. Талую воду пропускали через фильтр «синяя лента» для отделения твердых частиц и растворенной фазы. Для определения K^+ в талой воде использовали метод капиллярного электрофореза на кАВ «Капель 104» [30]. В качестве условного фона была выбрана точка, расположенная в 5 км от действующего рудоуправления.

Построение карт выполнялось при помощи программного комплекса ArcGIS методом интерполяции.

Результаты и их обсуждение

Известно, что верхний слой почв (до 5 см) содержит 95–98 % техногенной активности и является основным компонентом депонирующей природной среды, несущим в себе накопительный эффект многолетнего техногенного воздействия [1, 4, 6, 7, 35–38].

Согласно результатам проведенных исследований почв и донных отложений максимальные значения удельной эффективной активности исследованных природных радионуклидов (диапазон значений 62–88 Бк/кг) наблюдаются в почвах на площадках вблизи рудника и к северо-востоку от него (табл. 1, 2, рис. 1). Полученные контуры распределения удельной эффективной активности исследованных природных радионуклидов соответствуют контурам распределения активности ^{40}K (рис. 2). Сформированная зона более высоких концентраций природных радионуклидов обусловлена ветровым режимом территории исследования, где в течение года преобладают

ветра южного направления. С учетом преобладающего направления ветра здесь происходит значительный вынос веществ с атмосферными потоками в северном и северо-восточном направлениях. Атмохимический перенос подтверждается результатами отбора проб снежного покрова (табл. 3).

Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду ^{40}K [38]. Радиационные исследования керна разведочной скважины демонстрируют высокие значения активности ^{40}K в продуктивных калийных пластах, что обусловлено их минеральным составом. Для рассматриваемого месторождения наиболее высокие значения характерны для пестрых сильвинитов (до 4967 Бк/кг), полосчатых сильвинитов (до 4542 Бк/кг), красных сильвинитов (2055 Бк/кг). В результате для калийных солей удельная эффективная активность составила 499,82 Бк/кг, что не превышает допустимую норму 740 Бк/кг [39].

На рудоуправлении ежемесячно проводится контроль состояния атмосферного воздуха в ряде пунктов на границе санитарно-защитной зоны промышленных объектов. Определяемыми компонентами среди прочих составляющих являются калия хлорид и натрия хлорид. Результаты контроля свидетельствуют об отсутствии превышений предельно-допустимых концентраций (0,3 мг/м³ по KCl, 0,5 мг/м³ по NaCl). С учетом объемов выбросов в атмосферный воздух основное поступление калия хлорида и натрия хлори-

да связано с выбросами сушильного отделения фабрики по производству удобрений.

Согласно полученным результатам, миграция исследованных радионуклидов ограничивается зоной 2 км. Только незначительная часть исследованных проб (8 %) превышает среднемировые активности ^{40}K для почв. В донных отложениях средняя активность ^{40}K не превышает значений по другим территориям с техногенным влиянием. Иная ситуация отмечена по содержанию ^{226}Ra и ^{232}Th , для которых даже максимальные активности в исследованных пробах почв существенно ниже среднемировых значений [38].

По результатам исследования проб снега диапазон измеренных значений содержания в них K^+ составил 0,64–3,33 мг/л при среднем 1,92 мг/л. На участке условного фона, в качестве которого выбран пункт на расстоянии 5 км к северу от рудоуправления, содержание ионов калия составило 0,64 мг/л (табл. 3). Значения средней концентрации K^+ в талых водах исследуемой территории выше значений арктического снега в 10 раз [40], для г. Москвы – в 6,4 раза [41], для г. Березники – в 1,2 раза соответственно [30]. Максимальные значения отмечены в непосредственной близости к действующему рудоуправлению, распределение содержаний демонстрирует атмохимический перенос частиц в северном и северо-восточном направлениях. Зона условно повышенных концентраций, обусловленная ветровым режимом территории, составляет не более 3 км.

Таблица 1. Удельная активность природных радионуклидов в почвах

Table 1. Specific activity of natural radionuclides in soils

Зоны опробования Sampling zones	Активность (Бк/кг)/Activity concentration (Bq/kg)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	Аэфф
до 1 км/up to 1 km	143,3...364,5	3,4...18,2	2,82...10,6	22,36...62,6
1–2 км/1–2 km	123,2...500,0	5,04...19,7	3,0...20,5	16,26...88,0
более 2 км/over 2 km	141,2...195,5	2,17...9,50	2,49...9,06	14,6...36,37
Среднее/Medium	234,91	9,14	7,43	38,55
Макс./Max	500,00	19,70	20,50	88,00
Мин./Min	123,20	2,17	2,49	14,60
Обобщенные данные по миру [42] Summary data for the world [42]	420	32	45	–
Средние значения 2019 г. для почв г. Москвы [43] Average 2019 values for soils in Moscow [43]	442	19	24	90

Таблица 2. Удельная активность природных радионуклидов в донных отложениях

Table 2. Specific activity of natural radionuclides in sediments

Зона опробования Sampling zones	Активность (Бк/кг)/ Activity concentration (Bq/kg)			
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	Аэфф
Севернее от рудоуправления North of the mine site	144,1...314,0	6,61...12,6	6,16...16,8	29,52...61,3
Юго-западнее от рудоуправления Southwest of the mine site	131,2...283,4	2,39...6,42	6,08...8,66	21,51...43,2
Среднее/Medium	236,67	7,52	9,98	41,12
Обобщенные данные по содержанию в осадках озера Карун [44] Summarised data for content in sediments of Lake Karun [44]	410...1426	6,2...22,4	5,2...26,6	–
Средние значения 2019 г. для донных отложений г. Москвы [43] Average 2019 values for sediments in Moscow [43]	279	15	20	66
Обобщенные данные по осадочным породам [45] Summary data for sediments [45]	<300–900	–	<8–50	–

Таблица 3. Содержание ионов калия в снеговых водах территории исследований

Table 3. Potassium ion content in snow water in the study area

Точка опробования Test point	Функциональная зона Functional area	K^+ , мг/л K^+ , mg/l	Коэффициент концентрации относительно условного фона Concentration factor relative to the reference background
Снег 1/Snow 1	Промышленная Industrial	2,59	4,05
Снег 2/Snow 2		3,33	5,20
Снег 3/Snow 3		2,12	3,31
Снег 4/Snow 4		2,92	4,56
Снег 5/Snow 5	Селитебная Residential	1,32	2,06
Снег 6/Snow 6		1,53	2,39
Снег 7/Snow 7		0,96	1,51
Снег 8/Snow 8	Условный фон Conditional background	1,86	2,91
Снег 9/Snow 9		0,64	–
Среднее/Medium	–	1,92	3
Содержание K^+ в арктическом снеге [40] K^+ content in Arctic snow [40]	–	0,18	–
Содержание K^+ в снеге г. Москва [41] K^+ content in snow in Moscow [41]	–	0,3	–
Содержание K^+ в снеге г. Березники [30] K^+ content in snow in Berezniki [30]	–	1,55	–

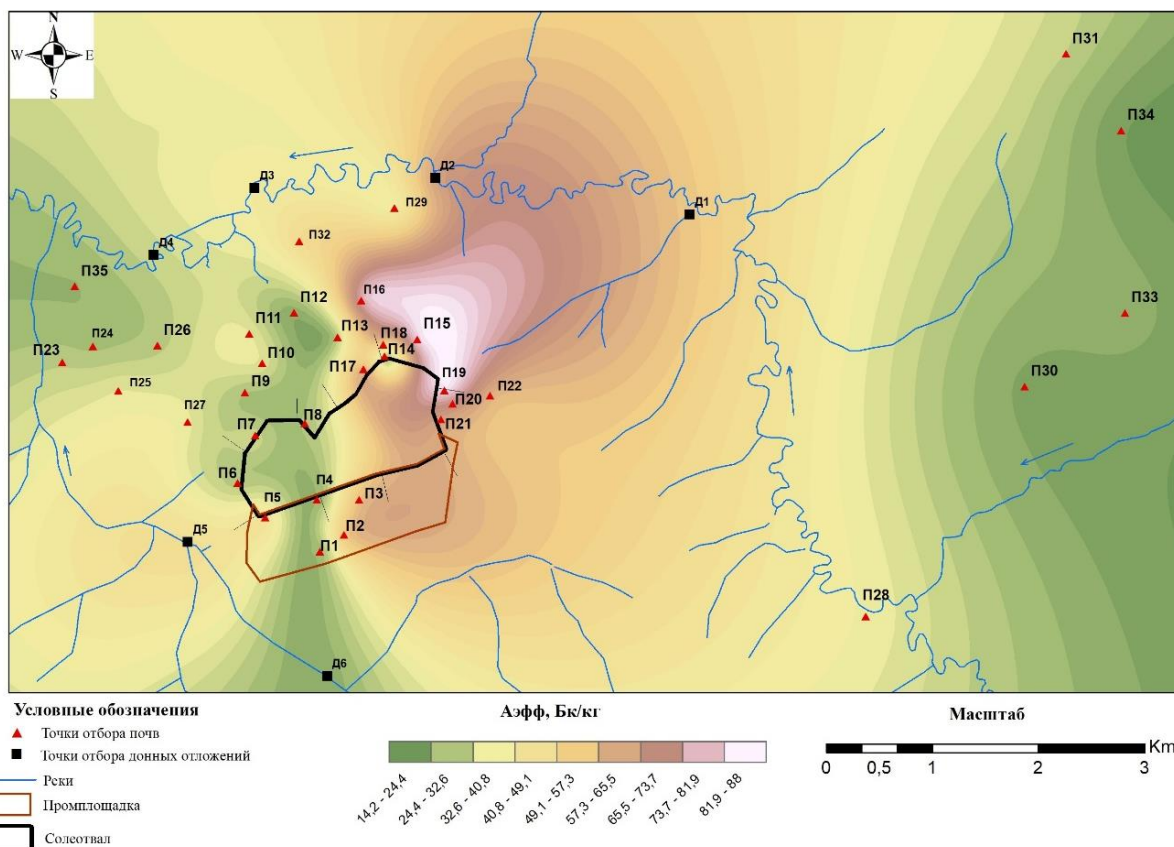


Рис. 1. Удельная эффективная активность природных радионуклидов в почвах и донных отложениях на территории исследования

Fig. 1. Specific effective activity of natural radionuclides in soils and sediments in the study area

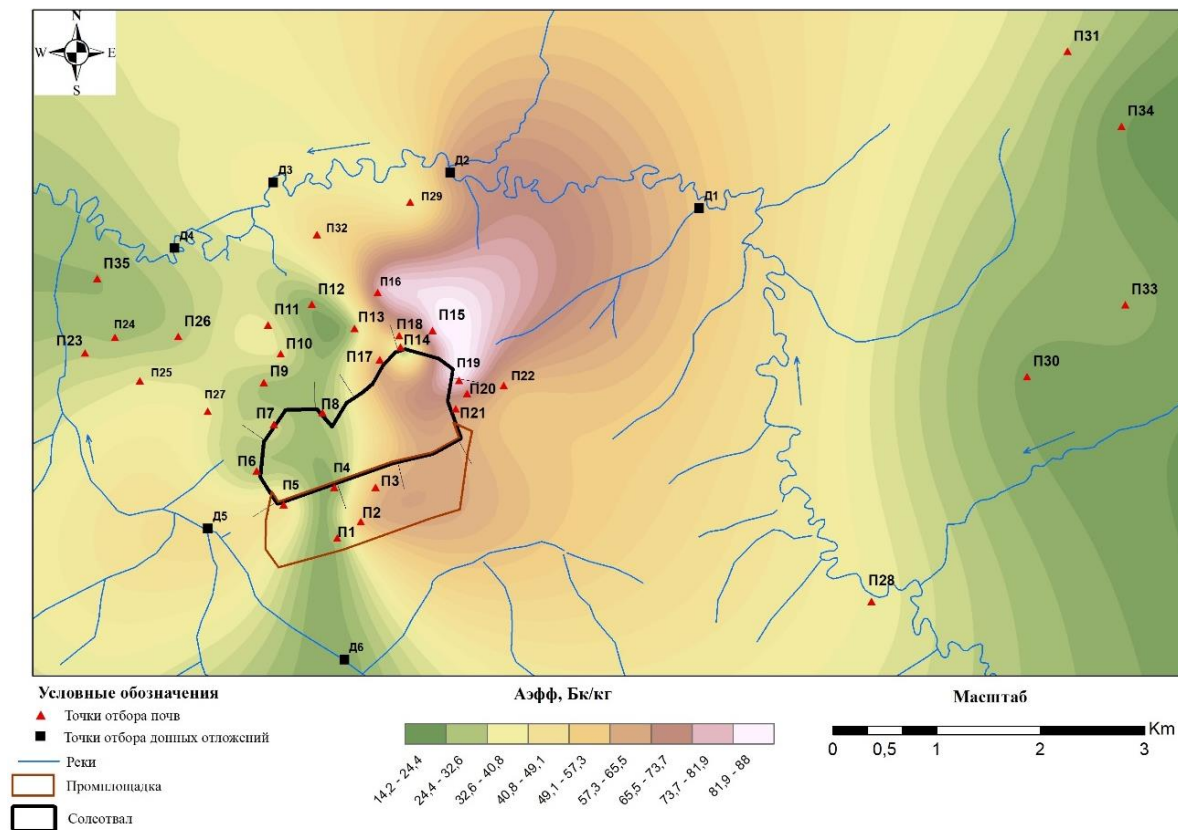


Рис. 2. Удельная активность ^{40}K в почвах и донных отложениях на территории исследования
Fig. 2. Specific activity of ^{40}K in soils and sediments in the study area

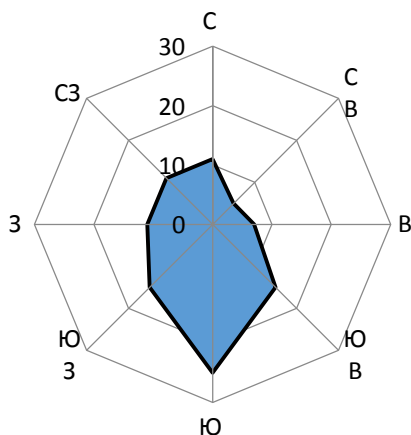


Рис. 3. Роза ветров исследуемой территории
Fig. 3. Wind rose of the study area

Одним из параметров, характеризующих радиационную обстановку территорий, является радиогеохимическая характеристика компонентов окружающей среды Аэфф. Согласно опубликованным исследованиям [46, 47], градация значений Аэфф по уровню опасности характеризуется следующими значениями (в Бк/кг): особо опасный уровень – более 3300; опасный – 1101–3300; потенциально опасный – 101–1100; безопасный – менее 100. Для исследуемой территории среднее значение суммарной удельной активности естественных радионуклидов для почвенного покрова и донных отложений составляет 38,55 и 41,12 Бк/кг соответственно, что соответствует безопасной категории.

Согласно опубликованным данным [48], техногенные почвы по радионуклидному составу отличаются от природных отношением $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra} < 1$. Результаты проведенной оценки для почв территории исследования показали несколько зон, характеризующихся таким отношением изотопов. Конфигурация выделенных зон нарушения равновесия указывает на отсутствие их связи с деятельностью рудоуправления по добыче калийных солей. Предполагаемым источником нарушения равновесия являются разрабатываемые месторождения углеводородов, расположенные к северо-западу и юго-востоку от исследуемой территории на расстоянии 3 и 10 км соответственно. Согласно опубликованным данным, предприятия по добыче углеводородов могут вносить существенный вклад в суммарную радиационную нагрузку территории. Вблизи устьев скважин, в местах скопления нефтешламов, в районе факелов на нефтяных и газовых предприятиях наблюдается повышенный радиационный фон в результате выноса на дневную поверхность целого ряда естественных и антропогенных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr и др.) [50]. Для изотопного состава почв вблизи нефтедобывающих объектов характерно преобладание ^{234}U над ^{238}U , что связано с привносом первыми водами [49–51].

Заключение

На калийных производствах высокую активность в разрабатываемых рудах имеет ^{40}K . Значение этого показателя для большинства исследованных проб

почв на территории Верхнекамского месторождения солей не превышает среднемировых значений. Результаты активности ^{40}K в пробах донных отложений сравнивались со значениями активности на других территориях с техногенным влиянием. Рядом с рудоуправлением наблюдается повышенное содержание K^+ в снежном покрове, обусловленное ветровым режимом территории. Миграция исследованных радионуклидов ограничивается зоной 2 км, ионов K^+ – зоной 3 км. Максимальные активности ^{226}Ra и ^{232}Th в исследованных пробах почв существенно ниже среднемировых значений. По среднему значению Аэфф почвенный покров и донные отложения территории исследования относятся к категории безопасные.

В почвах исследуемой территории обнаружены зоны с отношением значений активности $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra} < 1$, что служит индикатором техногенного

вмешательства. Конфигурация этих зон указывает на отсутствие их связи с деятельностью рудоуправления по добыче калийных солей. Результаты исследования позволяют резюмировать, что подземная разработка месторождения не оказывает влияния на радиационную обстановку исследуемой территории.

Задачей дальнейших исследований является уточнение возможного воздействия на радиационный фон территории объектов нефтедобычи. Полученные результаты могут применяться в радиационном мониторинге горнодобывающих предприятий, а также в экологической оценке с использованием данных радиационных наблюдений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевощиков Р.Д. Радиационная оценка почв на территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды. Сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.П. Штильмарка. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – С. 285–287.
2. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea / N. Mirzoyeva, L. Gulina, S. Gulin, O. Plotitsina, A. Stetsuk, S. Arkhipova, N. Korkishko, O. Eremin // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. – 2015. – V. 33. – № 6. – P. 1413–1425. DOI: 10.1007/s00343-015-4374-5.
3. Маркелов Д.А. Радиоэкологическое состояние территорий (оценка, диагностика, прогнозирование): монография. – М.: Энергия, 2008. – 146 с.
4. Abusini M., Al-Ayasreh K., Al-jundi. Determination of uranium, thorium and potassium activity concentrations in soil cores in Arabavallej, Jordan J // Radiation Protection Dosimetry. – 2008. – V. 128. – Iss. 2. – P. 213–216. DOI: 10.1093/rpd/ncm327.
5. Radioactivity, granulometric and elemental analysis of river sediments samples from the coast of Calabria, south of Italy / F. Caridi, M. D'Agostino, S. Marguccio, A. Belvedere, G. Belmusto, G. Marciano, G. Sabatino, A. Mottese // European Physical Journal Plus. – 2016. DOI: 10.1140/epj/pj2016-16136-1.
6. Singh S., Rani A., Mahajan R.K. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry // Radiation Measurements. – 2005. – V. 39. – Iss. 4. – P. 431–439. DOI: 10.1016/j.radmeas.2004.09.003.
7. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang Granite Area, China / Y.-X. Yang, X.-M. Wu, Z.-Y. Jiang, W.-X. Wang, J.-G. Lu, J. Lin, L.-M. Wang, Y.-F. Hsia // Applied Radiation and Isotopes. – 2005. – V. 63. – Iss. 2. – P. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
8. Monged M.H.E., Hassan H.B., El-Sayed S.A. Spatial distribution and ecological risk assessment of natural radionuclides and trace elements in agricultural soil of northeastern Nile Valley, Egypt // Water, Air, and Soil Pollution. – 2020. – V. 231. – Iss. 7. – P. 338. DOI: 10.1007/s11270-020-04678-9.
9. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia / S. Dragović, B. Gajić, R. Dragović, L. Janković-Mandić, L. Slavković-Bešković, N. Mihailović, M. Momčilović, M. Čujić // Journal of Environmental Monitoring. – 2012. – V. 14. – Iss. 1. – P. 127–137. DOI: 10.1039/c1em10457h.
10. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil / S. Forkapic, J. Vasin, I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, S. Mili // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 166. – P. 104–111. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.003.
11. Measurements of activity concentrations of naturally occurring radionuclides in soil samples from Punjab province of Pakistan and assessment of radiological hazards / S.N.A. Tahir, K. Jamil, J.H. Zaidi, M. Arif, N. Ahmed, S.A. Ahmad // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – V. 113. – Iss. 4. – P. 421–427. DOI: 10.1093/rpd/nch484.
12. Гусева А.С., Устинов С.А., Петров В.А. Распределение природных радионуклидов в почвах на территории Новой Москвы // Известия вузов. Геология и разведка. – 2019. – № 5. – С. 88–94. URL: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2019-5-88-94> (дата обращения 15.08.2021).
13. The ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K activities in beach sand minerals and beach soils of Cox's Bazar, Bangladesh / M.N. Alam, M.I. Chowdhury, M. Kamal, S. Ghose, M.N. Islam, M.N. Mustafa, M.M.H. Miah, M.M. Ansary // Journal of Environmental Radioactivity. – 1999. – V. 46. – Iss. 2. – P. 243–250. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00143-X.
14. Beretka J., Mathew P.J. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products // Health Physics. – 1985. – V. 48. – Iss. 1. – P. 87–95. DOI: 10.1097/00004032-198501000-00007.
15. Characterization of phosphogypsum wastes associated with phosphoric acid and fertilizers production / E.M. El Afifi, M.A. Hilal, M.F. Attallah, S.A. EL-Reefy // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – V. 100. – Iss. 5. – P. 407–412. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.01.005.
16. Радиационные исследования отвалов Кизеловского угольного бассейна / Е.А. Меньшикова, С.М. Блинов, Д.А. Бельшев, Р.Д. Перевощиков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 4 (56). – С. 81–89. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-4-81-89.
17. Radioactivity of dumps in mining areas of the Upper Silesian Coal Basin in Poland / B. Kozłowska, A. Walencik, J. Dorda, W. Zipper // EPJ Web of Conferences 24, 05006. – 2012. DOI: 10.1051/epjconf/20122405006.
18. Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 369–376.
19. Food salt characterization in terms of radioactivity and metals contamination / F. Caridi, M. Messina, A. Belvedere, M. D'Agostino, S. Marguccio, L. Settineri, G. Belmusto // Applied Sciences (Switzerland). – 2019. – V. 9. – Iss. 14. DOI: 10.3390/app9142882.
20. Tahir S.N.A., Alaamer A.S. Determination of natural radioactivity in rock salt and radiation doses due to its ingestion // Journal of Radiological Protection. – 2008. – V. 28. – Iss. 2. – P. 233–236. DOI: 10.1088/0952-4746/28/2/N01.
21. El-Bahi S.M. Radioactivity levels of salt for natural sediments in the northwestern desert and local markets in Egypt // Applied Radiation and Isotopes. – 2003. – V. 58. – Iss. 1. – P. 143–148. DOI: 10.1016/S0969-8043(02)00270-1.
22. Hañerliogullari A., Eyüboğlu K. Natural radionuclide and toxic metal contents of rock salts from mines in Central Anatolia of Turkey // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2020. DOI: 10.1080/03067319.2020.1814264.

23. Natural radionuclides and hazards of rock samples collected from Southeastern Nigeria / E.O. Joshua, J.A. Ademola, M.A. Akpanowo, O.A. Oyebanjo, D.O. Olorode // *Radiation Measurements*. – 2009. – V. 44. – Iss. 4. – P. 401–404. DOI: 10.1016/j.radmeas.2009.04.002
24. Natural radionuclides in clay deposits: concentration and dose assessment / A.E.M. Khater, L.H. Al-Mobark, A.A. Aly, A.M. Al-Omran // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2013. – V. 156. – Iss. 3. – P. 321–330. DOI: 10.1093/rpd/nct064.
25. Srinivasa E., Rangaswamy D.R., Sannappa J. Assessment of radiological hazards and effective dose from natural radioactivity in rock samples of Hassan district, Karnataka, India // *Environmental Earth Sciences*. – 2019. – V. 78. – Iss. 14. DOI: 10.1007/s12665-019-8465-z.
26. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. IAEA, International Atomic Energy Agency – Technical Report. – Vienna: IAEA Library Cataloguing in Publication Data, 2003. – P. 1–3.
27. Evaluation of the radioactive pollution in the salt-marshes under a phosphogypsum stack system / J.L. Guerrero, I. Gutiérrez-Álvarez, F. Mosqueda, M.J. Gázquez, R. García-Tenorio, M. Ollas, J.P. Bolívar // *Environmental Pollution*. – 2020. – V. 258. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113729.
28. Indoor radon levels and natural radioactivity in Turda salt mine, Romania / M.R. Calin, M.A. Calin, G. Simionca, O. Mera // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2012. – V. 292. – Iss. 1. – P. 193–201. DOI: 10.1007/s10967-011-1394-2.
29. Черный К.А. Параметры ионизирующих излучений калийных солей и закономерности их пространственного изменения // *Горный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 75–80. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.16
30. Черный К.А. Закономерности проявления и оценка основных параметров ионизирующего действия калийных солей // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2018. – № 4. – С. 115–126.
31. Хайрулина Е.А., Ушакова Е.С. Особенности формирования макрокомпонентного состава снежного покрова в крупном центре калийной промышленности г. Березники // *Проблемы региональной экологии*. – 2020. – № 3. – С. 28–38.
32. Ушакова Е.С., Пузик А.Ю., Караваева Т.И. Оценка микроэлементного состава снежного покрова Березниковского городского округа (Пермский край) // *Географический вестник*. – 2020. – № 2 (53). – С. 130–140.
33. О составе снега на территории Верхнекамского солевого месторождения / С.М. Блинов, Е.А. Меньшикова, Е.Н. Батурин, Е.С. Ушакова, Л.Р. Золотарев // *Лёд и снег*. – 2015. – Т. 55. – № 1. – С. 121–128.
34. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Минздрав СССР, 1991. – 695 с.
35. Уран и торий в почвенном покрове Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье) / В.И. Гребенщикова, П.П. Грицко, П.В. Кузнецов, А.А. Дорошков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 93–104.
36. Перевощиков Р.Д., Бельшев Д.А., Золотарев Л.Р. Радиационная оценка объектов окружающей среды на территории Верхнекамского месторождения калийных солей // *Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы*. VI Международная научно-практическая конференция. – Севастополь, 2019. – С. 130–133.
37. Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Перевощиков Р.Д. Естественные радионуклиды в отвалах Кизеловского угольного бассейна // *Экологические проблемы. Взгляд в будущее: Сборник трудов IX международной научно-практической конференции*. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет. Институт наук о Земле, 2020. – С. 433–437.
38. Concentrations of Natural Radionuclides (⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) at the Potash Salts Deposit / E.A. Menchikova, R.D. Perevoshchikov, P.A. Belkin, S.M. Blinov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2021. – V. 22. – Iss. 3. – P. 179–187. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/132544> (дата обращения 15.08.2021).
39. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
40. Chemical composition of arctic snow: concentration levels and regional distribution of major elements / P. Caritat, G.E.M. Hall, S. Gislason, W. Belsey // *Science of The Total Environment*. – 2005. – V. 336 (1–3). – P. 183–199.
41. Еремина И.Д., Григорьев А.В. Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмосковье за период 1999–2006 гг. // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2010. – № 3. – С. 55–60.
42. UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. – New York: United Nations publication, 2000. – 659 p.
43. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 году. Ежегодник / под ред. коллегий: В.М. Шершаков, В.Г. Булгаков, И.И. Крышев, С.М. Вакуловский, М.Н. Каткова, А.И. Крышев. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2020. – 51 с.
44. Amin Rafat M. Radioactivity levels in some sediments and water samples from Qarun Lake by low-level gamma spectrometry // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. – 2015. – V. 4. – Iss. 2. – P. 619–625.
45. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, atmospheric, and aquatic natural radioactivity // *Radioactivity in the Environment*. – 2010. – V. 17. – P. 29–85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
46. Хайкович И.М., Мац Н.А., Харламов М.Г. Классификация месторождений твердых полезных ископаемых // *Региональная геология и металлогения*. – 1999. – № 8. – С. 131–140.
47. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозекологии. – Томск: STT, 2009. – 429 с.
48. Грицко П.П. Распределение тория, урана и ¹³⁷CSv почвах городов Иркутск и Ангарск (Прибайкалье): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2018. – 23 с.
49. Гашев С.Н., Моисеенко Т.И. Тяжелые металлы и радионуклиды как фактор риска для биоты в экологическом мониторинге Тюменской области // *Вестник Тюменского государственного университета*. – 2012. – № 12. – С. 26–37.
50. Влияние факелов на биогеоценозы Среднего Приобья / С.Н. Гашев, М.Н. Казанцева, А.В. Соромотин, А.В. Рыбин // *Бюллетень МОИП*. – 1994. – Т. 99. – № 1. – С. 3–7.
51. Состояние окружающей среды и природных ресурсов в Нижневартовском районе: 1996 г. Отчет. – Нижневартовск: Би, 1997. – Вып. 1. – С. 1–75.

Поступила 02.09.2021 г.

Информация об авторах

Перевощиков Р.Д., ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 504.064

NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDES (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) IN THE ENVIRONMENT (VERKHNEKAMSKOE DEPOSIT OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS)

Roman D. Perevoshchikov,
rperevoshchikov@bk.ru

Perm State National Research University,
4, Genkel street, Perm, 614068, Russia.

The relevance of the research stems from the need to study the radioactive load in the zone of influence of mining objects.

Objective: assessment of specific activity of natural radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in depositing media and analysis of their spatial distribution, as well as measurement of K^+ content in snow cover.

Objects: soils, bottom sediments, snow.

Methods. Measurements of specific activity of natural radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) in samples of soils and bottom sediments were performed using MULTIRAD scintillation gamma spectrometer MKS-01A (Russia). Gamma-spectra were processed using programs included in the Progress package. K^+ was determined in melted water by capillary electrophoresis on KAB «Kapel 104».

Results. The specific activity ^{40}K for the majority of investigated soil samples on the territory of the Verkhnekamskoe salt deposit does not exceed average world values, for samples of bottom sediments – for other territories with anthropogenic influence. In the immediate vicinity of the potassium enterprise, increased K^+ content in the snow cover is observed due to the wind regime of the territory. Migration of the investigated radionuclides is limited to the zone of 2 km, K^+ ions – to the zone of 3 km. The maximum activities of ^{226}Ra and ^{232}Th in the investigated soil samples are significantly lower than the world average values. Zones with a ratio of $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$ activity values <1 in soils were found, which serves as an indicator of technogenic interference. The configuration of these zones indicates that they are not related to the activities of the potassium salt mine. The results obtained can be applied in radiation monitoring of mining enterprises, as well as in environmental assessment using the data of radiation observations.

Key words:

Soils, bottom sediments, snow, natural radionuclides, radium, thorium, potassium, γ -spectrometer, Verkhnekamskoe potassium salt deposit.

The research was financially supported by the Perm Scientific and Educational Centre for Rational Subsoil Use, 2021.

REFERENCES

- Perevoshchikov R.D. Radiatsionnaya otsenka pochv na territorii Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynnykh soley [Radiation assessment of soils on the territory of Verkhnekamskoe potassium salt deposit]. *Ekologicheskaya bezopasnost v usloviyakh antropogennoy transformatsii prirodnoy sredy. Sbornik materialov vserossiyskoy shkoly-seminara, posvyashchennoy pamyati N.F. Reymersa i F.R. Stilmarka* [Ecological safety in conditions of anthropogenic transformation of natural environment. Materials of All-Russian School-Seminar in Memory of N.F. Reimers and F.R. Stilmark]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2021. pp. 285–287.
- Mirzoyeva N., Gulina L., Gulina S., Plotitsina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015. vol. 33, no. 6, pp. 1413–1425. DOI: 10.1007/s00343-015-4374-5.
- Markelov D.A. *Radioekologicheskoe sostoyanie territoriy (otsenka, diagnostika, prognozirovaniye)*. Monografiya [Radioecological condition of territories (estimation, diagnostics, forecasting)]. Moscow, Energiya Publ., 2008. 146 c.
- Abusini M., Al-Ayasreh, K., Al-jundi. Determination of uranium, thorium and potassium activity concentrations in soil cores in Araba valley, Jordan. *Radiation Protection Dosimetry*, 2008, vol. 128, Iss. 2, pp. 213–216. DOI: 10.1093/rpd/ncm327.
- Caridi F., D'Agostino M., Marguccio S., Belvedere A., Belmusto G., Marciano G., Sabatino G., Mottese A. Radioactivity, granulometric and elemental analysis of river sediments samples from the coast of Calabria, south of Italy. *European Physical Journal Plus*, 2016, vol. 131, Iss. 5, art. no. 136. DOI: 10.1140/epjp/i2016-16136-1.
- Singh S., Rani A., Mahajan R.K. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *Radiation Measurements*, 2005, vol. 39, Iss. 4, pp. 431–439. DOI: 10.1016/j.radmeas.2004.09.003
- Yang Y.-X., Wu X.-M., Jiang Z.-Y., Wang W.-X., Lu J.-G., Lin J., Wang L.-M., Hsia Y.-F. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang granite area, China. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, vol. 63, Iss. 2, pp. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
- Monged M.H.E., Hassan H.B., El-Sayed S.A. Spatial distribution and ecological risk assessment of natural radionuclides and trace elements in agricultural soil of northeastern Nile Valley, Egypt. *Water, Air, and Soil Pollution Volume*, 2020, vol. 231, Iss. 7, pp. 338. DOI: 10.1007/s11270-020-04678-9.
- Dragović S., Gajić B., Dragović R., Janković-Mandić L., Slavković-Beškoski L., Mihailović N., Momčilović M., Čujić M. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia. *Journal of Environmental Monitoring Volume*, 2012, vol. 14, Iss. 1, pp. 127–137. DOI: 10.1039/c1em10457h.
- Forkapic S., Vasin J., Bikit I., Mrdja D., Bikit K., Milić S. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, Iss. 1, pp. 104–111. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.003.
- Tahir S.N.A., Alaamer A.S. Determination of natural radioactivity in rock salt and radiation doses due to its ingestion. *Journal of Radiological Protection Volume*, 2008, vol. 28, Iss. 2, pp. 233–236. DOI: 10.1088/0952-4746/28/2/N01.
- Guseva A.S., Ustinov S.A., Petrov V.A. Distribution of natural radionuclides in soils on the territory of New Moscow. *Izvestiya vuzov. Geology and Exploration*, 2019, no. 5, pp. 103–113. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2019-5-88-94> (accessed 15 August 2021).
- Alam M.N., Chowdhury M.I., Kamal M., Ghose S., Islam M.N., Mustafa M.N., Miah M.M.H., Ansary M.M. The ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K activities in beach sand minerals and beach soils of Cox's Bazar, Bangladesh. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1999, vol. 46, Iss. 2, pp. 243–250. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00143-X.
- Beretka J., Mathew P.J. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics*, 1985, vol. 48, Iss. 1, pp. 87–95. DOI: 10.1097/00004032-198501000-00007.

15. El Afifi E.M., Hilal M.A., Attallah M.F., EL-Reefy S.A. Characterization of phosphogypsum wastes associated with phosphoric acid and fertilizers production. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, Iss. 5, pp. 407–412. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.01.005
16. Menshikova E.A., Blinov S.M., Belyshev D.A., Perevoshchikov R.D. Radiation studies of Kizelovsky coal basin dumps. *Proceedings of Ural State Mining University*, 2019, vol. 4, Iss. 56, pp. 81–89. In Rus. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-4-81-89.
17. Kozłowska B., Walencik A., Dorda J., Zipper W. Radioactivity of dumps in mining areas of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *EPJ Web of Conferences* 24, 05006, 2012. DOI: 10.1051/epjconf/20122405006.
18. Krylov D.A., Sidorova G.P. Assessment of content of radioactive elements in coals and products of their combustion. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. 7, pp. 369–376. In Rus.
19. Caridi F., Messina M., Belvedere A., D'Agostino M., Marguccio S., Settineri L., Belmusto G. Food salt characterization in terms of radioactivity and metals contamination. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, vol. 9, Iss. 14. DOI: 10.3390/app9142882.
20. Tahir S.N.A., Alaamer A.S. Determination of natural radioactivity in rock salt and radiation doses due to its ingestion. *Journal of Radiological Protection*, 2008, vol. 28, Iss. 2, pp. 233–236. DOI: 10.1088/0952-4746/28/2/N01.
21. El-Bahi S.M. Radioactivity levels of salt for natural sediments in the northwestern desert and local markets in Egypt. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, vol. 58, Iss. 1, pp. 143–148. DOI: 10.1016/S0969-8043(02)00270-1.
22. Hancıoğlu A., Eyiüboğlu K. Natural radionuclide and toxic metal contents of rock salts from mines in Central Anatolia of Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020. DOI: 10.1080/03067319.2020.1814264.
23. Joshua E.O., Ademola J.A., Akpanowo M.A., Oyebanjo O.A., Olorode D.O. Natural radionuclides and hazards of rock samples collected from Southeastern Nigeria. *Radiation Measurements*, 2009, vol. 44, Iss. 4, pp. 401–404. DOI: 10.1016/j.radmeas.2009.04.002
24. Khater A.E.M., Al-Mobark L.H., Aly A.A., Al-Omran A.M. Natural radionuclides in clay deposits: concentration and dose assessment. *Radiation Protection Dosimetry*, 2013, vol. 156, Iss. 3, pp. 321–330. DOI: 10.1093/rpd/nct064.
25. Srinivasa E., Rangaswamy D.R., Sannappa J. Assessment of radiological hazards and effective dose from natural radioactivity in rock samples of Hassan district, Karnataka, India. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, Iss. 14. DOI: 10.1007/s12665-019-8465-z.
26. *Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation*. IAEA, International Atomic Energy Agency. Technical Report. Vienna, IAEA Library Cataloguing in Publication Data, 2003. pp. 1–3.
27. Guerrero J.L., Gutiérrez-Álvarez I., Mosqueda F., Gázquez M.J., García-Tenorio R., Ollas M., Bolívar J.P. Evaluation of the radioactive pollution in the salt-marshes under a phosphogypsum stack system. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 258. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113729.
28. Calin M.R., Calin M.A., Simionca G., Mera O. Indoor radon levels and natural radioactivity in Turda salt mine, Romania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, vol. 292, Iss. 1, pp. 193–201. DOI: 10.1007/s10967-011-1394-2.
29. Cherny K.A. Parameters of ionizing radiation of potassium salts and patterns of their spatial changes. *Mining Journal*, 2019, no. 1, pp. 75–80. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.16
30. Khairulina E.A., Ushakova E.S. Peculiarities of formation of macro-component composition of snow cover in the large centre of potash industry Berezniki. *Problems of Regional Ecology*, 2020, no. 3, pp. 28–38. In Rus.
31. Cherny K.A. Regularities of manifestation and estimation of main parameters of ionizing action of potassium salts. *Proceedings of Tula State University. Earth sciences*, 2018, no. 4, pp. 115–126. In Rus.
32. Ushakova E.S., Puzik A.Y., Karavaeva T.I. Evaluation of the microelement composition of snow cover in Berezniki urban district (Perm Region). *Geographical Bulletin*, 2020, no. 2 (53), pp. 130–140. In Rus.
33. Blinov S.M., Menshikova E.A., Baturin E.N., Ushakova E.S., Zolotarev L.R. On the composition of snow in the Verkhnekamskoe salt field. *Ice and Snow*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 121–128. In Rus.
34. *RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [Guidance document 52.04.186-89. Guidelines for Atmospheric Pollution Control]. Moscow, USSR State Committee on Hydrometeorology, USSR Ministry of Health Publ., 1991. 695 p.
35. Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P., Kuznetsov P.V., Doroshkov A.A. Uranium and thorium in soil cover of Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7. pp. 93–104. In Rus.
36. Perevoshchikov R.D., Belyshev D.A., Zolotarev L.R. Radiatsionnaya otsenka obyektov okruzhayushchey sredy na territorii Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley [Radiation assessment of environmental objects on the territory of Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regionalnye problemy* [VI International Scientific and Practical Conference. Environmental geology: theory, practice and regional problems]. Sevastopol, 2019. pp. 130–133.
37. Menshikova E.A., Blinov S.M., Perevoshchikov R.D. Estestvennye radionuklidy v otvalakh Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Natural radionuclides in dumps of Kizelovsky coal basin]. *Vzglyad v budushchee. Sbornik trudov IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological problems. Glance into Future. Collection of IX International Scientific and Practical Conference]. Rostov-on-Don, Taganrog, Southern Federal University. Institute of Earth Sciences Publ., 2020. pp. 433–437.
38. Menshikova E.A., Perevoshchikov R.D., Belkin P.A., Blinov S.M. Concentrations of Natural Radionuclides (⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) at the Potash Salts Deposit. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, vol. 22, Iss. 3, pp. 179–187. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/132544> (accessed 15 August 2021).
39. *SanPiN 2.6.1.2523-09. Normy radiatsionnoy bezopasnosti* [Sanitary rules and regulations 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2009. 100 p.
40. Caritat P., Hall G.E.M., Gislason S., Belsey W. Chemical composition of arctic snow: Concentration levels and regional distribution of major elements. *Science of The Total Environment*, 2005, vol. 336 (1–3), pp. 183–199.
41. Eremina I.D., Grigoryev A.V. Acidity and chemical composition of snow cover in Moscow and Moscow region for the period 1999–2006. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2010, no. 3, pp. 55–60. In Rus.
42. UNSCEAR (2000) *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes*. New York, United Nations Publ., 2000. 659 p.
43. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2019 godu* [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighbouring States in 2019]. Obninsk, FGBU NPO Typhoon Publ., 2020. 51 p.
44. Amin Rafat M. Radioactivity levels in some sediments and water samples from Qarun Lake by low-level gamma spectrometry. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4, Iss. 2, pp. 619–625.
45. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, atmospheric, and aquatic natural radioactivity. *Radioactivity in the Environment*, 2010, vol. 17, pp. 29–85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
46. Khaykovich I.M., Mats N.A., Kharlamov M.G. Klassifikatsiya mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopayemykh [Classification of solid mineral deposits]. *Regional geology and metallogeny*, 1999, no. 8, pp. 131–140.
47. Rikhvanov L.P. *Radioaktivnye elementy v okruzhayushchey srede i problemy radioekologii* [Radioactive elements in the environment and problems of radioecology]. Tomsk, 2009. 429 p.
48. Gritsko P.P. *Raspredelenie toriya, urana i ¹³⁷CS v pochvakh gorodov Irkutsk i Angarsk (Pribaykalye)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Distribution of thorium, uranium and ¹³⁷CS in the soils of the cities of Irkutsk and Angarsk (Baikal region). Cand. Diss. Abstract]. Irkutsk, 2018. 23 p.
49. Gashev S.N., Moiseenko T.I. Tyazhelye metally i radionuklidy kak faktor riska dlya bioty v ekologicheskom monitoringe Tyu-

- menskoy oblasti [Heavy metals and radionuclides as a risk factor for biota in ecological monitoring of Tyumen region]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 12, pp. 26–37.
50. Gashev S.N., Kazantseva M.N., Soromotin A.V., Rybin A.V. Vliyanie fakelov na biogeotsenozy Srednego Priobya [Impact of flares on biogeocenoses of Middle Priobye]. *Byulleten MOIP*, 1994, vol. 99, no. 1, pp. 3–7.
51. *Sostoyanie okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov v Nizhneartovskom rayone: 1996 g.* [State of the environment and natural resources in Nizhneartovsk district: 1996]. Nizhneartovsk, 1997. Iss. 1, 75 p.

Received: 2 September 2021.

Information about the authors

Roman D. Perevoshchikov, leading engineer, Perm State National Research University.