

## Влияние добывающих и топливно–энергетических предприятий на радиационный фон территорий

Р.Д. Перевощиков<sup>1</sup>, А.А. Перевощикова<sup>1,2</sup>, Е.А. Меньшикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Естественнаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Факультет химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

*В настоящем обзоре представлена информация о радиационном фоне территорий в зоне влияния добывающих и топливно–энергетических предприятий. С развитием горнодобывающей деятельности происходит увеличение поступления естественных радионуклидов из недр. Многие радионуклиды и металлы, которые переносятся на значительные расстояния от предприятий потоками воздуха, поверхностными и грунтовыми водами, накапливаются в почвах, грунтах и донных отложениях прилегающих территорий. В данной работе представлен обзор удельной активности естественных радионуклидов для территорий разработки калийных, фосфатных, углеводородных и угольных месторождений. Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду <sup>40</sup>K. Согласно полученным результатам, миграция исследованных радионуклидов ограничивается зоной 2 км. Только незначительная часть исследованных проб (8%) превышает среднемировые активности <sup>40</sup>K для почв. В донных отложениях средняя активность <sup>40</sup>K не превышает значений по другим территориям с техногенным влиянием. Ежегодно во всем мире потребляется более 30 млн т фосфорных удобрений, применение которых увеличивает производство сельскохозяйственных культур. Удельная активность урана в фосфатах колеблется от 37 до 4900 Бк/кг для <sup>238</sup>U и от 100 до 10 000 Бк/кг для <sup>226</sup>Ra. Величину радиоактивности нефти, газа и пластовых вод оценивают через определение активности <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th. Согласно опубликованным данным, вблизи устьев скважин, в местах скопления нефтешламов, в районе факелов на нефтяных и газовых предприятиях наблюдается повышенный радиационный фон в результате выноса на поверхность <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и др. Источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются и угледобывающие предприятия, на которых вместе с углём из недр поступает большое количество естественных радионуклидов (<sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th). В работе представлена средняя активность естественных радионуклидов в углях некоторых угольных месторождений мира. По мере развития добывающего и топливно–энергетического комплексов происходит активный вынос на дневную поверхность вместе с минеральным сырьем естественных радионуклидов <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U, что приводит к возрастанию радиационного фона и требует внимания к этим изотопам в программах мониторинга окружающей среды.*

**Ключевые слова:** естественные радионуклиды, добывающие предприятия, топливно–энергетические предприятия, мониторинг окружающей среды.

### Введение

С XX в. технический прогресс сопровождался извлечением из недр огромных масс минерального сырья (нефти, олова, свинца, серебра, цинка, ртути, сурьмы, алмазов и др.) в количестве свыше 90–95% от общей добычи за всю историю человечества. Добыча природного газа, бокситов, руд никеля, молибдена, вольфрама и многих других видов минерального сырья была начата в промышленных масштабах лишь в XX столетии. Особенно стремительное изъятие запасов всех видов минерального сырья произошло в мире, в том числе на территории бывшего СССР, в период 1961–1980-х гг. [1].

Активное развитие атомной энергетики, для которой используется уран, берет свое начало со второй половины XX в. По состоянию на октябрь 2021 г. в мире действовало 437 коммерческих атомных реакторов в 32 странах с общей мощностью 378,04 ГВт, в том числе в России 37 реакторов общей мощностью 29,5 ГВт [2]. Ожидается, что мировой спрос на энергию вырастет более чем на 50% к 2040 г. Масштабы и последствия извлечения такого объема природных ресурсов становятся предметом многочисленных исследований во всем мире [3], поскольку в результате активного развития горнопромышленной и промышленной отрасли возникают процессы, которые

**Перевощиков Роман Дмитриевич**

Естественнаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета

Адрес для переписки: 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru

негативно влияют на окружающую среду и здоровье населения. В частности, по мере развития горнодобывающей деятельности вместе с минеральным сырьем из недр происходит поступление естественных радионуклидов [4, 5].

Естественный радиоактивный фон территории обусловлен космическим излучением, а также наличием радиоактивных элементов в земной коре, гидросфере и атмосфере. Природные радионуклиды присутствуют в различных объектах окружающей среды – воде, почвах, донных отложениях и горных породах. Они изначально входят в их химический состав, в результате чего формируется радиоактивный фон для живых организмов. Среди радиоактивных изотопов естественного происхождения, которые присутствуют в различной специфической активности в окружающей среде, наиболее распространены и важными с экологической позиции являются  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  [6–8].

Помимо природных источников радионуклидов, на долю которых приходится около 85% от годового ионизирующего излучения, получаемого населением (WNA, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), 2014), воздействие на окружающую среду оказывает и антропогенная деятельность, такая как ядерные аварии и испытания, добыча полезных ископаемых, промышленная деятельность и агрохимикаты, используемые в сельском хозяйстве [9].

Горнодобывающая деятельность способствует увеличению радиоактивного фона территорий, поскольку она ускоряет миграцию элементов из минералов и горных пород в окружающую среду [10]. Естественные радионуклиды (ЕРН), особенно образующиеся в результате распада уран-ториевого ряда, могут со временем выщелачиваться из отходов горной добычи и поступать в водные объекты, почвенный покров прилегающих территорий, представлять угрозу для источников питьевого водоснабжения [11]. Другими потенциальными путями воздействия являются процессы рассеивания пыли и биоаккумуляция радиоактивных элементов через пищевую цепь [7, 8, 9, 12].

Радиоактивный фон от первичных радионуклидов, таких как  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , в почве, воде, горных породах, составляет около 80% от общей дозы радиации, получаемой человеком за год [13]. При этом главную роль в формировании радиоактивного фона окружающей среды играет почва, поскольку она выступает одновременно объектом аккумуляции и средством транспортировки радионуклидов в биологические системы.

Почва является компонентом экосистемы и состоит из различных органических и минеральных веществ. Это гетерогенная, дисперсная и пористая система, что делает ее поглотителем различных веществ и соединений [14]. Этим объясняется накопление радиоактивных элементов в почве. Содержание радионуклидов в почве в основном зависит от совокупности следующих факторов – генетического типа ландшафта и его геоморфологической характеристики, производственной мощности горнодобывающего предприятия, климатических и орографических особенностей территории, которые определяют неравномерное распределение ЕРН по земной поверхности [15, 16, 17].

Наибольшую нагрузку на окружающую среду и дозовую нагрузку на человека при разработке нерадиоак-

тивного сырья оказывают объекты добычи, переработки и использования фосфоритов, калийных руд, угля, редкоземельных руд, в том числе титан-урановых россыпей и нефтяных месторождений.

Рудничная пыль и воды, пыль и аэрозоли хвостохранилищ обогатительных фабрик и гидрометаллургических заводов выносят в окружающую среду многие радионуклиды и металлы, которые переносятся поверхностными и грунтовыми водами, потоками воздуха на значительные расстояния, формируя радиоактивный фон прилегающих территорий [18].

Радиоактивное загрязнение природной среды может быть связано с присутствием естественных радиоактивных элементов (U, Th, K) и продуктов их распада в технических, минеральных водах, рассолах нефтегазоносных районов. Разливы таких вод приводят к изменению радиоактивного фона больших площадей, на которых экспозиционная доза гамма-излучения может превышать 8000 мкР/ч [19]. Радиоактивная обстановка в районах добычи углеводородного сырья еще более осложняется в тех случаях, когда в целях повышения нефтеотдачи в пределах месторождений проводились подземные ядерные взрывы.

При освоении урановых месторождений в окружающую среду поступают радионуклиды 3 радиоактивных семейств –  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , но общая радиоактивность в основном обусловлена семейством  $^{238}\text{U}$ . Отличительной особенностью уранодобывающей промышленности от любой другой горнодобывающей отрасли является повышенная радиоактивность ее отходов. Твердые отходы урановых рудников и карьеров представляют собой пустые породы (с фоновой или близкой к ней радиоактивностью), забалансовые урановые руды, отвалы хвостов радиометрической сортировки руд, неиспользуемые попутно добываемые полезные ископаемые, хвосты кучного выщелачивания [18].

К другим предприятиям, на которых формируются отходы с повышенным содержанием ЕРН, относятся предприятия, в той или иной степени связанные с обращением с минеральным сырьем, – горнодобывающие, нефтегазодобывающие, обогатительные и перерабатывающие, использующие минеральные природные воды. Отходы предприятий каждой отрасли имеют свои характерные особенности, которые определяются, наряду с удельной активностью ЕРН в добываемых и/или используемых материалах, технологическими особенностями производства и его мощностью. Радиационная опасность производственных отходов для населения и окружающей среды определяется их физико-химическими характеристиками – радионуклидным составом и удельной активностью ЕРН, интенсивностью радонотделения, степенью выщелачивания, интенсивностью и возможностью миграции радионуклидов из мест хранения отходов.

В научной литературе существует множество результатов частных исследований по радиоактивной обстановке на месторождениях, но, несмотря на глубокую изученность влияния различных месторождений на окружающую среду, до сих пор редкостью является информация о радиоактивной обстановке на этих территориях. В данной работе представлены эти сведения для углеводородных, фосфатных, калийных и угольных месторождений.

**Цель исследования** – обобщение и анализ воздействия на радиационную обстановку производственной деятельности добывающих и топливно-энергетических предприятий. В данной статье представлен анализ результатов более 100 опубликованных работ.

### Естественная радиоактивность при добыче калийных солей

Горнодобывающая деятельность влечет за собой различные экологические последствия [20, 21], в том числе она рассматривается как один из источников поступления ЕРН в окружающую среду. Сырьем для производства калийных удобрений является калийная руда (рис. 1). В настоящее время в мировой практике добыча калийных и калийно-магниевых солей ведется подземным горным (шахтным) способом на 69 объектах, которые производят 85% общего объема калийных удобрений [22].

Удобрения являются ключевым фактором в поддержании мирового сельскохозяйственного производства для обеспечения населения продуктами питания. Удобрения поставляют питательные вещества, необходимые растениям для нормального роста, развития и здоровья. Для роста растений в больших количествах требуются 3 основных питательных вещества: азот, фосфор и калий [23].

Крупнейшие в мире месторождениями калийных солей являются Саскачеванское (Канада), Верхнекамское (Россия) и Старобинское (Республика Беларусь) [20]. Значительные запасы калийных солей расположены в США, Германии, Англии и Китае [24]. Новые месторождения калийных солей были открыты в Центральной и Юго-Восточной Азии, Южной Америке, Западной и Восточной Африке, планируются к освоению ранее не разрабатывавшиеся эвапоритовые месторождения в Северной Америке [20, 25].

Разработка крупных калийных месторождений в мире началась с открытия Верхнекамского месторождения (Соликамский бассейн) в 1925 г. и Старобинского месторождения (Припятский калиеносный бассейн) в 1949 г. В настоящее время разработка Верхнекамского калийно-

го месторождения осуществляется в России тремя компаниями: ПАО «Уралкалий», «ЕвроХим», ПАО «Акрон», а Старобинского месторождения – ОАО «Беларуськалий». При этом большие перспективы развития калийной отрасли остаются в странах Средней Азии: Туркменистан – Гарлыкское месторождение, Узбекистан – Тюбегатанское месторождение, Казахстан – Жилианское калийно-полигалитовое месторождение и горно-калийное месторождение Сатимолла [20].

На сегодняшний день в России насчитывается 9 калийных месторождений (Верхнекамское, Непское, Гремячинское, Ново-Гремячинское, Яшкинское, Западно-Петриковское, Восточно-Петриковское, Нивенское и Северо-Красноборское) [20, 22] (рис. 2).

Разрабатываемые калийные руды являются источником поступления в окружающую среду  $^{40}\text{K}$ . Исследования ядра разведочной скважины на Верхнекамском месторождении (табл. 1) демонстрируют более высокие значения активности  $^{40}\text{K}$  в продуктивных калийных пластах, что обусловлено их минеральным составом – присутствием калийсодержащих минералов, прежде всего сильвина (KCl). Для рассматриваемого месторождения наиболее высокие значения активности характерны для пестрых сильвинитов (до 4967 Бк/кг), что существенно выше активности  $^{40}\text{K}$  для обобщенных данных по осадочным породам и континентальной земной коре.

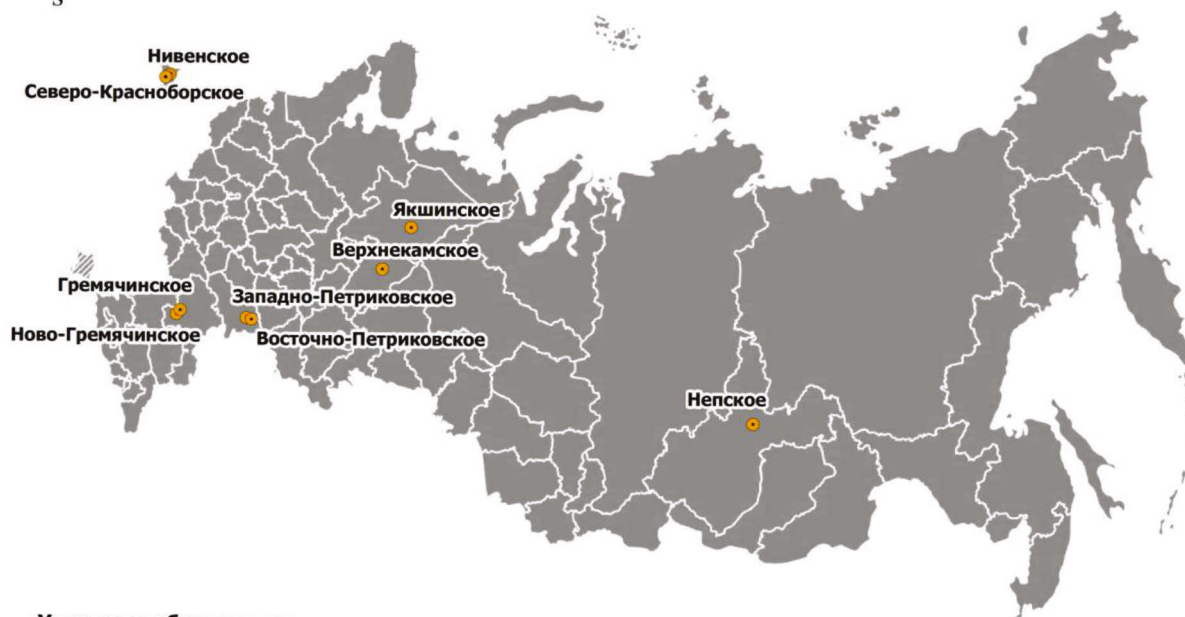
Нормирование суммарной удельной активности ЕРН с учетом СанПиН 2.6.1.2800-10 (приложение 7) для исследуемых образцов (см. табл. 1) проведено по расчетной величине эффективной удельной активности природных радионуклидов  $A_{\text{эфф}}$ , которая определяется характеристикой внешнего гамма-излучения материальных сред (Бк/кг). Формула для ее расчета имеет вид:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Tn}} + 0,09A_{\text{K}}$$

где  $A_{\text{Ra}}$  и  $A_{\text{Tn}}$  – удельные активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  (Бк/кг), находящиеся в равновесии с остальными членами рядов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ,  $A_{\text{K}}$  – удельная активность  $^{40}\text{K}$  (Бк/кг).



**Рис. 1.** Солеотвал и калийная залежь, Верхнекамское месторождение (Пермский край, Россия)  
[Fig 1. Salt dump and potash deposit, Verkhnekamskoe mine (Perm Region, Russia)]



## Условные обозначения

- Калийные месторождения России

Рис. 2. Калийные месторождения России  
[Fig. 2. Potash deposits in Russia]

Таблица 1

Удельная активность природных радионуклидов в породах разведочной скважины и измельченной руде

[Table 1]

## Specific activity of natural radionuclides in exploratory borehole rocks and milled ore

Породы (интервал отбора, м) [Rock (Sampling interval, m)]	Активность, Бк/кг [Activity concentration (Bq/kg)]			
	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$A_{\text{эфф}} [A_{\text{eff}}]$
Суглинок (3,5–4,0) [Loam (3,5–4,0)]	333±55	15,3±5	17,3±3	67,16±14,45
Мергель (13,0–13,5) [Mergel (13,0–13,5)]	177±37	7,5±4	4,9±3	30,58±11,53
Мергель глинистый (26,2–26,4) [Clay Mergel (26,2–26,4)]	382±60	12,9±5	7,3±3	58,45±14,90
Мергель глинистый (29,4–29,5) [Clay Mergel (29,4–29,5)]	346±56	17,3±5	7±3	60,63±14,54
Мергель глинистый (151,9–152,1) [Clay Mergel (151,9–152,1)]	359±57	20,9±5	4,6±3	64,08±14,63
Мергель-гипсовая порода (173,4–173,8) [Mergel-gypsum rock (173,4–173,8)]	927±195	22,2±6,26	6,26±4,89	118,55±30,58
Каменная соль (197,0–197,3) [Rock salt (197,0–197,3)]	3±0	3,2±3	3±0	7,43±3,9
Карналлит (226,7–227,0) [Carnallite (226,7–227,0)]	2896±330	19,8±5	3±0	289,38±36,2
Карналлит (245,5–245,9) [Carnallite (245,5–245,9)]	3031±340	17,8±5	3±0	298,93±37,1



Породы (интервал отбора, м) [Rock (Sampling interval, m)]	Активность, Бк/кг [Activity concentration (Bq/kg)]			
	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$A_{\text{эфф}} [A_{\text{eff}}]$
Карналлит (272,8–273,2) [Carnallite (272,8–273,2)]	2824±320	16,7±5	3±0	278,87±35,3
Пестрый сильвинит (282,6–283,0) [Variegated sylvinite (282,6–283,0)]	4967±540	38,3±8	3±0	499,82±59,00
Полосчатый сильвинит (284,9–285,4) [Striated sylvinite (284,9–285,4)]	3393±380	41±8	3±0	361,67±44,60
Красный сильвинит (296,5–297,1) [Red sylvinite (296,5–297,1)]	2055±240	16,4±5	3±0	209,27±28,10
Полосчатый сильвинит (304,0–304,55) [Striated sylvinite (304,0–304,55)]	4542±470	24,9±6	3±0	418,05±50,10
Каменная соль (348,3–348,9) [Rock salt (348,3–348,9)]	3±0	3±0	3±0	7,17±0,00
Измельченная руда [Crushed ore]				
Сильвинит молотый [Sylvinite ground]	4510 ± 730	<8	14,5 ± 4,2	398 ± 66
Сильвинит молотый [Sylvinite ground]	4612 ± 742	<8	<8	418 ± 67
Галитовые отходы [Galite waste]	283 ± 70	<8	<8	24 ± 6
Галитовые отходы [Galite waste]	297 ± 66	<8	<8	27 ± 7
Обобщенные данные по солям Шахты Кхевера, Пакистан [27] [Generalised data on salts The Khewera Mines, Pakistan]	36±20	–	–	–
Обобщенные данные по осадочным породам [6]				
Осадочные породы				
Континентальная земная кора				
[Generalised data on sedimentary rocks Sedimentary rocks Continental crust]	<300–900 850	<8–50 44	– –	– –

Эффективная удельная активность всех исследованных образцов калийных солей не превышает 740 Бк/кг [26].

В процессе миграции естественные радионуклиды поступают в водные объекты, аккумулируются в почвах, грунтах и донных отложениях. Почвенный покров является важнейшим компонентом природной среды, в котором сосредоточено 95–98% активности загрязняющих радионуклидов. В связи с тем, что природная активность ЕРН с глубиной меняется незначительно, анализ именно этого слоя является основным при изучении радиоактивного загрязнения почв и грунтов [15, 28].

Изучение активности ЕРН в депонирующих средах на Верхнекамском месторождении калийных солей [15, 26, 29] показало, что миграция  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ограничивается зоной 2 км. Только незначительная часть исследованных проб (8%) превышает среднемировые активности  $^{40}\text{K}$  для почв. В донных отложениях средняя активность  $^{40}\text{K}$  не превышает значений по другим территориям с техногенным влиянием. Активность  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в исследованных пробах значительно ниже среднемировых значений [29].

Таким образом, несмотря на высокую активность  $^{40}\text{K}$  в разрабатываемых калийных рудах, подземная разра-

ботка месторождений калийных солей не оказывает влияния на радиоактивную обстановку на территориях.

### Естественная радиоактивность при добыче фосфатов

Месторождения фосфатов считаются одним из самых важных невозобновляемых ресурсов в мире. Минералы на основе фосфора в основном используются в производстве удобрений, моющих средств, продуктов питания и напитков, а также при обработке металлов (антикоррозионные покрытия) [3].

Общемировая добыча фосфатов в 2021 г. составила 220 млн т. Лидерами по добыче являются Китай, Марокко, США и Россия (рис. 3). Во всем мире более 85% мирового производства фосфатной руды добывается из осадочных месторождений [3]. На рисунке 4 представлено хвостохранилище фосфатного рудника в штате Флорида.

Радиоактивность фосфатных месторождений исследуется с начала 1900-х гг. В то время уже было известно, что месторождения фосфатов обычно характеризуются высокими концентрациями радионуклидов [32]. Фосфатная руда содержит природные радионуклиды,



Рис. 3. Регионы добычи фосфатов  
[Fig 3. Phosphate mining regions]



Рис. 4. Хвостохранилище фосфатного рудника, регион Южной прибрежной равнины (штат Флорида, США), июль 2006 г. [30]  
[Fig4. Phosphate mine tailings pond, South Coastal Plain Region (Florida), July 2006]

такие как уран, торий и продукты их радиоактивного распада и  $^{40}\text{K}$  [3, 33].

Большинство радионуклидов, присутствующих в фосфатных породах, относятся к природным рядам  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а также  $^{40}\text{K}$ . При радиоактивном распаде  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,

$^{232}\text{Th}$  и дочерних продуктов их распада испускается альфа-, бета- и гамма-излучение.

В мире имеется множество публикаций, посвященных радиоактивности фосфатных руд, удобрений, отходов [34–36]. По сравнению с добычей и переработкой урановых руд, фосфоритная руда содержит сравнительно невысокие концентрации ЕРН семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Активность  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{238}\text{U}$  в фосфатных рудах изменяется в очень широком интервале (табл. 2). Она может достигать значений по  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{238}\text{U}$  4800 Бк/кг (США, штат Южная Каролина). Также высокая активность  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{238}\text{U}$  наблюдается в образцах фосфатной руды в Бразилии (штат Олинда), где составляет 3550 Бк/кг и 3400 Бк/кг соответственно [37]. Также, например, на территории фосфатных месторождений Блед Эль-Хадба (Северо-Восточный Алжир) основная активность приходится на ряд  $^{238}\text{U}$  [3].

В районе Кусейр-Сафага (Центрально-Восточная пустыня, Египет), где расположены фосфатные рудники, средняя удельная активность  $^{238}\text{U}$  составляет 1766 Бк/кг, что в 53 раза превышает среднемировое значение (33 Бк/кг) [38]. Согласно опубликованным данным [39], безопасная утилизация фосфатного шлама, образующегося при добыче фосфатной руды, является серьезной проблемой, поскольку происходит облучение шахтеров и населения, проживающего в этом горнодобывающем районе.

Таблица 2

Средняя удельная активность ЕРН (Бк/кг) в фосфатах различных месторождений мира [40]

[Table 2

Average specific activity of natural radionuclides (Bq/kg) in phosphates from different locations worldwide]

Регион [Region]	ЕРН [Natural radionuclides]		
	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$
Флорида (США) [Florida (USA)]	1500	1600	16
Южная Каролина (США) [South Carolina (USA)]	4800	4800	78
Марокко [Morocco]	1700	1700	30
Кольский полуостров (Россия) [Kola Peninsula (Russia)]	90	40	90
Китай [China]	150	150	25

Фосфатные породы являются исходным материалом для производства всех фосфатных продуктов и основным источником фосфора для удобрений.

Ежегодно во всем мире потребляется более 30 млн т фосфорных удобрений, применение которых увеличивает производство сельскохозяйственных культур [41]. Согласно опубликованным данным [42], возможным негативным эффектом использования этих удобрений является загрязнение обрабатываемых земель некоторыми естественными радионуклидами.

В почвах сельскохозяйственных угодий России за 2016 г. средние активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ( $^{228}\text{Ra}$ ) и  $^{40}\text{K}$  составили  $21,6 \pm 0,3$  Бк/кг,  $29,2 \pm 0,3$  Бк/кг,  $490 \pm 5$  Бк/кг соответственно, что входит в типичный диапазон концентраций ЕРН в почве, характерный для планеты в целом. Однако средняя активность  $^{226}\text{Ra}$  в почвах сельскохозяйственных угодий России немного ниже, активности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  – несколько выше среднемировых значений [37].

Таким образом, добыча фосфатных руд приводит к повышению средних концентраций  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в почвах горнодобывающих районов, что в дальнейшем может привести к формированию повышенного радиационного фона территории. Несмотря на высокую активность ЕРН в разрабатываемых фосфатных породах, применение фосфорных удобрений не оказывает существенного влияния на удельную активность радионуклидов в сельскохозяйственных землях.

#### Естественная радиоактивность при добыче углеводородов

Разработка нефтяных и газовых месторождений часто связана с химическим и радиоактивным загрязнением природной среды. При добыче углеводородов основными источниками воздействия являются промышленные объекты, трубопроводы, транспортные средства и хозяйственно-бытовая деятельность на территории нефтепромыслов [43].

Нефть, газ и пластовые воды за счет контакта с вмещающими породами, процессов растворения и обмена обогащены различными химическими соединениями, тяжелыми металлами и ЕРН. Величину радиоактивности нефти, газа и пластовых вод оценивают через определение содержания  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Согласно опубликованным данным, 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 ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и др.).

В настоящее время проблема радиоактивного загрязнения окружающей среды в связи с добычей и переработкой углеводородного сырья стала достоянием гласности и широко обсуждается в научно-технических изданиях России, США, Китая и ряда других стран [44, 45, 46, 47] (рис. 5). Так, согласно данным 1990 г. [47], в США уже на тот период накопилось свыше 10 млн т радиоактивных шламов и солей.

Основная причина появления радия в пластовых флюидах нефтяных месторождений – выщелачивание и ионный изотопный обмен. По различным оценкам, в России масса радиоактивных шламов пластовых вод месторождений углеводородов составляет от 50 до 200 млн т [44].

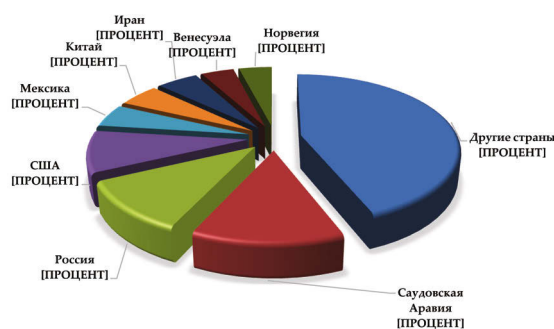


Рис. 5. Добыча нефти в мире [Fig5. Global oil production]

Впервые повышенные концентрации ЕРН на промышленном оборудовании нефтедобывающих производств – на фильтрах, сепараторах, отстойниках, внутренней поверхности труб и конструкций, которые используются в процессе добычи, были обнаружены в 1970–1980-е гг. сначала в США, затем в СССР (в Баку), в 1990-е гг. на территории Республики Татарстан [44, 48]. Активность ЕРН в отложениях на стенках промышленного оборудования оказалась выше активности ЕРН в шламах. В США накопившиеся в результате извлечения нефти отложения отнесены к отходам и классифицированы как технологически обогащенный природный радиоактивный материал – TENORM [49]. Накопления таких отложений на оборудовании могут стать источниками облучения персонала. Основная масса отложений скапливается на электроцентробежных насосах, насосно-компрессорных трубах, поверхностных резервуарах и оборудовании первичной подготовки нефти [50]. Радиобарит ( $\text{Ba}$ ,  $\text{Ra}$ ) $\text{SO}_4$ , с незначительными примесями других солей, и природные радионуклиды ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) накапливаются в оборудовании скважин, технологическом оборудовании товарных парков и установках комплексной подготовки нефти [51].

Таким образом, при добыче и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений на дневную поверхность происходит вынос ЕРН, тем самым предприятия топливно-энергетического комплекса вносят свой вклад в формирование радиационного фона территорий.

#### Естественная радиоактивность при добыче угля

Уголь, как и большинство горных пород, содержит природные радионуклиды, выброс которых наиболее активно происходит во время его сжигания с целью производства энергии. Источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются и угледобывающие предприятия. На угледобывающих предприятиях происходит вынос ЕРН на поверхность, что в результате негативно сказывается на персонале угольных шахт, а также населения шахтерских городов и поселков [52].

Уголь способен накапливать в своей структуре большое количество химических элементов, в том числе и ЕРН уранового ( $^{238}\text{U}$  и продукты его распада  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и т. д.) и ториевого ( $^{232}\text{Th}$  и продукты его распада  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{216}\text{Po}$ ) рядов, а также долгоживущий радиоактивный изотоп  $^{40}\text{K}$ .

Угольное топливо применяется для производства 38% электроэнергии во всем мире [53]. Активность ЕРН в выбросах зависит от активности ЕРН в углях, содержания в них

золы, температуры горения, соотношения тяжелых шлаков, оседающих на дне печи, и более легкой зольной пыли, а также от эффективности пылеулавливающих устройств [5]. В таблице 3 представлены обобщенные данные по диапазонам радиоактивности разнообразных углей, сжигаемых на ТЭС, и концентрации радионуклидов в шлаках и летучей золе ТЭС [54]. Данные демонстрируют существенное обогащение ЕРН продуктов горения угля, и прежде всего их легкой фракции, в сравнении с исходным сырьем.

На рисунке 6 представлено среднее содержание ЕРН в углях некоторых угольных месторождений мира. По данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР) [52], среднемировые удельные актив-

ности радионуклидов в углях составляют (Бк/кг):  $^{238}\text{U}$  – 37;  $^{226}\text{Ra}$  – 35;  $^{232}\text{Th}$  – 30;  $^{40}\text{K}$  – 400.

По оценкам специалистов, содержание урана в углях месторождений России не превышает среднемировых концентраций этого элемента для осадочных пород, но имеются месторождения, в которых оно превышено в несколько раз. Например, среднее содержание урана и тория в кузнецких углях составляет 4,125 и 4,198 г/т. Самые высокие концентрации радионуклидов, в частности, содержания урана, были отмечены в бурых углях пласта Итатский – 139 г/т, при сжигании данных углей на ТЭС в золошлаковых отходах содержание урана достигает 902,6 г/т [58].

Удельная активность радионуклидов в углях, шлаках и летучей золе, Бк/кг [54]

Таблица 3

[Table 3]

Specific activity of radionuclides in coal, bottom ash and fly ash, Bq/kg

Изотоп [Isotope]	Уголь [Coal]	Шлак [Slag]	Летучая зола [Fly ash]
$^{238}\text{U}$	9–31	56–185	70–370
$^{226}\text{Ra}$	7–25	20–166	85–281
$^{232}\text{Th}$	9–19	59	81–174
$^{40}\text{K}$	26–130	230–962	233–740
$^{234}\text{U}$	19	92	160
$^{228}\text{Th}$	1–20	56–81	15–130
$^{210}\text{Pb}$	10–26	21–185	52–1813
$^{210}\text{Po}$	41	13–185	196–466

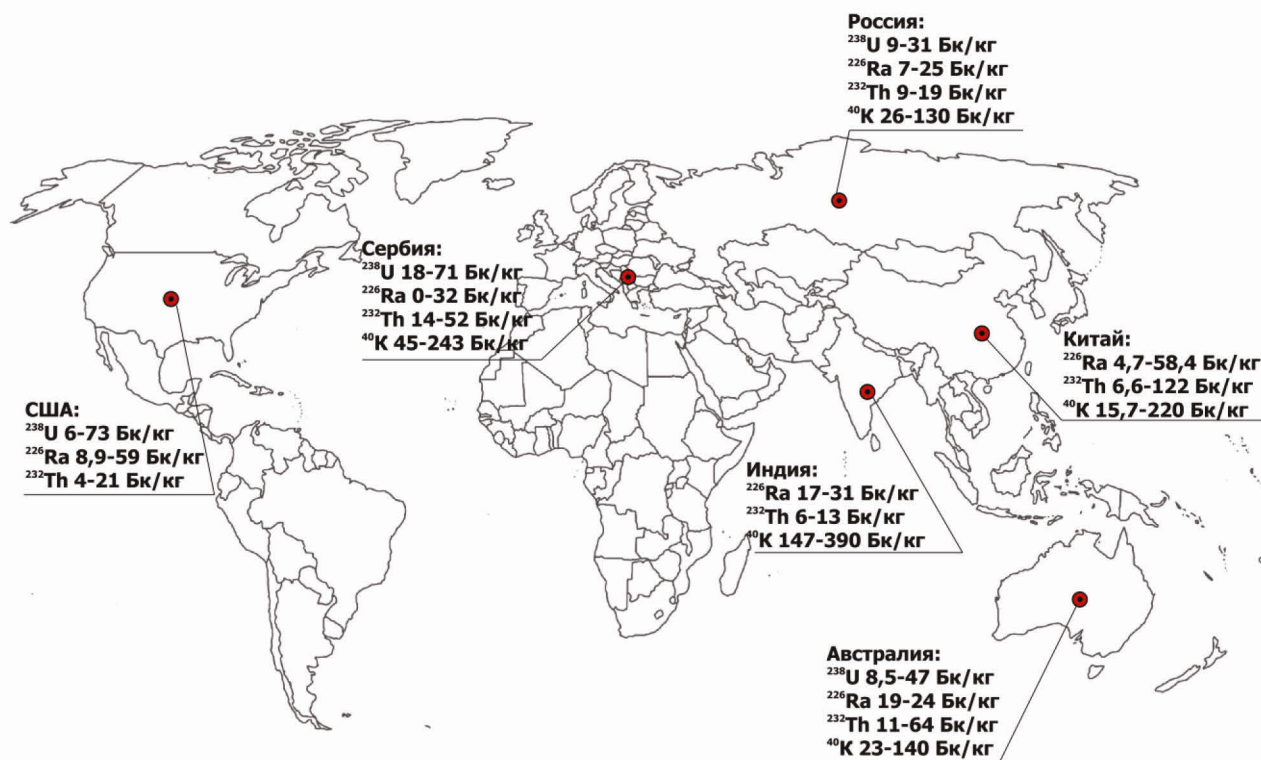


Рис. 6. Активность естественных радионуклидов в углях некоторых угольных месторождений мира [55, 56, 57]  
 [Fig. 6. Naturally occurring radionuclide activity in coals from some coal deposits around the world]



Отходы от сжигания углей (золошлаковые отходы) составляют около 10% первоначального объема сжигаемого угля. При сжигании углей с повышенным содержанием ЕРН радиоактивные элементы переходят в золошлаковые отходы и в летучую золу, загрязняя атмосферу и депонирующие среды – почвы, грунты, поверхностные и подземные воды, донные отложения. В то же время вокруг ТЭС накапливаются значительные объемы золы и шлаков, содержащих ЕРН. Это приводит к формированию техногенно измененного радиационного фона, который определяет повышенное природное облучение персонала ТЭС.

Таким образом, вынос ЕРН при добыче углей является актуальной проблемой, требующей особого внимания и контроля. Все это ставит задачи особого контроля работающих угольных ТЭС в зависимости от их территориального расположения и качества применяемого угля, возможности вторичного использования угольной золы и шлаков.

### Заключение

По мере развития добывающего и топливно-энергетического комплексов происходит активный вынос на дневную поверхность вместе с минеральным сырьем естественных радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ , что в перспективе может привести к повышению радиационного фона. Для контроля за этими процессами необходимо проведение радиационного мониторинга вблизи таких предприятий и разработка технологий, обеспечивающих минимизацию выноса природных радионуклидов при всех видах добычи и переработки минерального и органического сырья.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Перевозищев Р.Д. – существенный вклад в разработку концепции исследования, написание текста статьи.

Перевозищев А.А. – существенный вклад в разработку концепции исследования, написание текста статьи.

Меньшикова Е.А. – редактирование текста статьи, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023 г.

### Литература

1. Пельмский Г.А. Радиоактивность и экологическая геология // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 183-190.
2. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Новые тенденции развития мировой и российской минерально-сырьевой базы урана. «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, №26, -М.: ВИМС, 2008, 79 с.
3. Benarous S., Azbouche A., Boumehdi B., et al. Establishing a pre-mining baseline of natural radionuclides distribution and radiation hazard for the Bled El-Hadba sedimentary phosphate deposits (North-Eastern Algeria) // Nuclear Engineering and Technology. 2022. Vol. 54, Iss. 11. P. 4253-4264, <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.006>.
4. Лисаченко Э.П., Стамат И.П. Природные радионуклиды в производственных отходах предприятий неурановых отраслей (обзор) // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 70-77.
5. Гонсалес А.Х., Андере Ж. Естественные и искусственные источники излучения: Ядерная энергия в будущем // Бюллетень МАГАТЭ, 2/1989. С. 23-35.
6. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric, and Aquatic Natural Radioactivity. Radioactivity in the Environment. 2010. Vol.17, No C. P. 29-85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3).
7. Feng G., Yong J., Liu Q., et al. Response of soil microbial communities to natural radionuclides along specific-activity gradients // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114156>.
8. Ajayi O.S., Balogun K.O., Dike C.G. Spatial distributions and dose assessment of natural radionuclides in rocks and soils of some selected sites in southwestern Nigeria // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2017. Vol. 23, No 6. P. 1373-1388.
9. Monged M.H., 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, & Soil Pollution. 2020. Vol. 231, No 7. P. 1-24.
10. Galhardi J.A., García-Tenorio R., Bonotto D.M., et al. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177, P. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>
11. Darko E., Faanu A., Awudu A., et al. Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana // Radiation Protection Dosimetry. 2009. Vol. 138. P. 45-51.
12. Алексахин Р.М., Удалова А.А., Гераськин С.А. Учение о биосфере В.И. Вернадского и современные проблемы радиозологии. Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. С. 432-439. DOI:10.7868/S0869803114040031.
13. Dina N.T., Das S.C., Kabir M.Z., et al. Natural radioactivity and its radiological implications from soils and rocks in Jaintiapur area, North-east Bangladesh // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2022 Vol. 331. P. 4457–4468. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08562-0>.
14. Errahmani D.T., Noureddine A., Hernández J.M.A. Depth-distributions and migration of fallout radionuclides in mountain soils from Chréa National Park (Algeria): The role of rhizospheres // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. Vol. 242. P. 106799, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106799>.
15. Perevoshchikov R.D., Perminova A.A., Menshikova E.A. Natural Radionuclides in Soils of Natural-Technogenic Landscapes in the Impact Zone of Potassium Salt Mining // Minerals. 2022. Vol. 12. P. 1352. <https://doi.org/10.3390/min12111352>.
16. Leal A.L.C., Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., et al. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 211. P. 106046, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106046>.
17. Dindaroğlu T. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014. Vol. 12, Iss. 1. P. 130.
18. Мосинец В.Н. Радиоактивные отходы уранодобывающих предприятий и их воздействие на окружающую среду. Материалы конференции ЯО СССР Москва: «Атомная энергия», 1991. Т. 70, Вып. 5. С. 282-288.
19. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозологии. Учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.

20. Ushakova E.S., Perevoshchikova A.A., Menshikova E.A., et al. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit // *Mining*. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 176-204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.
21. Demirchyan G.A., Movsisyan N.E., Pyuskyulyan K.I., et al. Radiological Studies at the Largest Mining Centers of Armenia // *Geochemistry International*. 2022. Vol. 60. P. 122–136. <https://doi.org/10.1134/S0016702922010049>.
22. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining // *Russian Mining Industry*. 2022. Vol. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
23. Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining. United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics France; 2001. 60 p.
24. Prakash S., Verma J.P. Global perspective of potash for fertilizer production. In *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*; Ed. Meena, V.S., Maurya B.R., Verma J.P., Meena R.S. Springer: New Delhi, India, 2016. P. 327–331. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_23).
25. Shen L., Siritongkham N. The characteristics, formation and exploration progress of the potash deposits on the Khorat Plateau, Thailand and Laos, Southeast Asia // *China Geology*. 2020. Vol. 3. P. 67–82. <https://doi.org/10.31035/cg2020009>.
26. Menshikova E., Perevoshchikov R., Belkin P., Blinov S. Concentrations of Natural Radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) at the Potash Salts Deposit // *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, Iss. 3. P. 179-187. doi:10.12911/22998993/132544.
27. Baloch M.A., Qureshi A.A., Waheed A. A study on natural radioactivity in khewra salt mines, Pakistan // *Journal of Radiation Research*. 2012. Vol. 53, Iss. 3. P. 411-421. DOI: 10.1269/jrr.11162.
28. Yang Y.-X., Wu X.-M., Jiang Z.-Y., et al. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang Granite Area, China // *Applied Radiation and Isotopes*. 2005. Vol. 63, Iss. 2. P. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
29. Перевошиков Р.Д. Естественные радионуклиды ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) в депонирующих средах (территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 3. С. 29-38. DOI 10.18799/24131830/2022/3/3599.
30. Геологическая служба США. URL: <https://www.usgs.gov/media/images/phosphate-mine-pile> (Дата обращения: 10.07.2023).
31. Paschoa A.S., Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric and Aquatic Natural Radioactivity // *Radioactivity in the Environment*. 2010. Vol. 17. P. 29-85. doi: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
32. Chinnaesakki S., Bara S.V., Sartandel S.J., Tripathi R. M., Puranik V.D. Performance of HPGe gamma spectrometry system for the measurement of low level radioactivity // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012. Vol. 294, № 1. P. 143-147.
33. Zohuri B. Nuclear fuel cycle and decommissioning // *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. Woodhead Publishing. 2020. P. 61-120.
34. Calin M.R., Radulescu I., Calin M.A. Measurement and evaluation of natural radioactivity in phosphogypsum in industrial areas from Romania // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 304. P. 1303–1312. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3970-3>.
35. Boumala D., Mavon C., Belafrites A., et al. Evaluation of radionuclide concentrations and external gamma radiation levels in phosphate ores and fertilizers commonly used in Algeria // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018. Vol. 317. P. 501–510. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5871-8>.
36. Uosif M.A.M., Mostafa A.M.A., Elsaman R., et al. Natural radioactivity levels and radiological hazards indices of chemical fertilizers commonly used in Upper Egypt // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014. Vol. 7, Iss. 4. P. 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.006>.
37. Орлов П.М. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 4. С. 62-67. DOI 10.24411/2587-6740-2020-14074.
38. Gaafar I., El-Shershaby A., Zeidan I., et al. Natural radioactivity and radiation hazard assessment of phosphate mining, Quseir-Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2016. Vol. 5, Iss. 1. P. 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.002>.
39. Valentin J. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84 // *Annals of the ICRP*. 2007. P. 49. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003.
40. Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Барановская Н.В. и др. Радиоактивные элементы в окружающей среде // *Известия Томского политехнического университета*. 2007. Т. 311, № 1. С. 128-136.
41. El-Taher A., Althoyaib S.S. Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia // *Applied Radiation and Isotopes*. 2012. Vol. 70, № 1. P. 290-295.
42. Lambert R., Grant C., Sauvè S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers // *Science of the total environment*. 2007. Vol. 378, № 3. P. 293-305.
43. Перевошиков Р.Д., Меньшикова Е.А. Определение  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в почвах в районе разработки месторождения калийных солей (Пермский край, Россия). Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды», Гомель, Республика Беларусь, 2-3 июня 2022. С. 84-88.
44. Хайкович И.М., Мац Н.А., Крапивский Е.И., Рыжаков В.Н. Радиационный мониторинг и дезактивация промышленных объектов, загрязненных естественными радионуклидами в результате добычи углеводородного сырья // *Известия Уральской государственной горно-геологической академии*. 2003. Вып. 17. С. 63-71.
45. Солодунин В.П., Казачевский И.В., Резников С.В. и др. Измерения уровней радиоактивности при добыче, подготовке и транспортировке газонефтяного сырья // *Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ)*. 2000. №3. С. 10-14.
46. Gray P. NORM Contamination in the Petroleum Industry // *Journal of Petroleum Technology*. 1993. P. 12-16.
47. Gray P. Radioactive materials could pose problems for the gas industry // *Oil & Gas Journal*. 1990. P. 45-48.
48. Коннова Л.А., Папырин В.В., Щербakov О.В. Радиационно-экологические аспекты безопасности на объектах нефтегазовой отрасли // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2018. № 1. С. 26-30.
49. TENORM: Oil and Gas Production Wastes. URL: <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-production-wastes> (Дата обращения: 10.07.2023).
50. Тахаутдинов Ш.Ф., Сизов Б.А., Дияшев Р.Н., Зайцев В.И. Безопасность труда в промышленности. 1995. № 2. С. 36–39.
51. Хуснуллин М.Х. Геофизические методы контроля разработки нефтяных пластов. М.: Недра, 1989. 190 с.
52. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York. 2000. P. 40–75.
53. Habib Md.A., Khan R., Phoungthong Kh. Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment // *Chemical Geology*.

2022. Vol. 600. P. 120865, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865>.
54. Сидорова Г.П., Крылов Д.А. Проблемы радиационной опасности в угольной энергетике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №11. С. 200-209.
55. Jankovic M.M., Todorovic D.J., Nikolic J.D. Analysis of Natural Radionuclides in Coal, Slag and Ash in Coal – Fired Power Plants in Serbia // Journal of Mining and Metallurgy. 2011. Vol. 47. P. 149–155.
56. Suhana J., Mohd R. Analysis of Natural Radioactivity in Coal and Ashes from a Coal Fired Power Plant // Chemical Engineering Transactions. 2015. Vol. 45. P. 1549–1554.
57. Xinwei L., Xiaodan J., Fengling W. Natural Radioactivity of Coal and its by-products in the Baoji Coal-fired Power Plant // China – Current science. 2006. Vol. 91, No. 11. P. 1508–1511.
58. Нифантов Б.Ф., Потапов В.П., Анферов Б.А., Кузнецов Л.В. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технология их извлечения при комплексном освоении месторождений. Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. 310 с.

Поступила: 12.07.2023 г.

**Перевощиков Роман Дмитриевич** – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета. **Адрес для переписки:** 614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, 4; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru  
ORCID: 0000-0001-6451-8202

**Перевощикова Анна Александровна** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, аспирант факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия  
ORCID: 0000-0003-1769-7740

**Меньшикова Елена Александровна** – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Пермь, Россия  
ORCID: 0000-0001-5199-7590

**Для цитирования:** Перевощиков Р.Д., Перевощикова А.А., Меньшикова Е.А. Влияние добывающих и топливно-энергетических предприятий на радиационный фон территорий // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 70-83. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-70-83

## Impact of mining and fuel and energy enterprises on the radiation background of territories

Roman D. Perevoshchikov<sup>1</sup>, Anna A. Perevoshchikova<sup>1,2</sup>, Elena A. Menshikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Natural Science, Perm State University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Chemical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

*This review provides information on the radiation situation in mining and energy production facilities. Mining activities are considered as one of the significant sources of radioactivity. Many radionuclides and metals that are transported by surface and ground waters, air flows over significant distances, contaminating soils, subsoil and bottom sediments of the adjacent territory, forming geochemically specific natural-technogenic areas. In this work is given an overview of radiation conditions in the territories of potassium phosphate, hydrocarbon and coal deposits. Developed potassium ores are the source of <sup>40</sup>K emission into the environment. According to the results obtained, the migration of investigated radionuclides is limited to the zone of 2 km. Only an insignificant part of the investigated samples (8%) exceeds the world average activity of <sup>40</sup>K for soils. In bottom sediments, the average activity of <sup>40</sup>K does not exceed the values for other territories with anthropogenic impact. More than 30 million tonnes of phosphate fertilizers are consumed worldwide each year, and their use increases crop production. However, a possible negative effect of these fertilisers is the contamination of cultivated land with some natural radionuclides. Uranium concentrations in phosphate vary from 37 to 4900 Bq/kg for <sup>238</sup>U and from 100 to 10 000 Bq/kg for <sup>226</sup>Ra. The amount of*

**Roman D. Perevoshchikov**

Institute of Natural Science

**Address for correspondence:** Genkel Str., 4, Perm, 614068, Russia; E-mail: rperevoshnikov@bk.ru

radioactivity in oil, gas and formation water is estimated through determination of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . According to the published data, increased radiation background is observed near wellheads, in the places of oil sludge accumulation, near the flares at oil and gas enterprises, as a result of bringing a number of natural and man-made radionuclides ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , etc.) to the day surface. Coal mines are sources of radioactive contamination. This results from the extraction of large amounts of natural radionuclides from the subsoil together with the coal. This paper presents the average natural radionuclides content in coals from some of the world's coal mines. With the development of mining and fuel-energy complexes, there is an active export to the surface together with minerals of natural radionuclides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ , which leads to an increase in the radiation load on the environment. In this connection, the problems of ensuring radiation safety at the facilities of mining and fuel and energy industry require the closest attention.

**Key words:** natural radionuclides, extractive enterprises, fuel-energy enterprises, environmental monitoring.

### Authors personal contribution

Perevoshchikov R.D. – significant contribution to the development of the research concept, writing the text of the article.

Perevoshchikova A.A. – substantial contribution to the development of the research concept, writing the text of the article.

Menshikova E.A. – editing of the text of the article, approval of the final version of the article for publication.

### Conflicts of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Information on the source of funding

The research was carried out with the financial support of the Perm Scientific and Educational Centre “Rational Subsoil Use”, 2023.

### References

- Pelymsky GA. Radioactivity and ecological geology. *Earth Life*. 2010;32: 183-190. (In Russian).
- Tarkhanov AV, Shatalov VV. New trends in development of world and Russian mineral raw material base of uranium. “Mineral Resources. Geological and Economic Series, No. 26. Moscow: VIMS; 2008, 79 p. (In Russian).
- Benarous S, Azbouche A, Boumehdi B, Chegrouche S, Atamna N, Khelifi R. Establishing a pre-mining baseline of natural radionuclides distribution and radiation hazard for the Bled El-Hadba sedimentary phosphate deposits (North-Eastern Algeria). *Nuclear Engineering and Technology*. 2022;54(11): 4253-4264, <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.006>.
- Lisachenko EP, Stamat IP. Natural radionuclides in production wastes of non-uranium industry enterprises (review). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 70-77. (In Russian).
- Gonzalez AX, Andere J. Natural and artificial sources of radiation: Nuclear energy in the future. *Byulleten MAGATE = IAEA BULLETIN*. 1989;2: 23-35 (In Russian).
- Paschoa AS, Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric, and Aquatic Natural Radioactivity. *Radioactivity in the Environment*. 2010;17(C): 29-85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.)
- Feng G, Yong J, Liu Q, Chen H, Mao P. Response of soil microbial communities to natural radionuclides along specific-activity gradients. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022;246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114156>.
- Ajayi OS, Balogun KO, Dike CG. Spatial distributions and dose assessment of natural radionuclides in rocks and soils of some selected sites in southwestern Nigeria. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2017;23(6): 1373-1388.
- Monged MH, Hassan HB, El-Sayed SA. Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Natural Radionuclides and Trace Elements in Agricultural Soil of Northeastern Nile Valley, Egypt. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231(7): 1-24.
- Galhardi JuA, García-Tenorio R, Bonotto DM, Francés ID, Motta JG. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017;177: 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>.
- Darko E, Faanu A, Awudu A, Emi-Reynolds G, Yeboah J, Oppon OC, et al. Public exposure to hazards associated with natural radioactivity in open-pit mining in Ghana. *Radiation Protection Dosimetry*. 2009;138: 45-51.
- Aleksakhin RM, Udalova AA, Geraskin SA. Doctrine on biosphere of VI Vernadsky and modern problems of radioecology. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2014;54: 432-439. (In Russian) DOI:10.7868/S0869803114040031.
- Dina NT, Das SC, Kabir MZ, Rasul MdG, Deeba F, Rajib M, et al. Natural radioactivity and its radiological implications from soils and rocks in Jaintiapur area, North-east Bangladesh. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2022;331: 4457–4468. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08562-0>.
- Errahmani DT, Noureddine A, Hernández JMA. Depth-distributions and migration of fallout radionuclides in mountain soils from Chréa National Park (Algeria): The role of rhizospheres. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;242: 106799, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106799>.
- Perevoshchikov RD, Perminova AA, Menshikova EA. Natural Radionuclides in Soils of Natural-Technogenic Landscapes in the Impact Zone of Potassium Salt Mining. *Minerals*. 2022;12: 1352. <https://doi.org/10.3390/min12111352>.
- Leal ALC, Lauria DC, Fernando CA, Ribeiro VEP, Franzen M, Lima EAM. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;211: 106046, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106046>.
- Dindaroğlu T. The use of the GIS Kriging technique to determine the spatial changes of natural radionuclide concentrations in soil and forest cover. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1): 130.
- Mosinets VN. Radioactive Waste of Uranium Mining Enterprises and its Impact on the Environment. Proceedings of the USSR NWD Conference “Atomic Energy”. Moscow. 1991;70(5): 282-288. (In Russian).
- Rikhvanov LP. Radioactive elements in the environment and problems of radioecology. Textbook. Tomsk: STT; 2009. P. 430. (In Russian).
- Ushakova ES, Perevoshchikova AA, Menshikova EA, Khayrulina E, Perevoshchikov R, Belkin PA. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*. 2023;3(2): 176-204. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.



21. Demirchyan GA, Movsisyan NE, Pyuskyulyan KI, Belyaeva OA. Radiological Studies at the Largest Mining Centers of Armenia. *Geochemistry International*. 2022;60: 122–136. <https://doi.org/10.1134/S00167029222010049>.
22. Baryakh AA, Smirnov EV, Kvitkin SY, Tenison LO. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022;1: 41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>.
23. Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining // United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics France; 2001. 60 p.
24. Prakash S, Verma JP. Global perspective of potash for fertilizer production. In Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Eds. Meena VS, Maurya BR, Verma JP, Meena RS. Springer: New Delhi, India; 2016. P. 327–331. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_23).
25. Shen L, Siritongkham N. The characteristics, formation and exploration progress of the potash deposits on the Khorat Plateau, Thailand and Laos, Southeast Asia. *China Geology*. 2020;3: 67–82. <https://doi.org/10.31035/cg2020009>.
26. Menshikova E, Perevoshchikov R, Belkin P, Blinov S. Concentrations of Natural Radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) at the Potash Salts Deposit. *Journal of Ecological Engineering*. 2021;22(3): 179–187. doi:10.12911/22998993/132544.
27. Baloch MA, Qureshi AA, Waheed A. A study on natural radioactivity in khewra salt mines, Pakistan. *Journal of Radiation Research*. 2012;53(3): 411–421. DOI: 10.1269/jrr.11162.
28. Yang Y-X, Wu X-M, Jiang Z-Y, Wang W-X, Lu J-G, Lin J, et al. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang Granite Area, China. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005;63(2): P. 255–259. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.02.011.
29. Perevoshchikov RD. Natural radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) in depositing media (Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit area) // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 2022;333(3): 29–38. (In Russian). DOI 10.18799/24131830/2022/3/3599.
30. U.S. Geological Survey. Available from: <https://www.usgs.gov/media/images/phosphate-mine-pile> (Accessed: 10.07.2023).
31. Paschoa AS, Steinhäusler F. Terrestrial, Atmospheric and Aquatic Natural Radioactivity. *Radioactivity in the Environment*. 2010;17: 29–85. DOI: 10.1016/S1569-4860(09)01703-3.
32. Chinnasakki S, Bara SV, Sartandel SJ, Tripathi RM, Puranik VD. Performance of HPGe gamma spectrometry system for the measurement of low level radioactivity. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012;294(1): 143–147.
33. Zohuri B. Nuclear fuel cycle and decommissioning. Nuclear Reactor Technology Development and Utilization. Woodhead Publishing; 2020. P. 61–120.
34. Calin MR, Radulescu I, Calin MA. Measurement and evaluation of natural radioactivity in phosphogypsum in industrial areas from Romania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015;304: 1303–1312. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3970-3>.
35. Boumala D, Mavon C, Belafrites A, Tedjani A, Groetz J-E. Evaluation of radionuclide concentrations and external gamma radiation levels in phosphate ores and fertilizers commonly used in Algeria. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018;317: 501–510. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5871-8>.
36. Uosif MAM, Mostafa AMA, Elsaman R, El-sayed M. Natural radioactivity levels and radiological hazards indices of chemical fertilizers commonly used in Upper Egypt. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014;7(4): 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.006>.
37. Orlov PM. Natural radionuclides in soils of Russia and phosphate ores of the planet. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal = International Agricultural Journal*. 2020;4.: 62–67. (In Russian). DOI 10.24411/2587-6740-2020-14074.
38. Gaafar I, El-Shershaby A, Zeidan I, El-Ahl LS. Natural radioactivity and radiation hazard assessment of phosphate mining, Quseir-Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2016;5(1): 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.002>.
39. Valentin J. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84. *Annals of the ICRP*. 2007: 49. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003.
40. Rikhvanov LP, Arbuzov SI, Baranovskaya NV, Volostnov AV, Arkhangel'skaya TA, Mezhibor AM, et al. Radioactive elements in the environment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2007;311(1): 128–136 (In Russian).
41. El-Taher A, Althoyaib SS. Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia. *Applied Radiation and Isotopes*. 2012;70(1): 290–295.
42. Lambert R, Grant C, Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Science of the total environment*. 2007;378(3): 293–305.
43. Perevoshchikov RD, Menshikova EA. Determination of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  in soils in the potassium salt mining area (Perm Region, Russia). Collection of the reports and theses of scientific conf. "Transboundary cooperation in the field of ecological safety and environment protection", Gomel, Republic of Belarus, June, 2–3, 2022. P. 84–88. (In Russian).
44. Haikovich IM, Matz NA, Krapivsky EI, Ryzhakov VN. Radiation monitoring and decontamination of field facilities contaminated by natural radionuclides as a result of hydrocarbon production. *Izvestiya Uralskoy gosudarstvennoy gorno-geologicheskoy akademii = Proceedings of Ural State Mining and Geological Academy*. 2003;17: 63–71. (In Russian).
45. Solodukhin VP, Kazachevsky IV, Reznikov SP, Kazachevsky IV, Reznikov SV, et al. Measurements of radioactivity levels during extraction, preparation and transportation of gas-oil raw materials. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy (ANRI) = Apparatus and News of Radiation Measurements (ANRI)*. 2000;3: 10–14. (In Russian).
46. Gray P. NORM Contamination in the Petroleum Industry. *Journal of Petroleum Technology*. 1993: 12–16.
47. Gray P. Radioactive materials could pose problems for the gas industry. *Oil & Gas Journal*. 1990: 45–48.
48. Konnova LA, Papyrin VV, Shcherbakov OV. Radiation and ecological aspects of safety at the objects of oil and gas industry. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse = Environmental protection in oil and gas complex*. 2018;1: 26–30. (In Russian).
49. TENORM: Oil and Gas Production Wastes. Available from: <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-productionwastes>. (Accessed: 10.07.2023).
50. Takhautdinov ShF, Sizov BA, Diyashev RN, Zaitsev VI. Safety of labour in industry. 1995. № 2. P. 36–39. (In Russian).
51. Khusnullin M.Kh. Geophysical methods of control of oil reservoir development. Moscow: Nedra; 1989. 190 p. (In Russian).
52. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York; 2000. P. 40–75.
53. Habib MdA, Khan R, Phoungthong Kh. Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment. *Chemical Geology*. 2022;600: 120865, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865>.
54. Sidorova GP, Krylov DA. Problems of radiation hazards in coal-fired power engineering. *Gornyy informatsionno-*

- analiticheskiy byulleten = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017;11: 200-209. (In Russian).
55. Jankovic MM, Todorovic DJ, Nikolic JD. Analysis of Natural Radionuclides in Coal, Slag and Ash in Coal – Fired Power Plants in Serbia. *Journal of Mining and Metallurgy*. 2011;47: 149–155.
56. Suhana J, Mohd R. Analysis of Natural Radioactivity in Coal and Ashes from a Coal Fired Power Plant. *Chemical Engineering Transactions*. 2015;45: 1549–1554.
57. Xinwei L, Xiaodan J, Fengling W. Natural Radioactivity of Coal and its by-products in the Baoji Coal-fired Power Plant. *China – Current science*. 2006;91(11): 1508–1511.
58. Nifantov BF, Potapov VP, Anferov BA, Kuznetsov LV. Kuzbass coal: chemical elements-impurities and technology of their extraction in the complex development of deposits. Kemerovo: IS RAS Siberian Branch; 2011. 310 p. (In Russian).

Received: July 12, 2023

**For correspondence: Roman D. Perevoshchikov** – leading engineer of the research laboratory of Environmental Geology of the Natural Science Institute of Perm State National Research University (Genkel Str., 4, Perm, 614068, Russia; E-mail: rperevoshchikov@bk.ru)

ORCID: 0000-0001-6451-8202

**Anna A. Perevoshchikova** – Junior Researcher at the Research Laboratory for Biogeochemistry of Man-Made Landscapes, Institute of Natural Science at the Perm State National Research University; PhD student at the Department of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

ORCID: 0000-0003-1769-7740

**Elena A. Menshikova** – Leading Researcher of the Ecological Geology Research Laboratory of the Natural Science Institute of Perm State National Research Polytechnic University, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Perm, Russia

ORCID: 0000-0001-5199-7590

**For citation: Perevoshchikov R.D., Perevoshchikova A.A., Menshikova E.A. Impact of mining and fuel and energy enterprises on the radiation background of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 70-83. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-70-83**