

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

А. Ю. Озерский<sup>1,2</sup>, Д. А. Озерский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

<sup>2</sup>АО «Красноярская горно-геологическая компания», Красноярск

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2024 г.

*Изучена распространенность естественных радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в основных типах пород участка «Енисейский» – архейских гнейсах и долеритах. Установлено, что они не создают угроз облучения персонала в подземном сооружении, радиационного загрязнения окружающей среды и характеризуются невысокой эффективной удельной активностью, допускающей их использование во всех видах строительства. Рассматривается распространенность естественных радионуклидов (ЕРН), отличающаяся низкими средними концентрациями, за исключением  $^{232}\text{Th}$ . Показаны различия в активности и количестве ЕРН в верхней части массива пород (до 150 м), где выявлены пониженные концентрации урана, и его глубинной зоне. Приблизительно оценены ресурсы подземных вод по выносу урана из верхней зоны.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, естественные радионуклиды, геохимия, торий, уран, удельная активность, архей, гнейсы.

### Введение

В 2023 году, после почти десятилетнего перерыва, были возобновлены работы на участке «Енисейский», целью которых является проведение стадии геологической разведки и экспертиза данных по оценке пригодности площадки для изоляции радиоактивных отходов (РАО).

Предыдущие стадии геологоразведочных работ (поисковая и оценочная) были выполнены достаточно давно, последние глубокие скважины, вскрывшие целевой интервал захоронения РАО, были пробурены АО «Красноярская горно-геологическая компания» (АО «Красноярскгеология») в 2014 году. В результате экспертизы результатов геологического изучения на оценочной стадии Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) Роснедра, в 2016 году участок «Енисейский» был признан

потенциально пригодным для опытной изоляции РАО [9]. На отрезке времени между 2014 и 2023 гг. недра этого участка инвазивными методами не исследовались. Геологи и ученые различных организаций выполняли переинтерпретацию материалов, полученных АО «Красноярскгеология» вместе с организациями-соисполнителями в 2010–2014 гг. [7], [11], [21]. Использовались документация керна скважин, данные геофизического каротажа, результаты опытно-фильтрационных работ, протоколы лабораторных испытаний проб воды и керна и даже его фотографии. Некоторые итоги этих работ были опубликованы и обсуждались на семинарах в ИБРАЭ РАН. Однако все эти действия имели паллиативный характер, так как основывались на прошлой и быстро стареющей информации,

которая уже не могла дать ответы на вопросы, поставленные ГКЗ при государственной экспертизе материалов.

В 2022–2023 гг. ИБРАЭ РАН при участии АО «Красноярскгеология» был разработан проект геологоразведочной стадии изучения участка «Енисейский», который учел все замечания и предложения, сделанные ГКЗ Роснедра по результатам поисковой и оценочной стадий, и в итоге получил в 2023 году положительное заключение ФГКУ «Росгеолэкспертиза». Это позволило начать работы по его геологической разведке.

Если на предшествующих стадиях изучения недр участка «Енисейский» основное внимание уделялось глубинной части породного массива, то геологическая разведка в 2023 году была начата с исследования самой верхней его части до 150 м, где располагается зона приповерхностной трещиноватости, которая на начальных стадиях работ была изучена преимущественно геофизическими методами, практически без рассмотрения вещественного состава коренных пород. Изучение приповерхностной зоны массива горных пород участка «Енисейский» призвано решить целый ряд задач, связанных с обеспечением долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). Кроме уточнения геолого-структурных особенностей участка, важное значение имеют вопросы геомеханической прочности верхней части массива, а также ее роль в формировании подземных вод и в питании ими глубинных слоев, а также проблемы массопереноса природных и техногенных веществ.

Одним из направлений геологического изучения участка «Енисейский» являются геохимические и, в частности, радиогеохимические исследования. Нужно сказать, что отечественные нормативные требования к изучению геохимических условий сформулированы довольно схематично и неконкретно. В Федеральных нормах и правилах НП-055-14 записано «в районе размещения ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должны быть исследованы ... геохимические ... условия, определяющие выход радионуклидов в окружающую среду, их перенос и накопление» [15, п. 36]. В Приложении 4 к НП-055-14 «Перечень исходных событий, учитываемых при оценке долговременной безопасности системы глубинного захоронения твердых радиоактивных отходов» рекомендовано учитывать «физико-химическое (геохимическое) взаимодействие РАО со средами ближней зоны ПЗРО», причем это относится к «внутренним воздействиям», а не к внешним факторам района размещения ПЗРО. Содержание изучения геохимических условий в НП-055-14 не изложено.

Содержание требований к геохимической информации подробно и ясно приведены в Руководстве МАГАТЭ [27], согласно которому исследования геохимических условий предоставляют информацию о «химическом, радиохимическом и минералогическом составе пород» [27, п. 419а]. Таким образом, эти сведения считаются необходимыми для обоснования пригодности участка для окончательной изоляции РАО.

Хотя изучение массива архейских пород участка «Енисейский» показало в общем очень невысокие значения природной радиоактивности, их анализ представляется важным исходя из следующих обстоятельств:

1) в глубоких подземных выработках, не имеющих контакта с наземной атмосферой, даже небольшая активность ЕРН с неизбежностью будет вызывать некоторое повышение дозовых нагрузок на персонал, работающий в подземном сооружении;

2) извлечение горных пород на поверхность при строительстве подземного сооружения требует экологической (в том числе радиационной) оценки воздействия отвальных пород на окружающую среду;

3) большое количество геохимических и радиогеохимических данных, полученных при изучении массива, представляет несомненный интерес для профессионального сообщества, занимающегося исследованиями докембрия Южно-Енисейского кряжа.

Исходя из перечисленных соображений результаты геохимических и радиогеохимических исследований были опубликованы по окончании начального этапа поисково-оценочных работ в 2012 году [16], [17], а также после второго этапа оценочной стадии, предусматривавшего расширение целевого интервала [18]. Эти материалы основаны на информации, полученной в предшествующие годы при проведении на участке поисково-оценочных работ. В них характеризуется в основном глубинная часть массива пород, в том числе целевой интервал, предназначенный для размещения РАО.

В настоящей статье, наряду с данными предшествующих лет, рассмотрен уникальный материал, полученный при радиогеохимическом опробовании коренных архейских пород, залегающих в верхней части массива до глубины 150 м. Кроме этого, данные предшествующих лет были дополнены радиогеохимической информацией, полученной в 2013 году при бурении изыскательских скважин, что позволило существенным образом повысить достоверность геохимических оценок глубинной зоны участка.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являются коренные породы, слагающие недра участка «Енисейский» и распространенные в них ЕРН ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ). В геолого-структурном отношении он принадлежит к Ангаро-Канскому террейну (выступу) Енисейского кряжа, относящегося к юго-западному складчатому байкальскому обрамлению Сибирского кратона, и расположенного северо-восточнее Красноярска, в 4–5 км от р. Енисей, в пределах закрытого административно-территориального образования г. Железногорска (рис. 1).

Радиогеохимические исследования выполнялись в составе большого комплекса геологоразведочных и изыскательских работ (табл. 1). Основным методом изучения участка недр было бурение скважин до глубины 700 м.

Скважинные исследования решали большой комплекс разнообразных задач: геологических, структурных, гидрогеологических, инженерно-геологических и др. Одной из них было изучение естественной радиоактивности массива пород, проводившееся методами геофизического каротажа в скважинах и лабораторными исследованиями проб.

Во всех скважинах специалистами Южной геофизической экспедиции АО «Красноярскгеология» выполнен комплекс геофизического каротажа. Радиоактивные свойства пород определялись методом гамма-каротажа, при котором измерения активности выполнялись скважинным радиометром КУРА-2М. Масштаб регистрации интенсивности гамма-излучения по разрезам скважин составлял 2,5–5 мкР/ч на 1 см при скорости записи до 300 м/ч.

Основной объем радиогеохимической информации был получен по результатам гамма-спектрометрического анализа 218 проб, отобранных из керна. При этом 164 пробы из керна, отобранного в период 2010–2014 гг., характеризуют глубинную часть массива, а 54 пробы 2023 года — его верхнюю часть. Анализы



Рис. 1. Обзорная геологическая карта [18]

Осадочные отложения:

Ю юрские; С каменноугольные; Д девонские.

Метаморфические породы:

Є кембрийские; PR протерозойские; AR архейские.

Магматические породы:

Г граниты, гранодиориты; δ диориты; Г габбро, долериты; Ш щелочные граниты, сиениты; Г границы разновозрастных геологических образований, достоверные (а) и предполагаемые (б); Р разрывные нарушения, достоверные (а) и предполагаемые (б); ★ участок «Енисейский»

выполнялись в разные годы в аккредитованных лабораториях: Центральной лаборатории ОАО «Красноярскгеология», в лаборатории Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае» и в лаборатории изотопных методов анализа Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ФБГУ «ВИМС»). Во всех 218 пробах гамма-спектрометрическим анализом была измерена удельная активность основных ЕРН:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ .

Таблица 1. Основные виды и объемы радиогеохимического изучения недр участка «Енисейский» в 2010–2023 гг.

Виды исследований, единицы измерений	Поиски и оценка участка (2010–2012 гг.)	Инженерные изыскания (2013–2014 гг.)	Геологическая разведка (начальный этап) 2023 г.
Количество скважин	14	6	10
Объем бурения, п. м.	7602,5	2657	1651,8
Геофизический гамма-каротаж, п. м.	7575	2098	1598,5
Гамма-спектрометрия проб пород, проб.	101	63	54
Альфа-спектрометрия проб пород, проб.	–	–	54



Кроме того, в 54 образцах начального этапа геологической разведки этим же способом были также определены активности дочерних изотопов тория-232 ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ), причем значения данных показателей оказались близки между собой, что говорит о равновесии между ними. Распределение тория и его дочерних изотопов практически одинаково, что позволяет ограничиться в этой статье описанием закономерностей распространенности родоначальника ряда.

Для полной радиогеохимической характеристики пород важны не только знания об активности радионуклидов, но и об их массовой концентрации, а также о торий-урановом отношении (Th/U), которое вычисляется по содержанию ЕРН. Упомянутые показатели дают возможность сопоставления результатов с глобальным и региональным фоном и судить о геохимических процессах в недрах. Переход от активности радионуклида  $I$  (в Бк) к его массе  $Q$  (в г) выполнен по формуле [24]:

$$Q = \frac{IA}{\lambda \cdot 6,02 \cdot 10^{23}},$$

где  $A$  — атомная масса,  $6,02 \cdot 10^{23}$  — число Авогадро,  $\lambda$  — константа распада,  $\text{с}^{-1}$  ( $\lambda = 0,693 : T$ , где  $T$  — период полураспада, с). При расчетах массовая концентрация  $^{238}\text{U}$  вычислена исходя из предположения о его равновесии с  $^{226}\text{Ra}$ .

Из результатов прямых лабораторных измерений удельной активности выполнялись расчеты удельной эффективной активности естественных радионуклидов ( $A_{\text{эфф}}$ ) [12].

Для обобщенной характеристики и сопоставления различных радиогеохимических показателей авторами использовались их статистические показатели распределения: медиана, среднее арифметическое, минимальное и максимальное значения и коэффициент вариации. Статистическая обработка выполнялась отдельно по двум основным петрографо-генетическим типам пород (гнейсам и долеритам) в соответствии с их наименованиями, данными им геологами при описании керн.

В качестве фоновых характеристик, более обоснованными для полученных данных, предлагается считать медианные значения, позволяющие применять наиболее достоверные оценки аналитических выборок с неизвестным характером распределения активностей, которое для  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  отличается от гауссовского и является бимодальным для верхней зоны, а для тория — для всего массива распределение  $A_{\text{эфф}}$  близко к нормальному (рис. 2).

В этих условиях медиана, по-видимому, является наиболее обоснованной альтернативой

среднему арифметическому, так как она устойчива к аномальным концентрациям и дает наиболее достоверную оценку геохимического фона [10], хотя в других публикациях таковыми считаются средние арифметические значения, так как они используют все фактически полученные данные [17].

В протоколах лабораторных измерений активности некоторых изотопов показаны как не превышающие чувствительности (порога) метода анализа (например,  $< 20$ ). При статистической обработке таких результатов они, согласно «Инструкции...» [5], были заменены на половину этого показателя. В тех случаях, когда вычисленные величины фоновых активностей (медиана или среднее арифметическое) не превышали значения чувствительности анализа, они были заменены на лабораторные значения чувствительности.

#### Результаты радиогеохимических исследований и их обсуждение

**Породы и их удельная активность.** В геологическом строении участка «Енисейский» принимают участие гнейсы и кристаллические сланцы атамановской серии канского метаморфического комплекса раннего архея. Сланцево-гнейсовая толща пронизана двумя комплексами даек докембрийского возраста основного состава. Все коренные породы участка подверглись региональному метаморфизму гранулитовой фации, который преобразовал первичный осадочный протолит [3] в гнейсы и кристаллические сланцы, а дайки, первоначально представленные долеритами и габбро-диабазами, превратил в глубоко метаморфизованные, метасоматически измененные породы, зачастую перешедшие в ортоамфиболиты. В дальнейшем в статье гнейсы и относительно редкие кристаллические сланцы кратко именуется гнейсами, а породы даек — долеритами.

Гнейсы слагают примерно 80% геологического разреза участка. По содержанию кремнезема примерно 2/3 их проб относятся к кислым породам (аналогам гранитов), а 1/3 — к средним (аналогам диоритов). В разрезе коренных пород участка доля долеритов достигает 17–20%. По содержанию кремнезема они относятся к основным породам (аналогам габбро).

Кроме гнейсов и долеритов 2–3% пород массива представлены жильными образованиями — лампрофирами, пегматоидами, матасоматитами, порфиритами и др. Их участие в формировании радиоактивного фона незначительно, кроме того, они пока еще исследованы

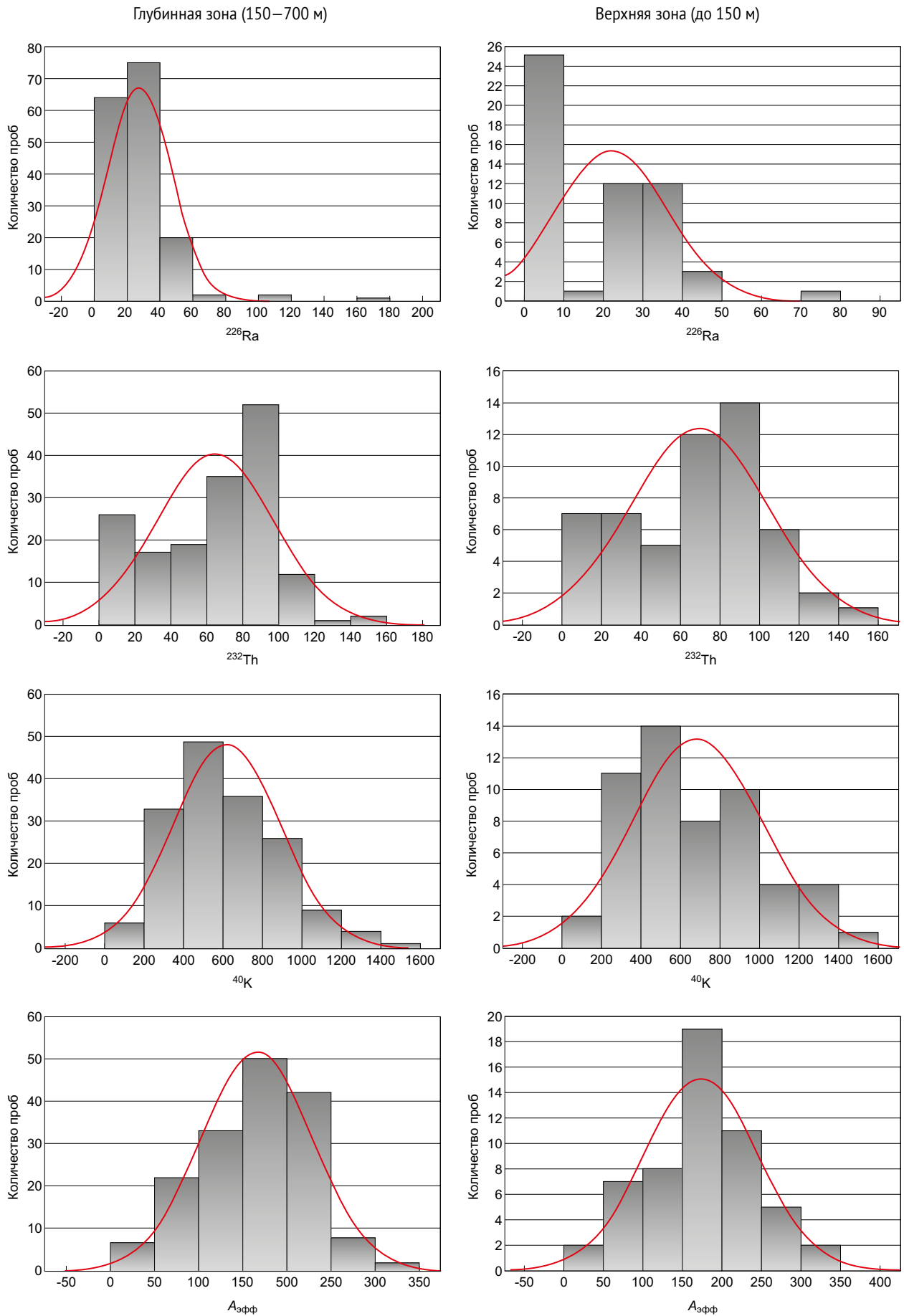


Рис. 2. Гистограммы распределения ЕРН и эффективной удельной активности ( $A_{\text{эфф}}$ ), Бк/кг

единичными пробами, поэтому жильные образования в статье не рассматриваются.

Низкая радиоактивность и существенные отличия в активности основных пород массива были выявлены на стадии полевых работ, при проведении гамма-каротажа. Минимальными значениями мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) характеризовались покровные отложения (4–8 мкР/ч) и дайки долеритов (от 2 до 20 мкР/ч), а максимальные — были характерны для гнейсов (2–55 мкР/ч). Гамма-каротаж не показал явных закономерностей изменения МЭД с глубиной скважин. Небольшое ионизирующее излучение от пород не создает опасности для персонала, который будет работать в их окружении. Индивидуальная годовая эффективная доза внешнего облучения даже для максимальной МЭД (55 мкР/ч) составит всего около 1 мЗв/год при 36-часовой рабочей неделе, что значительно ниже санитарных норм [12].

Причиной невысокой МЭД в скважинах является низкая активность ЕРН во всех типах пород участка (табл. 2). Интегральным критерием,

**Таблица 2. Показатели распределения удельной активности ЕРН и эффективной удельной активности ( $A_{эфф}$ ) в верхней и глубинной зонах участка «Енисейский», Бк/кг**

Зоны	ЕРН	Медиана	Среднее	Станд. откл.	Минимум	Максимум
Верхняя часть массива, глубина до 150 м (54 пробы)	ГНЕЙСЫ (N=36)					
	$^{226}\text{Ra}$	20,5	22,7	15,7	<20	80
	$^{232}\text{Th}$	86,5	86,8	24,9	<20	146
	$^{40}\text{K}$	793,0	768,1	302,9	352	1407
	$A_{эфф}$	196,8	204,7	56,6	70,2	343,3
	ДОЛЕРИТЫ (N=13)					
	$^{226}\text{Ra}$	22,0	21,2	10,2	<20	37
	$^{232}\text{Th}$	39,0	33,7	15,3	<20	55
	$^{40}\text{K}$	378,0	373,5	157,3	53	563
	$A_{эфф}$	108,7	98,6	40,3	27,8	159,2
Глубинная часть массива, глубина 150–700 м (164 пробы)	ГНЕЙСЫ (N=113)					
	$^{226}\text{Ra}$	24,0	28,2	16,6	4,5	112,3
	$^{232}\text{Th}$	81,4	80,3	23,0	<7	148,2
	$^{40}\text{K}$	662,0	710,3	254,5	271,6	1411
	$A_{эфф}$	198,0	194,8	43,8	71	318
	ДОЛЕРИТЫ (N=51)					
	$^{226}\text{Ra}$	20,0	25,3	24,7	2,2	168,3
	$^{232}\text{Th}$	25,0	28,1	17,9	0,9	86,5
	$^{40}\text{K}$	415,0	404,3	166,3	40,7	869
	$A_{эфф}$	104,0	97,4	46,4	12	227

который позволяет дать оценку изученных пород по радиационно-гигиеническим показателям, является эффективная удельная активность —  $A_{эфф}$  [12]. По величине этого показателя, не превышающего ни в одной пробе 370 Бк/кг, все породы участка полностью соответствуют требованиям I класса для материалов, применяемых в строительстве (табл. 2), то есть при их извлечении из подземных выработок они могут быть использованы во всех его видах.

Эффективная удельная активность гнейсов (в среднем около 200 Бк/кг) примерно в два раза выше, чем долеритов. При этом она почти одинакова в верхней и глубинной частях массива. Схожим и близким к нормальному является распределение  $A_{эфф}$  в приповерхностной и глубинной частях (рис. 2).

Исходя из особенностей расчета  $A_{эфф}$  [12] следует, что в среднем половина эффективной удельной активности обеспечивается торием-232, распределение активности этого изотопа является бимодальным и приблизительно одинаковым для верхней и глубинной частей массива (рис. 2). Это говорит об отсутствии заметного влияния гипергенных процессов на распространение этого нуклида в недрах, а также о наличии по меньшей мере двух различных мест его локализации.

В отличие от тория, распределения активностей  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  существенно разнятся для верхней и глубинной частей массива.

$^{40}\text{K}$  обеспечивает в среднем около 35 % эффективной удельной активности. В глубинной зоне его распределение близко к нормальному, а в верхней зоне оно становится отчетливо бимодальным, что говорит о влиянии гипергенеза (рис. 2). Более заметно гипергенез проявляется в распределении  $^{226}\text{Ra}$ : в глубинной части массива распределение этого нуклида близко к логнормальному, а в приповерхностной зоне радий распределен бимодально, с уменьшением величин максимальных активностей (рис. 2). Это говорит о выносе этого нуклида из зоны приповерхностной трещиноватости.

Различия в распределении ЕРН в верхней и глубинной частях породного массива также хорошо иллюстрируют соотношения фоновых значений активности (медиан и средних) (табл. 2). Так, для гнейсов характерна более высокая активность  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в верхней части и  $^{226}\text{Ra}$  — на глубине массива. Что касается долеритов, то в приповерхностных дайках она выше у  $^{232}\text{Th}$ , а в глубинных — у  $^{40}\text{K}$ . Для  $^{226}\text{Ra}$  медианы и средние противоречивы, что можно объяснить относительно небольшим количеством лабораторных анализов из этих пород.

**Распространенность ЕРН в породах.** Таким образом, выявленная изменчивость в характере распределения ЕРН и в значениях активности свидетельствуют об отличиях между верхней и глубинной частями породного массива участка «Енисейский». Однако удельная активность дает лишь косвенное представление о количестве ЕРН, участвующих в миграции. Оценить процессы массопереноса возможно только по их концентрациям (табл. 3), которые характеризуются в целом низкими значениями относительно кларков литосферы, что совпадает с известным положением радиогеохимии, утверждающим, что с ростом метаморфизма пород нарастает их деплетированность ураном и торием [1], [10], [24]. Однако это положение не подтверждается для тория в гнейсах, где его содержание в 1,7 раза выше кларка (среднего содержания в литосфере). Во всех остальных случаях концентрации ЕРН близки к их кларкам или ниже них.

Особенно низкими количествами ЕРН характеризуются долериты, в которых средние и

медианные значения всех нуклидов ниже кларка. Основные породы, к которым они принадлежат, большинством ведущих ученых признаются обедненными ураном и торием [1], [4], [23], [24]. В континентальных базальтах и диабазах средние содержания урана и тория равны (г/т) 0,7 и 2,3, а в интрузивных габбро-диабаз (г/т) — 0,6 и 1,8 соответственно [23]. Количества этих двух ЕРН в дайках участка существенно выше указанных для континентальных базитов, что может быть объяснено либо привнесом этих элементов при метасоматозе, либо за счет «загрязнения» базальтового расплава веществом окружающих пород. Необходимо отметить, что долериты верхней части участка содержат в 1,5 раза больше тория, чем в глубинной части массива, тогда как концентрации других ЕРН близки.

Рассмотрение массовых концентраций ЕРН в гнейсах показывает, что они характеризуются существенно повышенными значениями для тория. На близкие к нему концентрации, выявленные авторами, в архейских гранулитовых гнейсах Ангаро-Канского террейна указывают также Ф. П. Кренделев [8]: 18,1–28,5 г/т; А. В. Маслов [10]: 19,2±11,6 г/т; А. Д. Ножкин [13], [14]: 17–20 г/т, а для участка «Енисейский» — А. Ю. Озерский [17]: 16,9 г/т.

Причина повышенных концентраций Th в гнейсах пока неясна и требует дальнейшего изучения. В метаморфических процессах торий и уран считаются высокоподвижными элементами [4], что чаще всего приводит к деплетированию ими пород. Однако в отдельных случаях в архейских породах гранулитовой фации отмечаются очень высокие содержания тория и урана: в кварцево-полевошпатовых ортогнейсах Th — 90 г/т, U — 46 г/т, в чарнокитах Th — 400 г/т, U — 52 г/т, при этом отмечается, что в архейских породах амфиболитовой фации они значительно ниже [26]. В то же время ряд исследователей считает, что их самые высокие концентрации (26,5 и 3,5 г/т) характерны для эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма [4].

Вместе с тем по мере углубления процессов ультраметаморфизма, вплоть до широкого палингенеза, тенденция выноса радиоэлементов, продолжающая тенденцию прогрессивного метаморфизма, сменяется на противоположную, а именно — на мобилизацию рассеянных радионуклидов и формирование расплавов повышенной радиоактивности [1]. По этой причине источником повышенных концентраций тория в гнейсах можно считать первичное осадочное вещество протолита, но также не исключено его поступление из магматического очага

**Таблица 3. Показатели распределения концентраций ЕРН (г/т) и отношения Th/U в верхней и глубинной зонах участка «Енисейский», Бк/кг**

Зоны	ЕРН	Кларк*	Медиана	Среднее	Станд. откл.	Минимум	Максимум
Верхняя часть массива, глубина до 150 м (54 пробы)	ГНЕЙСЫ (N=36)						
	<sup>238</sup> U	2,6	1,6	1,8	1,3	<0,8	6,4
	<sup>232</sup> Th	12	21,3	21,4	6,1	2,5	36,0
	<sup>40</sup> K	2,5	3,2	3,1	1,2	1,4	5,6
	Th/U	4,6	12,1	16,4	8,9	1,0	31,3
	ДОЛЕРИТЫ (N=13)						
	<sup>238</sup> U	2,6	1,8	1,7	0,8	0,8	3,0
	<sup>232</sup> Th	12	9,6	8,3	3,8	2,5	13,6
	<sup>40</sup> K	2,5	1,5	1,5	0,6	0,2	2,2
	Th/U	4,6	4,6	5,2	2,6	3,1	11,0
Глубинная часть массива, глубина 150–700 м (164 пробы)	ГНЕЙСЫ (N=113)						
	<sup>238</sup> U	2,6	1,9	2,3	1,3	<0,8	9,0
	<sup>232</sup> Th	12	20,0	19,7	5,7	<1,8	36,4
	<sup>40</sup> K	2,5	2,6	2,8	1,0	1,1	5,6
	Th/U	4,6	9,6	11,2	7,4	0,5	58,3
	ДОЛЕРИТЫ (N=51)						
	<sup>238</sup> U	2,6	1,6	2,0	2,0	0,2	13,5
	<sup>232</sup> Th	12	6,1	6,9	4,4	0,2	21,2
	<sup>40</sup> K	2,5	1,7	1,6	0,7	0,2	3,5
	Th/U	4,6	3,5	4,3	2,8	0,5	13,6

\* Кларк — среднее содержание в литосфере, по В. В. Иванову [4]

Нижнеканского массива, с породами которого отмечается определенное геохимическое сходство [17].

Средняя концентрация тория в верхней части массива несколько выше, чем в глубинной, однако это различие невелико. Подобная закономерность характерна и для  $^{40}\text{K}$  (табл. 3).

Распространенность урана (радия) в основных породах участка неравномерна. В долеритах медианы и средние концентрации этого нуклида показывают противоположные тенденции распространенности: в верхней зоне медианы выше, чем в глубинной, тогда как для средних значений наблюдается обратное отношение.

Для гнейсов, залегающих в глубинной зоне, характерны более высокие величины медианы и среднего, что говорит о существенных различиях этих зон по концентрациям урана (радия). Отклонение в распределении урана в верхней и глубинной зонах было проверено статистическими непараметрическими критериями, поскольку распространенность этого нуклида существенно отличается от нормальной (рис. 2). По критерию Колмогорова — Смирнова выборки верхней и глубинной зон имеют различные распределения, что хорошо видно на рис. 2. В то же время U-критерий Манна — Уитни отвергает нулевую гипотезу о совпадении выборок. Эти результаты в совокупности с анализом видимой разницы средних и медиан можно интерпретировать как подтверждение выноса урана (радия) из верхней зоны трещиноватости, но процесс этот пока еще не нарушил существенным образом единое геохимическое поле его распространенности в недрах участка «Енисейский». Вместе с тем можно считать доказанным, что в верхней части этого породного массива концентрации урана существенно ниже, чем в его глубинной части и имеет место его вынос из верхней зоны, которая характеризуется повышенной трещиноватостью. Инфильтрация атмосферных осадков, насыщенных кислородом и диоксидом углерода, безусловно способна к выщелачиванию урана из пород верхней зоны и формированию геохимической дифференциации между верхней и глубинной зонами. В области гипергенеза он считается одним из активных водных мигрантов, причем, по мнению Б. Л. Рыбалова и Б. И. Омеляненко [22], в кислых породах, содержащих его более 4–5 г/т, он находится в растворимой форме, вне породообразующих и акцессорных минералов.

Совместное рассмотрение массовых концентраций урана и тория в гнейсах показывает, что они характеризуются большими величинами отношения  $\text{Th}/\text{U}$ , чем для нормальных пород

гранито-гнейсового ряда. Долериты по данному показателю также отличаются от обычных основных магматических пород, они ближе к гранодиоритам. На диаграмме U-Th хорошо заметно, что пробы из верхней части недр участка отличаются сдвигом в сторону увеличения торий-уранового отношения, при этом он проявляется как для гнейсов, так и для долеритов (рис. 3).

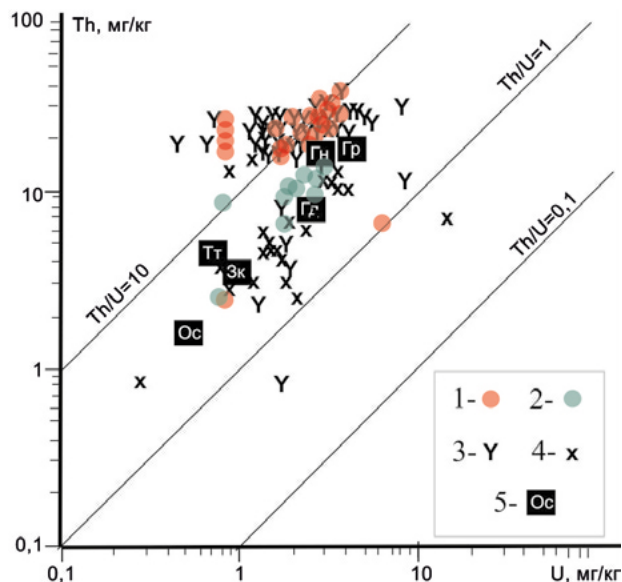


Рис. 3. Радиогеохимическая специализация пород участка «Енисейский».

Пробы 2023 года [18]: 1 — гнейсы; 2 — метадолериты. Пробы поисково-оценочной стадии 2010–2013 гг.: 3 — гнейсы; 4 — метадолериты. 5 — средние характеристики пород земной коры по Л. П. Рихванову и др., [20]. Зк — континентальная земная кора, Ос — основные изверженные породы, Тт — тоналит-трондьемитовая формация, Гд — гранодиориты. Гр — граниты, Гн — гнейсы биотитовые

Выявленное существенное снижение концентраций урана в верхней части скального массива может объясняться либо различиями составов пород в верхней и глубинной частях массива, либо оно может быть следствием их изменения при выветривании и выносе этого радионуклида при инфильтрации атмосферных осадков. Поскольку при геологическом описании и геохимическом опробовании не было выявлено различий в составе пород по всему разрезу до глубины 700 м, то более предпочтительной надо считать гипотезу выноса урана из верхней зоны массива. В его нижней части удельные активности нуклидов относительно стабильны, и устойчивых закономерных изменений активности ЕРН с глубиной не наблюдается.

**Оценка ресурсов воды для выноса урана.** Основываясь на гипотезе выноса урана, попробуем оценить тот расход воды, который растворил его в гнейсах массива и вынес в гидрографическую сеть участка. Расчет выполнен для



абстрактного блока пород единичной площадью  $1 \text{ м}^2$  и мощностью  $150 \text{ м}$ . Таким образом, его объем составляет  $150 \text{ м}^3$ . При средней плотности гнейсов  $2,77 \text{ т/м}^3$  масса пород в нем составит  $150 [\text{м}^3] \times 2,77 [\text{т/м}^3] = 416 \text{ т}$ . Содержание урана в глубинных неизменных породах —  $2,3 \text{ г/т}$ , в верхней зоне —  $1,8 \text{ г/т}$ , убыль его количества —  $0,5 \text{ г/т}$ . Всего из рассматриваемого блока было унесено подземными водами  $0,5 [\text{г/т}] \times 416 [\text{т}] = 208 \text{ г}$  урана.

Тектоническое воздымание Южно-Енисейского кряжа началось в раннемеловую эпоху [6]. Примем, что к середине мелового периода Атамановский хребет приобрел высотное положение, близкое к современному, и в породах сформировалась региональная трещиноватость. Таким образом, приблизительное время инфильтрации и геологической работы воды по их выщелачиванию оценивается в  $100 \text{ млн лет}$  или  $3,65 \cdot 10^{10} \text{ сут}$ .

Вторым допущением, вытекающим из принципа аналогии, является неизменность концентрации урана в подземных водах за все время фильтрации, среднее значение которой в зоне континентального выщелачивания —  $0,56 \text{ мкг/л}$  или  $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ г/л}$  [25].

При такой концентрации для растворения  $208 \text{ г}$  урана из пород понадобится  $371 \text{ тыс. м}^3$  воды. Поделив ее объем на время фильтрации, получим расход  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{год}$ . Поскольку весь расчет велся для площади в  $1 \text{ м}^2$ , эта величина характеризует модуль подземного стока, отнесенный к данной площади. Таким образом, годовой слой подземного стока в кристаллических породах верхней части массива составит  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  или  $3,7 \text{ мм}$ .

Зная величину расхода подземного стока, можно также приблизительно оценить коэффициент фильтрации того блока пород, для которого выполнен расчет. В соответствии с известным законом Дарси:

$$Q = kmBi,$$

где  $Q$  — расход воды,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  $k$  — коэффициент фильтрации,  $\text{м/сут}$ ;  $m$  — мощность пород,  $\text{м}$ ;  $B$  — ширина потока,  $\text{м}$ ;  $i$  — градиент напора. В нашем случае, при вертикальной фильтрации вниз,  $i$  равно единице, а  $mB$  для рассматриваемых условий —  $1 \text{ м}^2$ , поэтому  $Q = k = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ м/сут}$ . Эта величина хорошо соотносится с коэффициентами фильтрации, реально наблюдавшимися при опытно-фильтрационных работах на оценочной стадии геологических исследований, имеющими порядок  $n \cdot 10^{-4} \text{ м/сут}$  [11], с учетом того, что особенности данных испытаний привели к некоторому завышению показателей  $k$  [18].

Ученые из Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН, используя результаты гидрологических наблюдений на водотоках участка и моделирование, рассчитали модуль зимнего меженного подземного стока, которые «для участков разгрузки подземных вод в реки и ручьи варьируют от  $0-1$  до  $4-6 \text{ л/с-км}^2$ » [2]. На схеме распределения подземного стока территория площадки ПГЗРО в среднем характеризуется модулем  $3 \text{ л/с-км}^2$ , которому примерно соответствует слой, равный  $90 \text{ мм}$ , что на порядок превышает предлагаемую величину этого показателя.

Эти данные, по сути, представляют собой инфильтрационное питание водотоков и русловых потоков,двигающихся по кровле кристаллического массива, но проникающие внутрь него своей незначительной частью.

Предлагаемая авторами величина слоя подземного стока характеризует ту малую долю выпавших атмосферных осадков, которые проникают в глубь массива кристаллических пород и медленно совершает геологическую работу по выщелачиванию урана и, вероятно, других химических элементов.

## Заключение

На основе использования материалов поисково-оценочной стадии работ  $2010-2014 \text{ гг.}$  и данных начального этапа геологической разведки участка «Енисейский» в  $2023 \text{ г.}$  были изучены активность и ЕРН ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в основных типах слагающих его горных пород (архейских гнейсах и долеритах). Исследование показало, что их основные типы характеризуются невысокой эффективной удельной активностью ( $A_{\text{эфф}}$ ), допускающей применение этих пород во всех видах строительства. Они не создают угроз облучения персонала в подземном сооружении и радиационного загрязнения окружающей среды. Более высокой активностью обладают гнейсы (средняя  $A_{\text{эфф}} \approx 200 \text{ Бк/кг}$ ), тогда как для метадолеритов она приблизительно в два раза ниже (средняя  $A_{\text{эфф}} \approx 100 \text{ Бк/кг}$ ). Примерно половина этого показателя обеспечивается  $^{232}\text{Th}$ .

Распространенность ЕРН характеризуется их низкими средними концентрациями, в большинстве случаев существенно меньшими кларков (среднего содержания в литосфере). Исключение составляет  $^{232}\text{Th}$ , содержание которого превышает кларк литосферы в  $1,7-1,8$  раза. Повышенные количества тория в гнейсах не характерны для пород архейского возраста и для гранулитовой фации их метаморфизма.

Выявлены различия в активности и распространенности ЕРН в верхней (до глубины 150 м) и в нижней частях массива пород. Наиболее значимым является существенно меньшее содержание  $^{238}\text{U}$  в верхней части массива (1,8 г/т) по сравнению с глубинной (2,3 г/т).

Пониженные концентрации урана в зоне трещиноватости гипотетически объясняются его выносом в гидрографическую сеть подземными водами, приближенно оцененные ресурсы которых, способные снизить концентрацию урана в верхней части участка на 0,5 г/т, могут быть обеспечены слоем подземного стока 3,7 мм или его модулем 0,12 л/с·км<sup>2</sup>.

### Литература

1. Арбузов С. И., Рихванов Л. П. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие. 2-е изд. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 300 с.
2. Владимиров К. В., Шварц А. А., Иноземцев С. А., Никуленков А. М., Румынин В. Г. Особенности формирования инфильтрационного питания подземных вод водосборов малых рек в контексте долговременной безопасности планируемого ПГЗРО (участок «Енисейский», Красноярский край) // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. / Институт горного дела УрО РАН. — Екатеринбург, Институт горного дела УрО РАН, 2024. — С. 96–101.
3. Заблочкий К. А., Сопрончук В. Р. Реконструкция первичного состава раннедокембрийских метаморфических пород юга Енисейского кряжа // Проблемы геологии и металлогении Красноярского края. — Новосибирск, 1989. — С. 100–109.
4. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов : Справочник. В 6 кн. / Под ред. Э. К. Буренкова. — М. : Недра, 1994.
5. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Утв. Мингео СССР 22.06.1982. — М. : Недра, 1983. 191 с.
6. История геологического развития // Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46 — Красноярск. Объяснительная записка. / Ред. Ю. С. Глухов. — Санкт-Петербург, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. — С. 212–219.
7. Кочкин Б. Т., Богатов С. А., Баринов А. С., Савельева Е. А., Уткин С. С. Эволюция геосферы на территории размещения ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 56–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
8. Кренделев Ф. П. Кларки радиоактивных элементов в породах докембрия Енисейского кряжа. — М. : Наука, 1971. 376 с.
9. Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В., Озерский А. Ю. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал. 2015. № 10. С. 59–63.
10. Маслов А. В. Метатерригенные породы архея (основные геохимические ограничения) // Геохимия. 2007. № 4. С. 370–389.
11. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
12. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47 // Российская газета. 11 сентября 2009, № 171/1(4995/1). Специальный выпуск. 8 с.
13. Ножкин А. Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирского кратона // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 5–16.
14. Ножкин А. Д., Дмитриева Н. В., Туркина О. М., Маслов А. В., Ронкин Ю. Л. Метапелиты нижнего докембрия Енисейского кряжа: РЗЭ-систематика, источники сноса, палеогеодинамика // Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 6. С. 796–801.
15. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. — М. : Ростехнадзор, 2014. 54 с.
16. Озерский А. Ю. Геохимические особенности нижнеархейских пород на участке вероятного подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 39–44.
17. Озерский А. Ю. Естественная радиоактивность раннеархейских пород на участке для глубинного захоронения радиоактивных отходов в южной части Енисейского кряжа // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции (Томск, 4–8 июня 2013 г.); Томский политехнический университет. — Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — С. 394–398.

18. *Озерский А. Ю.* Естественные радионуклиды в архейских породах на участке для глубинной изоляции радиоактивных отходов в южной части Енисейского кряжа // Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований. Всероссийская конференция, проводимая в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН. Москва, 29 ноября—1 декабря 2023 г. Материалы конференции. — М.: ИГЕМ РАН, 2023. — С. 487—490.
19. *Озерский А. Ю.* К вопросу изучения формирования химического состава подземных вод в массиве водонепроницаемых архейских пород в южной части Енисейского кряжа // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С. Л. Шварцева. — Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2023. — С. 269—272.
20. *Рихванов Л. П., Арбузов С. И. и др.* Радиоактивные элементы в окружающей среде // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311. № 1. С. 128—136.
21. *Румынин В. Г., Озерский А. Ю.* Изучение свойств трещиноватых кристаллических пород, определяющих долговременную безопасность пункта глубинного захоронения РАО на участке «Енисейский» (Нижне-Канский массив) // Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии: Сборник научных трудов. II Международная научно-методическая конференция / Санкт-Петербургский горный университет. — Санкт-Петербург, 2017. — С. 162—167.
22. *Рыбалов Б. Л., Омеляненко Б. И.* Источники рудного вещества эндогенных урановых месторождений. — М.: Наука, 1989. 275 с.
23. *Смыслов А. А.* Уран и торий в земной коре. — Л.: Недра, 1974. 231 с.
24. *Тутаева Н. А.* Ядерная геохимия. — М.: Изд-во МГУ, 2000. 336 с.
25. *Шварцев С. Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. — М.: Недра, 1978. 287 с.
26. *Andreoli M. A. G. et al.* Correlations between U, Th Content and Metamorphic Grade in the Western Namaqualand Belt, South Africa, with Implications for Radioactive Heating of the Crust // Journal of Petrology. 2006. Vol. 47. No. 6. Pp. 1095—1118.
27. Siting of geological disposal facilities: A safety guide. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1994. — Safety series No. 111-G-4.1, 33 p.

---

### Информация об авторах

*Озерский Андрей Юрьевич*, кандидат геолого-минералогических наук, главный гидрогеолог, АО «Красноярская горно-геологическая компания» (660049, Красноярск, ул. К. Маркса, д. 62), e-mail: oaju@krasgeo.ru; главный специалист по геологическим вопросам, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: ozerskiy@ibrae.ac.ru.

*Озерский Дмитрий Андреевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

### Библиографическое описание статьи

*Озерский А. Ю., Озерский Д. А.* Естественные радионуклиды в геологической среде участка «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 74—87. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-74-87.

## NATURAL RADIONUCLIDES IN THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF THE YENISEISKIY SITE (THE KRASNOYARSK TERRITORY)

Ozerskiy A. Yu.<sup>1,2</sup>, Ozerskiy D. A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC “Krasnoyarsk Geology”, Krasnoyarsk, Russia

Article received on September 23, 2024

The paper explores the abundance of natural radionuclides ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) in the main types of host rocks available at the Yeniseiskiy site (Archaean gneisses and dolerites). The study shows that the host rocks do not pose any risks associated with personnel exposure in the underground structures, radiation contamination of the environment and are characterized by low effective specific activities, i.e., the rocks are authorized to be used in all types of construction. The paper considers the abundance of radionuclides characterized by low average concentrations with the exception of  $^{232}\text{Th}$ . It demonstrates the differences in the activity and abundance of natural radionuclides between the upper part of the rock massif (to a depth of 150 m) and its deep-seated part, as well as lower concentrations of uranium in the upper part of the massif. It roughly estimates the groundwater potential as regards uranium carry-over from the upper zone.

**Keywords:** radioactive waste, natural radionuclides, geochemistry, thorium, uranium, specific activity, Archean, gneisses.

### References

1. Arbuzov S. I. Rikhvanov L. P. *Geokhimiya radioaktivnykh elementov: uchebnoye posobiye* [Geochemistry of radioactive elements: tutorial]. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 300 p.
2. Vladimirov K. V., Schwartz A. A., Inozemtsev S. A., Nikulenkov A. M., Rumynin V. G. *Osobennosti formirovaniya infil'tratsionnogo pitaniya podzemnykh vod vodosborov malykh rek v kontekste dolgovremennoy bezopasnosti planiruyemogo PGZRO (uchastok "Yeniseyskiy", Krasnoyarskiy kray)* [Features inherent in the infiltration groundwater recharge in the catchments of small rivers evaluated under the long-term safety assessment of the planned DGR (Yeniseiskiy site, the Krasnoyarsk Territory)]. *Underground hydrosphere: proceedings of the All-Russian conference on groundwater in the East of Russia (XXIV Conference on groundwater in the east of Siberia and the Far East with international participation)*, Yekaterinburg, June 21–28, 2024 / Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Yekaterinburg, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2024. Pp. 96–101.
3. Zablotsky K. A., Sopronchuk V. R. *Rekonstruktsiya pervichnogo sostava rannedokembriyskikh metamorficheskikh porod yuga Yeniseyskogo kryazha* [Reconstructed primary composition of the Early Precambrian metamorphic rocks in the south of the Yenisei ridge]. *Problemy geologii i metallogenii Krasnoyarskogo kraya* [Problems of geology and metallogeny specific for the Krasnoyarsk Territory]. Novosibirsk, 1989. Pp. 100–109.
4. Ivanov V. V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Spravochnik* [Ecological geochemistry of elements. Handbook]. In 6 books. Ed. E. K. Burenkov. Moscow, Nedra Publ., 1994.
5. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions on geochemical prospecting methods for ore deposits]. Approved by the USSR Ministry of Geology on June 22, 1982. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.
6. *Istoriya geologicheskogo razvitiya* [History of geological development]. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Angara-Yenisei series. Sheet O-46 — Krasnoyarsk. Explanatory note. / Ed. Yu. S. Glukhov. Saint-Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2009. Pp. 212–219.
7. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Saveleva E. A., Utkin S. S. Evolution of geosphere at the site in Nizhnekanskiy massif meant for deep geological disposal. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65. DOI:10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
8. Krendelev F. P. *Klarki radioaktivnykh elementov v porodakh dokembriya Yeniseyskogo kryazha* [Clarks of radioactive elements in Precambrian rocks of the Yenisei ridge]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 376 p.
9. Lobanov N. F., Beigul V. P., Lopatin P. V., Ozerskiy A. Yu. *Vybor raspolozheniya i obosnovaniye prigodnosti uchastka dlya sozdaniya podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii na Nizhnekanskom massive gornykh porod* [Site selection and



assessment as regards its suitability for an underground research laboratory construction within the Nizhnekanskiy rock massif]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 59—63.

10. Maslov A. V. Metaterrigennyye porody arkheya (osnovnyye geokhimicheskiye ogranicheniya) [Metaterrigenous rocks of the Archean (main geochemical constraints)]. *Geokhimiya — Geochemistry*, 2007, no. 4, pp. 370—389.

11. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region). *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

12. Normy radiatsionnoy bezopasnosti NRB-99/2009. Sanitarnyye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 [Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09]. Approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on July 7, 2009, No. 47. *Rossiyskaya Gazeta*. September 11, 2009, No. 171/1 (4995/1). Special issue. 8 p.

13. Nozhkin A. D. Dokembriy yugo-zapadnoy okrainy Sibirskogo kratona [Precambrian of the southwestern margin of the Siberian craton]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 5—16.

14. Nozhkin A. D., Dmitrieva N. V., Turkina O. M., Maslov A. V., Ronkin Yu. L. Metapelity nizhnego dokembriya Yeniseyskogo kryazha: RZE-sistematika, istochniki snosa, paleogeodinamika [Lower Precambrian metapelites of the Yenisei Ridge: REE systematics, provenance areas, paleogeodynamics]. *Doklady Akademii nauk — Reports of the Academy of Sciences*, 2010, vol. 434, no. 6, pp. 796—801.

15. NP-055-14. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. "Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti"* [Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2014. 54 p.

16. Ozersky A. Yu. Geokhimicheskiye osobennosti nizhnearkheyskikh porod na uchastke veroyatnogo podzemnogo stroitel'stva v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha [Geochemical Features of Lower Archean Rocks in the Area of Prospective Underground Construction in the Southern Yenisei Range]. *Razvedka i okhrana neдр — Prospect and protection of mineral resources*, 2012, no. 7, pp. 39—44.

17. Ozersky A. Yu. *Yestestvennaya radioaktivnost' rannearkheyskikh porod na uchastke dlya glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha* [Natural radioactivity of

Early Archean rocks at the site of a deep disposal facility for radioactive waste in the southern part of the Yenisei Ridge]. *Radioaktivnost' i radioaktivnyye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* (Tomsk, 4—8 iyunya 2013 g.); Tomskiy politekhnicheskii universitet. [Radioactivity and radioactive elements in the human environment: Proceedings of the IV International Conference (Tomsk, June 4—8, 2013); Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University Publ., 2013. Pp. 394—398.

18. Ozersky A. Yu. *Yestestvennyye radionuklidy v arkheyskikh porodakh na uchastke dlya glubinnoy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha* [Natural radionuclides in Archean rocks at the site proposed for a deep disposal facility for radioactive waste in the southern part of the Yenisei Ridge]. *Mineraloobrazuyushchiye sistemy mestorozhdeniy vysokotekhnologichnykh metall-ov: dostizheniya i perspektivy issledovaniy. Vserossiyskaya konferentsiya, provodimaya v ramkakh meropriyatiy, posvyashchennykh 300-letiyu RAN* [Mineral-forming systems of high-tech metal deposits: research findings and prospects. All-Russian conference held as part of events dedicated to the 300<sup>th</sup> anniversary of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, November 29—December 1, 2023. Conference Proceedings. Moscow, IGEM RAS Publ., 2023. Pp. 487—490.

19. Ozersky A. Yu. *K voprosu izucheniya formirovaniya khimicheskogo sostava podzemnykh vod v massive vodonepronitsayemykh arkheyskikh porod v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha* [Exploring the evolution of chemical groundwater composition in the massif of impermeable Archean rocks in the southern part of the Yenisei ridge]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: trudy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem imeni professora S. L. Shvartseva* [Geological evolution of water interaction with rocks: proceedings of the V All-Russian scientific conference with international participation named after Professor S. L. Shvartsev]. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University Publ., 2023. Pp. 269—272.

20. Rikhvanov L. P., Arbuzov S. I., et al. Radioaktivnyye elementy v okruzhayushchey srede universiteta [Radioactive elements in the environment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 128—136.

21. Ruminin V. G., Ozersky A. Yu. *Izucheniye svoystv treshchinovatykh kristallicheskikh porod, opredelyayushchikh dolgovremennuyu bezopasnost' punkta glubinnogo zakhoroneniya RAO na uchastke*

- “Yeniseyskiy” (Nizhne-Kanskiy massiv) [Study of fractured crystalline rocks and their properties governing the long-term safety of the deep RW disposal facility at the Yeniseyskiy site (Nizhne-Kanskiy massif)]. *Sovremennoye sostoyaniye, tendentsii i perspektivy razvitiya gidrogeologii i inzhenernoy geologii: Sbornik nauchnykh trudov. II Mezhdunarodnaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya* [Current state, development trends and prospects for the hydrogeology and engineering geology: Collection of scientific papers. II International Scientific and Methodological Conference]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University Publ., 2017. Pp. 162–167.
22. Rybalov B. L., Omelyanenko B. I. *Istochniki rudnogo veshchestva endogennykh uranovykh mestorozhdenii* [Sources of ore matter in endogenous uranium deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 275 p.
23. Smyslov A. A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nedra Publ., 1974. 231 p.
24. Titaeva N. A. *Yadernaya geokhimiya* [Nuclear geochemistry]. Moscow, Moscow State University Publishing House Publ., 2000. 336 p.
25. Shvartsev S. L. *Gidrogeokhimiya zony gipergenezza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 287 p.
26. Andreoli M. A. G. et al. Correlations between U, Th Content and Metamorphic Grade in the Western Namaqualand Belt, South Africa, with Implications for Radioactive Heating of the Crust. *Journal of Petrology*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 1095–1118.
27. Siting of geological disposal facilities: A safety guide. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1994. Safety series No. 111-G-4.1, 33 p.

---

### Information about the authors

*Ozerskiy Andrey Yurievich*, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Hydrogeologist, JSC “Krasnoyarsk Geology” (62, K. Marx st., Krasnoyarsk, 660049, Russia), e-mail: oaju@krasgeo.ru; Chief Specialist in geological issues, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ozerskiy@ibrae.ac.ru.

*Ozerskiy Dmitriy Andreevich*, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Ozerskiy A. Yu., Ozerskiy D. A. Natural Radionuclides in the Geological Environment of the Yeniseyskiy Site (the Krasnoyarsk Territory). *Radioactive Waste*, 2024, no. 4 (29), pp. 74–87. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-74-87. (In Russian).