УДК 502/504

ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ЭЛЬКОНСКОГО УРАНОВОРУДНОГО РАЙОНА (АЛДАНСКИЙ ЩИТ) МЕТОДАМИ ПОЛЕВОЙ РАДИОМЕТРИИ

© 2022 г. П. И. Собакин^{а, *}, В. Е. Ушницкий^{b, **}, Я. Р. Герасимов^{а, *}

^а Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр. Ленина, 41, Якутск, 677980 Россия ^b Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), ул. Дзержинского, 3/1, Якутск, 677000 Россия

*e-mail: radioecolog@yandex.ru **e-mail:ushnitski@mail.ru Поступила в редакцию 21.08.2020 г. После доработки 06.10.2021 г. Принята к публикации 31.10.2021 г.

Методами полевой радиометрии проведены радиоэкологические исследования в Эльконском урановорулном районе, расположенном на северной окраине Алланского нагорья в Южной Якутии. Показано, что в осадочных, метаморфических и магматических породах района мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в зависимости от концентраций естественных радионуклидов (ЕРН) варьирует от 6 до 340 мкР/ч. В исследованных породах парциальные вклады ЕРН в формирование мощности дозы гамма-излучения зависят от их генезиса. Согласно существующим радиационно-гигиеническим нормам, изученные горные породы по эффективной удельной активности радионуклидов (Аэфф.) соответствуют нескольким категориям (первый, второй и третий) радиационной безопасности строительных материалов. Неблагоприятная радиоэкологическая обстановка района, обусловленная многочисленными выходами гранитоидных пород и метасоматических образований, создающих повышенный естественный радиационный фон (60-1100 мкР/ч), осложнена складированием значительных по объему радиоактивных пород и руд на дневной поверхности при проходке подземных разведочных горных выработок. Эти отвалы по уровню Аэфф. (1046-19658 Бк/кг) в основном относятся к особо опасным и опасным категориям радиоактивного минерального сырья. Незащищенное складирование радиоактивных отвалов привело к активной гидрогенной миграции из них урана с аккумуляцией его в водных растениях, гидроморфных почвах и донных отложениях водотоков. В результате в данных природных образованиях удельные активности урана (25830-59113 и 492000 Бк/кг) соответствуют уровням, характерным для низко- и среднеактивных твердых радиоактивных отходов. В настоящее время в Эльконском районе проблемы охраны окружающей среды остаются чрезвычайно актуальными в связи с неконтролируемым состоянием радиоактивных отвалов.

Ключевые слова: Южная Якутия, Эльконский урановорудный район, уран, месторождения, горные породы, отвалы пород и руд, полевая радиометрия, радиоэкологическая обстановка, отходы **DOI:** 10.31857/S0016777022020034

введение

Эльконский урановорудный район расположен в южной части Республики Саха (Якутия), в пределах Эльконского сводово-глыбового поднятия, имеющего горный рельеф. Урановые месторождения Эльконского района открыты в начале 60-х годов Октябрьской (с 1963 Приленской) экспедицией 1-го Главного геологоразведочного управления Мингео СССР и сразу стали объектом интенсивных геолого-разведочных работ и научных исследований. Здесь пробурено около 1 млн погонных метров скважин, пройдено 60 км подземных горных выработок и 1.3 млн м³ канав, проведен комплекс геолого-геофизических и геохимических исследований, руды и породы изучены несколькими сотнями тысяч шлифов. Для данного района составлены специализированные

на уран геолого-прогнозные карты 1 : 100000 (ВСЕГЕИ) и 1 : 25000 (ВИМС). В изучении урановых месторождений Эльконского урановорудного района принимали активное участие производственные организации "Главгеологоразведки", ВСЕГЕИ, ВИМСа, ИГЕМа, МГРИ и др. (Наумов, Шумилин, 1994; Казанский, Максимов, 2000; Мигута, 2001; Казанский, 2004; Горошко и др., 2006). Площадь Эльконского горста около 1.5 тыс. км², а плошадь главного рудного района — 800 км², на этой территории выявлено несколько десятков урановых месторождений и рудопроявлений (Горошко и др., 2006). В данном районе в процессе геологоразведочных работ из подземных горных выработок (штольни, шахты) на дневную поверхность было извлечено и складировано в отвалы 1 млн тонн рудной массы с активностью 20.5×10^{12} Бк (554 Ки) (Бурцев и др., 2004). В настоящее время отвалы радиоактивных пород являются перманентными неконтролируемыми источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды. В результате длительного воздействия радиоактивных отвалов на природную среду вокруг них образовались ореолы рассеяния с повышенным содержанием естественных радионуклидов в компонентах горно-таежных ландшафтов (Собакин, Молчанов, 1994; Собакин и др., 2004; Чевычелов, Собакин, 2008). Наличие необустроенных отвалов Эльконского урановорудного района издавна беспокоит местное население в связи с использованием этой территории для сбора дикоросов, любительской и промысловой охоты и рыбалки. При этом не все отвалы радиоактивных пород горных выработок выявлены и оценены как источники ралиоактивного загрязнения окружающей среды. В настоящее время практически отсутствуют публичные данные о фоновой радиоактивности горных пород Эльконского геологического района. Исследование фоновой радиоактивности компонентов окружающей среды является одной из важнейших задач радиоэкологии. Прежде всего, знание радиационного фона необходимо для оценки доз облучения населения природными источниками ионизирующего излучения, а также в качестве исходных данных при исследованиях радиоактивного загрязнения территорий и оценки его воздействия на здоровье населения. Радиоэкологические исследования, проведенные в последние годы в Эльконском урановорудном районе, восполняют в какой-то мере вышеназванные пробелы.

Целью настоящего исследования являлось определение фоновой радиоактивности горных пород Эльконского района и оценка радиационно-гигиенических параметров отвалов пород и руд, законсервированных на участках разведки урановых месторождений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория расположена в северной части Алданского нагорья в полосе гор с абсолютными отметками 600-1449 м. Район располагается в пределах древнейшего гигантского купольного сооружения – Алдано-Тимптонского мегаантиклинория, представляющего собой жесткое ядро, вокруг которого формировались более поздние геологические структуры. В мезозойское время, в результате дифференцированных блоковых движений, здесь возникли системы сопряженных грабенов и сводово-глыбовых поднятий, одним из которых является Эльконский горст, пространственно отвечающий одноименному рудному району (Казанский, Максимов, 2000). Эльконский горст вытянут в северо-западном направлении почти на 60 км, при ширине 30-40 км. Он сложен сильно дислоцированными архейскими гнейсовосланцевыми толшами. относимыми к верхнеалданской и федоровской свитам иенгрской серии.

Имеющая здесь ограниченное распространение верхнеалданская свита представлена кварцитами, высокоглиноземистыми и пироксеновыми плагиогнейсами и плагиосланцами; федоровская свита сложена пироксен-амфиболовыми и биотитовыми плагиогнейсами и плагиосланиами. Поролы гнейсово-сланцевой толщи метаморфизованы в гранулитовой и амфиболитовой фациях. В районе в течение архея-раннего протерозоя интенсивно и многократно проявились процессы ультраметаморфизма, что привело к образованию в пределах горста, главным образом, лейкократовых биотитовых, существенно микроклиновых гранитов и мигматитов (Машковцев и др., 2010). С этими гранитоидами связаны поля и участки развития калий-кремниевых метасоматитов, часто содержащих гнездово-вкрапленную урановую и редкоземельно-уран-ториевую минерализацию (уранинит, клевеит, бреггерит, ортит, сфен, торит, малакон). Интенсивная мезозойская тектоно-магматическая активизация обусловила формирование в районе многоэтапного комплекса магматических пород, отличающихся дифференцированностью и гибридностью состава. Непосредственно на горсте широко распространены магматические породы среднеюрского этапа. представленные пластовыми и штокообразными телами сиенит-диорит-порфиров, дайками вогезигов, минетты, роговообманковых порфиров, бостонитов, ортофиров. Более локально, преимущественно в северо-западной части горста, проявлены магматические образования верхней юры-нижнего мела: штоки эгириновых и нефелиновых сиенитов и многочисленные дайки сиенит-порфиров, сельвсбергитов, тингуаитов, грорудитов, эгириновых аплитов. Метаморфические породы горста образуют сложную систему складок, которая представлена рядом чередующихся антиклиналей и синклиналей.

Урановые месторождения Эльконского горста относятся к жильно-штокверковому типу и связаны с разрывными структурами, среди которых установлены древние, обновленные в мезозойское время, и молодые, возникшие в мезозое. Главной рудовмещающей зоной является Южная, представляющая собой подновленный в мезозое древний тектонический шов протяженностью 30 км и более (Наумов, Шумилин, 1994). По структурным и вещественным особенностям в пределах зоны Южная выделяются участки, рассматриваемые как отдельные месторождения: Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное и Минеевское (фиг. 1) (Геолого-промышленные..., 2008). Урановое оруденение известно также в параллельных подобных структурах (месторождения Северное, Весеннее) и обособленных молодых разломах (Агдинское, Снежное, Невское, Интересное). Урановая минерализация локализована в приразломных пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитах и образует крупные плитообразные залежи протяженностью по простиранию и падению от десятков до сотен метров,

193

при мощности от десятков сантиметров до 10 м; в сочленениях нарушений - тела сложной конфигурации: от изометричной до столбообразной (Машковцев и др., 2010). Среднее содержание урана в рудах 0.10-0.16%. Главными урановыми компонентами руд здесь являются собственно урановая средне-низкотемпературная разновидность титаната урана – браннерита и продукты его преобразования на поздних стадиях эндогенного процесса и в зоне гипергенеза (Готман и др., 1968). Подчиненную роль играют коффинит, уранинит и вторичные минералы – урановые слюдки, гидроокислы и ванадаты урана. Постоянным спутником урана в рудах месторождений Эльконского района является золото, среднее содержание которого составляет 0.5-2.0 г/т (Бойцов, Пилипенко, 1998). Кроме золота, урану всегда сопутствуют серебро, мышьяк, таллий. Особенностью всех урановых месторождений Эльконского горста являются относительно редкие выходы руды на поверхность. Верхняя граница промышленных руд почти повсеместно расположена на глубинах 200-500 м, а наиболее продуктивные участки (рудные столбы) становятся многочисленными на глубинах 1 км и более (Наумов, Шумилин, 1994). Тем не менее, значительные интервалы рудоносных зон удалось проследить по простиранию прямыми радиометрическими методами по слабым аномалиям и повышениям гамма-активности (Соломатин. Бражников, 2005). Абсолютный возраст уранового оруденения по многочисленным определениям уран-свинцовым методом по браннериту находится в пределах 160-113 млн лет, при подавляющем большинстве определений в интервале 137-130 млн лет (Машковцев и др., 2010). Руды практически равновесны: коэффициент радиоактивного равновесия меняется в незначительных пределах от 90 до 120% при средних значениях 102-104%.

В Эльконском районе также встречается урановая минерализация протерозойского возраста $(1840 \pm 100$ млн лет, РИАН). Минерализация этой эпохи связана с зонами дробления (катаклаза), окварцевания и сульфидизации в кристаллическом фундаменте и локализована в форме отдельных гнезд (линзы, прожилки) в зонах известных ураноносных разломов и на удалении от них. Аномальная радиоактивность вызвана вкрапленностью акцессорных минералов - уранинита, циркона, монацита, торита, ортита, развивающихся побиотит-полевошпатовым метасоматитам. Урановая минерализация сопровождается молибденитом, апатитом, ильменитом, сфеном, магнетитом и, в очень ограниченном количестве, галенитом и халькопиритом. Содержание урана в гнездах 0.015-0.038%, в отдельных пробах до 0.2–0.45% на мощность гнезд до 0.9-1 м. Эльконский район является для России главным резервным источником ядерного сырья и одним из крупнейших урановорудных районов. Запасы урана здесь оцениваются в 345 тыс. т при среднем его содержании 0.147% (Бавлов и др., 2007).

Полевые радиометрические исследования в Эльконском геологическом районе проведены в августе-сентябре 2011-2019 гг. В ходе радиоэкологических работ на поверхности отвалов радиоактивных пород и руд. складированных возле горных выработок (штольни, шахты), по произвольно выбранным точкам были проведены радиометрические и гамма-спектрометрические измерения с помощью радиометра СРП-68-01 и спектрометра МКС-АТ61-01 по методике, принятой в геологии и радиационной экологии (Инструкция..., 1987; Методика..., 2007) (фиг. 2). Отвалы расположены, как правило, в нижней части водораздельных склонов или поймах и занимают в зависимости от объема разные площади – от 1000 м² до 35000 м². Наиболее крупные по объему отвалы радиоактивных пород горных выработок находятся на разведочных участках месторожлений Элькон. Эльконское плато, Курунг и Дружное. На поверхности отвалов расстояние между точками измерения составляло от 2 метров до 2-3 десятков метров. Отдельные пешеходные и автомобильные маршрутные радиометрические измерения выполнены на водораздельных пространствах в обнажениях и развалинах разных типов горных пород с привязкой к геологическим картам (Государственная..., 2003а, 2003б). В маршрутных измерениях расстояние между точками изменялось от 2-5 м до 1-10 км. Все измерения выполнены с фиксацией географической координаты с помощью GPS навигационного устройства. В одной физической точке время гамма-спектрометрического измерения, в зависимости от концентраций ⁴⁰K, ²³⁸U (по ²²⁶Ra) и ²³²Th в горных породах и рудах, составляло от 100 до 600 с, а в отдельных случаях – до 1800 с. При этом относительная среднеквадратическая погрешность определения содержаний ⁴⁰K, ²³⁸U (по 226 Ra) и 232 Th не превышала $\pm 30\%$. Как известно, полевым гамма-спектрометрическим методом содержание калия, урана и тория определяется в поверхностном слое земной коры, "насыщенном по гамма-излучению". Глубина его зависит от вещественного состава (почвы, коренные породы, продукты их дезинтеграции), плотности и других причин, меняясь от 15–20 до 30–50 см (Высокоостровская и др., 1997). Определение содержаний радона в воздухе над отвалами и его плотности потока с поверхности выполнены с помошью радиометра "Альфарад Плюс" и пробоотборного устройства АВ-07 по методике, принятой в Госстандарте РФ (Измерительный..., 2011). Всего радиометрическими методами измерено 670 физических точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На обследованной территории величина мощности экспозиционной дозы гамма-излучения в породах зависит от их радиогеохимических особенностей. Площади распространения осадочных пород (доломиты, мергели и песчаники) платфор-

2022



Фиг. 1. Геолого-структурная схема Эльконского урановорудного района. 1 — молодые интрузии (а) и дайки (б) мезозойского магматического комплекса; 2 — платформенные карбонатные отложения кембрия; 3 — метаморфические и гранитоидные комплексы Алданского щита (AR-PR1); 4 — древние разломы бластотектонитов; 5 — омоложенные в мезозое древние разломы и мезозойские нарушения; 6 — основные урановые месторождения и их названия (цифрами обозначены участки месторождений Южное: 1 — Элькон, 2 — Эльконское плато, 3 — Курунг, 4 — Непроходимый, 5 — Дружный, 6 — Минеевский).

менного чехла и метаморфических (кристаллические сланцы, гнейсы) пород кристаллического фундамента характеризуются наиболее низкими значениями мошности дозы 7-13 и 6-24 мкР/ч соответственно (табл. 1). Данным породам свойственно невысокое содержание ЕРН. По этому признаку изученные осадочные и метаморфические породы хорошо сопоставимы со средними их значениями в близких по составу породах континентальной земной коры, в которых среднее содержание 40 К изменяется в пределах $0.4-4.0 \times 10^{-4}\%$, 238 U - 1.3-2.9 × 10⁻⁴%, a 232 Th - 1.8-10.4 × 10⁻⁴% (Разведочная..., 1986). Относительно невысокие значения мощности дозы гамма-излучения, установленные в осадочных и метаморфических породах рассматриваемого района, в целом соответствуют нормальному уровню естественного радиационного фона в открытой местности на территории России — 5—20 мкР/ч (Маргулис, Брегадзе, 2000). Для магматических пород и метасоматических образований характерен широкий диапазон изменения мощности дозы от 11 мкР/ч до 1100 мкР/ч. Значительный разброс уровня гаммаизлучения в данных породах обусловлен высокой вариабельностью в них концентрации ЕРН, которая может достигать двух порядков в одном и том же типе пород. Аномальные содержания урана и тория отмечаются в гранитоидах и метасоматитах, а калия — в сиенит-порфирах. В этих породах содержание ЕРН в среднем 2—214 раз выше по сравнению с осадочными и метаморфическими породами района.

Известно, что среди множества ЕРН, входящих в состав горных пород, по вкладу внешнего фонового облучения доминируют три группы гамма-излуча-телей: ⁴⁰К, члены уранового и ториевого рядов. В



Фиг. 2. Карта-схема радиометрических измерений.

A						
Порода	п	Мощность дозы, мкР/ч	⁴⁰ K	$\frac{^{238}\mathrm{U}}{n\times10^{-4\%}}$	²³² Th	Аэфф., Бк/кг
Доломиты, мергели и известняки	20	$\frac{10 \pm 2}{7 - 13}$	$\frac{2.1 \pm 0.8}{0.5 - 3.7}$	$\frac{1.5 \pm 0.8}{0.7 - 3.2}$	$\frac{5.2 \pm 1.5}{2.5 - 7.8}$	$\frac{87 \pm 26}{39 - 134}$
Кристаллические сланцы и гнейсы	75	$\frac{13 \pm 4}{6 - 24}$	$\frac{2.0 \pm 1.4}{0.8 - 5.8}$	$\frac{1.8 \pm 1.2}{0.5 - 6.1}$	$\frac{6.8 \pm 4.4}{1.0 - 19.6}$	$\frac{130 \pm 47}{30 - 215}$
Граниты нерасчлененные (амфи- боловые, биотитовые), гранито- гнейсы	100	$\frac{42 \pm 28}{11 - 130}$	$\frac{5.3 \pm 1.3}{1.7 - 8.7}$	$\frac{3.3 \pm 4.0}{0.5 - 29.1}$	$\frac{56.3 \pm 55.9}{5.2 - 261.0}$	$\frac{455 \pm 309}{103 - 1500}$
Граниты аляскитовые	20	$\frac{62 \pm 77}{13 - 340}$	$\frac{4.9 \pm 1.7}{2.4 - 8.1}$	$\frac{16.7 \pm 34.8}{0.5 - 141}$	$\frac{48.8 \pm 55.5}{4.5 - 214}$	$\frac{572 \pm 709}{140 - 2965}$
Сиенит-порфиры	7	$\frac{18 \pm 4}{12 - 22}$	$\frac{10.0 \pm 3.7}{3.7 - 13.6}$	$\frac{2.0 \pm 1.1}{0.6 - 2.6}$	$\frac{7.1 \pm 1.9}{3.0 - 9.6}$	$\frac{254 \pm 71}{128 - 334}$
Метасоматиты калий-кремниевые и биотит-полевошпатовые	15	$\frac{106 \pm 95}{28 - 340}$	$\frac{6.5 \pm 1.7}{3.1 - 8.1}$	$\frac{64 \pm 65}{7.4 - 220}$	$\frac{14.7 \pm 10.6}{1.2 - 36.3}$	$\frac{964 \pm 887}{185 - 3050}$
Метасоматиты пирит-карбонат- калишпатовые	9	$\frac{463 \pm 336}{160 - 1100}$	$\frac{8.4 \pm 1.1}{6.8 - 10.5}$	$\frac{321 \pm 239}{95 - 701}$	$\frac{50.5 \pm 25.3}{22.1 - 91.2}$	$\frac{4402 \pm 3040}{1526 - 9272}$

Таблица 1. Мощность экспозиционной дозы, концентрация и эффективная удельная активность радионуклидов в породах Эльконского района

Примечание. Здесь и далее: *n* – число измерений; над чертой – среднее и его ошибка; под чертой – min-max.

условиях радиоактивного равновесия всех дочерних продуктов в этих рядах их вклады составляют 35. 25 и 40% от общего излучения соответственно (Сивинцев, 1988). Однако это соотношение может существенно изменяться в зависимости от конкретной радиогеохимической обстановки территории. Расчеты, выполненные с использованием дозовых эквивалентов 40 K, 238 U и 232 Th, приведенные в работе (Sources...,1977), и концентраций данных элементов показывают, что в осадочных и метаморфических породах вклад гамма-излучения ⁴⁰К в формирование мощности дозы в среднем составляет 48%, а ²³⁸U и ²³²Th – 19 и 33%. В гранитоидах гамма-излучение²³²Th создает в среднем 57% мощности дозы, в метасоматитах 238 U — 86%, а в сиенит-порфирах 40 K -78%. По средней общей радиоактивности (по гамма-излучению) изученные породы Эльконского района условно можно разделить на три группы: осадочные (доломиты, мергели, известняки), метаморфические (кристаллические сланцы, гнейсы) и щелочные (сиенит-порфиры) породы с нормальной радиоактивностью; гранитоидные (аляскитовые и нерасчленные граниты, гранито-гнейсы) породы с повышенной радиоактивностью и метасоматические (калий-кремниевые и биотит-полевошпатовые, пирит-карбонат-калишпатовые) образования с аномально высокой радиоактивностью.

Кроме измерения мощности экспозиционной дозы и определения концентраций ЕРН в породах, также оценивали и эффективную удельную активность радионуклидов по формуле, принятой в нормах радиационной безопасности (Нормы..., 1999/2009):

$A \Rightarrow \varphi \varphi$. = ARa + 1.3ATh + 0.09AK,

где ARa и ATh – удельные активности ²²⁶Ra и ²³²Th, находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, АК удельная активность ⁴⁰К (Бк/кг). В настоящее время значение эффективной удельной активности радионуклидов является определяющей характеристикой класса строительных материалов (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленый камень и др.) и потенциальной радиационной опасности производственных отходов, содержащих опасные для работников предприятий и населения ЕРН. Эффективная удельная активность радионуклидов в изученных породах изменяется в широком диапазоне от 30 до 9272 Бк/кг (табл. 1). В действующем нормативе для строительных материалов первого класса, разрешенных к использованию во всех видах строительства, Аэфф. составляет 370 Бк/кг. На обследованной территории Эльконского района таким требованиям отвечают осадочные, метаморфические и щелочные породы, а также часть слаборадиоактивных гранитоидов и метасоматитов (табл. 1). Некоторая часть исследованных пород по величине Аэфф. соответствует второму и третьему классам строительных материалов (370–1500 Бк/кг), которые могут быть использованы в дорожном строительстве внутри и вне территории населенных пунктов и при возведении производственных зданий. Материалы с эффективной удельной активностью выше 4000 Бк/кг не используются в строительстве. В исследуемом районе под такие ограничения попадают локальные выходы на дневную поверхность пирит-карбонаткалишпатовых метасоматитов, у которых среднее Аэфф. составляет 4402 Бк/кг при разбросе 1526–9272 Бк/кг.

Результаты гамма-спектрометрических измерений показали, что в отвалах радиоактивных пород и руд на участках месторождений Северное, Элькон, Эльконское плато, Курунг, Дружное, Таежное, Весеннее, Агдинское, Снежное, Невское и Интересное концентрация ⁴⁰К варьирует от 2.5 до 19.2×10^{-4} %, ²³⁸U – от 3.3 до 1530 × 10^{-4%}, а ²³²Th – от 2.3 до 144 × 10^{-4%} (табл. 2). При этом на поверхности отвалов мощность экспозиционной дозы гамма-излучения изменяется от 11 до 1670 мкР/ч, т.е. более чем в 150 раз. В породах отвалов содержание ⁴⁰К и ²³²Th удерживается на уровне их фоновых значений, характерных для горных пород, участвующих в геологическом строении исследуемой территории, а концентрация ²³⁸U колеблется от фоновых (3.3 × 10^{-4%}) до рудных (1530 × 10⁻⁴%) значений. За счет большого разброса содержаний урана эффективная удельная активность радионуклидов в отвалах варьирует в широком диапазоне от 171 до 19658 Бк/кг. В результате отдельные их участки по Аэфф. могут быть классифицированы как первый, второй и третий классы строительных материалов. Однако в большей части отвалов значения Аэфф. существенно превышают предел радиационной нормы, установленный для строительных материалов (4000 Бк/кг). Отметим, что наиболее высокие значения Аэфф., зафиксированные в отвалах радиоактивных пород горных выработок месторождений Эльконское плато и Курунг, составляют 18840 и 19658 Бк/кг соответственно.

Измерения концентрации радона в атмосферном воздухе над отвалами радиоактивных пород на участках законсервированных месторождений Северное, Элькон, Эльконское плато, Курунг, Дружное, Интересное и Лунное показали, что она изменяется от 20 до 390 Бк/м³, а плотность его потока варьирует от 24 до 3611 мБк/с · м² (табл. 3). Полученные значения существенно превышают фоновые концентрации радона в открытом возлухе, которые обычно изменяются от 2 до 6 Бк/м^3 . при средней его плотности потока с поверхности земли, равной примерно 16 мБк/с · м² (Моисеев, Иванов, 1984). Эксхаляция радона из пород отвалов в целом прямо коррелирует с концентрацией в них радия (r = 0.60, P = 0.01). Вместе с тем содержание радона в воздухе над отвалами практически не зависит от содержания радия в породах отвалов, что, вероятно, связано с интенсивной циркуляцией атмосферного воздуха над отвалами. Поэтому значения коэффициента корреляции между концентрацией радона в воздухе и концентрацией радия в породах по величине не высоки (r = 0.13) и статистически не достоверны. На скорость эксхаляции, по-видимому, кроме содержаний радия в мелкоземе отвалов, существенно влияет их возраст. Чем длительнее находятся отвалы пород на дневной поверхности, тем больше они подвергаются разрушению с образованием мелкодисперсных гранулометрических фракций, способных к более интенсивному эманированию радона. Поэтому наибольшая плотность потока радона (ППР) с поверхности отвалов, равная 3611 мБк/с · м², зафиксирована на участке месторождения Северное при концентрации ралия в поролах 778 $\times 10^{-11}$ %, а не на месторожлении Эльконское плато, где ППР с поверхности отвала составляет 2928 мБк/с · м² при самом высоком содержании радия 3233×10^{-11} % в породах среди изученных участков месторождений. На территории горных выработок (штольни, шахты) месторождения Эльконское плато радиоактивные породы складированы в отвалы относительно позже, чем на месторождении Северное. Складированные на дневной поверхности отвалы радиоактивных пород в Эльконском урановорудном районе в основном представляют отбитые при проходке разведочных подземных горных выработок горные массы забойной крупности. Поэтому в отвалах уровень ППР с поверхности (24–3611 мБк/с · м²) существенно ниже по сравнению с таковой в твердых фазах радиоактивных хвостов гидрометаллургического завода – 1700–30000 мБк/с · м² (Мосинец, 1991). Несмотря на это, отвалы подземных горных выработок Эльконского района и радиоактивные хвосты завода по величине гамма-активности соизмеримы - 52-1010 и 100-1400 мкР/ч соответственно. Как известно, в процессе переработки урановых руд на гидрометаллургическом заводе нетоварная часть измельченной руды попадает в хвосты, которые становятся источником эксхаляции радона в атмосферу (Мосинец, 1991).

На обследованной территории Эльконского горста фоновые эксхаляции радона из почв колеблются от 13 до 603 мБк/с \cdot м² (табл. 4). При этом между концентрацией радия в почвах и ППР с поверхности в целом существует положительная корреляционная связь (r = 0.70), как и в отвалах радиоактивных пород. На величину скорости эксхаляции радона из почв, кроме концентраций радия в них, могут влиять и другие факторы, такие как влажность, температура, трещиноватость, каменистость, гранулометрический состав, плотность сложения почв и др. Поэтому на изученных участках несовпадение максимальной величины концентрации радия в почве с самым высоким значением ППР, зафиксированным на поверхности почвы, закономерно (табл. 4). Из табл. 4 видно, что при нормальной фоновой концентрации радия в почве $-2.7-10.2 \times 10^{-11}$ %, ППР с поверхности обычно колеблется от 13 до 52 мБк/с · м², что ниже, чем для территорий, предназначенных для строительства зданий жилищного и общественного назначения – 80 мБк/с · м² (Основные..., 2019). На участках с аномально высокой концентрацией радия в почвах (28.4-40.0 ×

2022

Таблица 2.	Мощность	экспозиционной дозы,	концентрация и эффективная	удельная активность радионукли-
дов в пород	цах отвалов	горных выработок		

Местороуление	Номер	n	Мощность дозы, мкР/ч	⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	Аэфф Бк/кг
месторождение	отвала				1 БФФ., ВК/М		
I Северное	Ι	19	$\frac{175 \pm 94}{73 - 401}$	$\frac{6.3 \pm 2.1}{2.5 - 10.1}$	$\frac{130 \pm 94}{13 - 356}$	$\frac{27.0 \pm 19.1}{7.5 - 74.8}$	$\frac{1858 \pm 1280}{247 - 4962}$
	II	17	$\frac{104 \pm 40}{64 - 231}$	$\frac{6.1 \pm 1.7}{3.3 - 8.9}$	$\frac{59 \pm 40}{19 - 186}$	$\frac{14.2 \pm 6.8}{7.9 - 37.7}$	$\frac{924 \pm 545}{354 - 2634}$
	Ι	12	$\frac{150 \pm 72}{70 - 290}$	$\frac{7.1 \pm 1.3}{4.2 - 7.9}$	$\frac{106 \pm 56}{35 - 124}$	$\frac{25.0 \pm 8.4}{15.0 - 39.3}$	$\frac{1647 \pm 679}{788 - 2722}$
Элькон	II	8	$\frac{102 \pm 34}{62 - 152}$	$\frac{6.5 \pm 1.3}{4.2 - 8.5}$	$\frac{67 \pm 27}{27 - 94}$	$\frac{18.5 \pm 6.8}{7.4 - 27.1}$	$\frac{1043 \pm 380}{624 - 1405}$
	Ι	9	$\frac{885 \pm 344}{392 - 1525}$	$\frac{8.9 \pm 2.7}{4.1 - 13.9}$	$\frac{840 \pm 344}{347 - 1480}$	$\frac{44.5 \pm 19.6}{15.2 - 79.6}$	$\frac{10734 \pm 4362}{4529 - 18840}$
	II	9	$\frac{513 \pm 151}{310 - 730}$	$\frac{7.4 \pm 1.3}{4.8 - 10.0}$	$\frac{468 \pm 151}{266 - 700}$	$\frac{30.1 \pm 9.9}{15.8 - 41.7}$	$\frac{6059 \pm 1890}{3644 - 8948}$
Эльконское плато	III	11	$\frac{220 \pm 28}{180 - 277}$	$\frac{5.2 \pm 0.8}{4.0 - 7.1}$	$\frac{175 \pm 28}{138 - 232}$	$\frac{10.3 \pm 2.4}{7.3 - 14.8}$	$\frac{2343 \pm 321}{1846 - 3001}$
	IV	3	$\frac{333 \pm 508}{35 - 920}$	$\frac{4.4 \pm 1.1}{3.2 - 5.2}$	$\frac{265 \pm 427}{14 - 759}$	$\frac{23.5 \pm 29.2}{6.7 - 57.3}$	$\frac{3471 \pm 5391}{309 - 9697}$
	v	2	$\frac{325 \pm 92}{260 - 390}$	$\frac{4.0 \pm 0.5}{3.8 - 4.5}$	$\frac{266 \pm 85}{206 - 326}$	$\frac{26.7 \pm 15.5}{15.8 - 37.7}$	$\frac{3490 \pm 1134}{2688 - 4293}$
	VI	5	$\frac{147 \pm 251}{11 - 595}$	$\frac{6.9 \pm 2.5}{3.5 - 8.7}$	$\frac{115 \pm 213}{3.3 - 496}$	$\frac{18.5 \pm 25.0}{3.6 - 62.1}$	$\frac{1648 \pm 2779}{171 - 6594}$
	VII	4	$\frac{50 \pm 25}{25 - 87}$	$\frac{5.5 \pm 2.0}{3.7 - 9.6}$	$\frac{29 \pm 25}{10 - 60}$	$\frac{8.9 \pm 2.8}{6.4 - 13.5}$	$\frac{513 \pm 300}{229 - 890}$
	Ι	11	$\frac{1250 \pm 240}{565 - 1670}$	$\frac{10.9 \pm 0.5}{4.5 - 19.2}$	$\frac{1205 \pm 398}{520 - 1530}$	$\frac{76.8 \pm 18.0}{44.7 - 110}$	$\frac{15434 \pm 4274}{6809 - 19658}$
Курунг	II	12	$\frac{504 \pm 143}{223 - 726}$	$\frac{9.4 \pm 2.8}{5.4 - 13.2}$	$\frac{459 \pm 143}{178 - 681}$	$\frac{37.0 \pm 10.7}{21.2 - 48.0}$	$\frac{6020 \pm 1819}{2397 - 8815}$
	III	11	$\frac{241\pm88}{70-391}$	$\frac{6.3 \pm 2.1}{3.7 - 10.1}$	$\frac{196 \pm 88}{24 - 318}$	$\frac{23.0 \pm 9.9}{9.6 - 43.9}$	$\frac{2650 \pm 1136}{428 - 4571}$
	IV	7	$\frac{55 \pm 15}{36 - 80}$	$\frac{5.3 \pm 1.3}{4.0 - 7.7}$	$\frac{27 \pm 13}{11 - 47}$	$\frac{7.6 \pm 1.9}{5.5 - 11.0}$	$\frac{478 \pm 184}{280 - 782}$
	v	3	$\frac{430 \pm 582}{60 - 1100}$	$\frac{5.1 \pm 2.6}{2.0 - 7.0}$	$\frac{407 \pm 501}{34 - 977}$	$\frac{38.5 \pm 40.3}{7.4 - 84.0}$	$\frac{5208 \pm 6378}{457 - 12457}$
	VI	6	$\frac{46 \pm 14}{32 - 70}$	$\frac{5.4 \pm 0.7}{4.5 - 5.9}$	$\frac{\underline{19 \pm 13}}{8-42}$	$\frac{13.2 \pm 7.8}{6.0 - 27.5}$	$\frac{409 \pm 156}{220 - 663}$
	VII	3	$\frac{44 \pm 7}{40 - 52}$	$\frac{5.7 \pm 0.1}{5.4 - 5.7}$	$\frac{20 \pm 7}{16 - 28}$	$\frac{6.2 \pm 0.3}{6.0 - 6.5}$	$\frac{385 \pm 84}{337 - 482}$

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 64 № 2 2022

Таблица 2. Окончание

Местороуление	Номер	и	Мощность	⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	Aadd Fr/rr
отвала		п	дозы, мкР/ч	$n \times 10^{-4\%}$			лэφφ., b κ/ кі
	Ι	18	$\frac{400 \pm 271}{130 - 1200}$	$\frac{9.3 \pm 1.9}{6.1 - 12.3}$	$\frac{329 \pm 276}{57 - 1200}$	$\frac{71.0 \pm 25.8}{34.9 - 144.0}$	$\frac{4594 \pm 3506}{1046 - 15712}$
Дружное	II	32	$\frac{172 \pm 148}{38 - 617}$	$\frac{6.8 \pm 1.7}{3.3 - 11.8}$	$\frac{127 \pm 129}{11 - 516}$	$\frac{28.4 \pm 16.7}{8.7 - 70.3}$	$\frac{1843 \pm 1678}{241 - 6840}$
	III	50	$\frac{176 \pm 79}{55 - 354}$	$\frac{8.1 \pm 1.2}{5.2 - 10.7}$	$\frac{130 \pm 69}{25 - 286}$	$\frac{36.3 \pm 8.6}{16.4 - 54.1}$	$\frac{1948 \pm 878}{566 - 3974}$
Таругнор	Ι	4	$\frac{240 \pm 151}{100 - 440}$	$\frac{6.0 \pm 0.7}{5.2 - 6.7}$	$\frac{169 \pm 116}{70 - 318}$	$\frac{35.2 \pm 11.4}{19.8 - 46.0}$	$\frac{2380 \pm 1474}{1092 - 4241}$
Таежное	II	18	$\frac{74 \pm 63}{26 - 280}$	$\frac{5.9 \pm 1.4}{4.2 - 8.9}$	$\frac{47.7 \pm 6.3}{3.8 - 210}$	$\frac{20.5 \pm 6.3}{11.2 - 32.2}$	$\frac{809 \pm 671}{274 - 2816}$
Весеннее	Ι	7	$\frac{104 \pm 51}{50 - 180}$	$\frac{6.4 \pm 1.7}{5.0 - 10.0}$	$\frac{72 \pm 37}{22 - 116}$	$\frac{19.9 \pm 4.3}{14.2 - 25.9}$	$\frac{1111 \pm 493}{480 - 1671}$
Агдинское	Ι	9	$\frac{406 \pm 145}{230 - 640}$	$\frac{8.5 \pm 1.2}{5.1 - 13.2}$	$\frac{323 \pm 102}{197 - 501}$	$\frac{21.5 \pm 4.8}{13.3 - 27.8}$	$\frac{4251 \pm 1279}{2751 - 6473}$
	П	20	$\frac{84 \pm 36}{30 - 150}$	$\frac{8.6 \pm 2.5}{5.1 - 13.2}$	$\frac{55 \pm 32}{10 - 77}$	$\frac{11.0 \pm 4.1}{4.4 - 19.1}$	$\frac{901 \pm 427}{316 - 1754}$
I Снежное II II	Ι	5	$\frac{568 \pm 105}{460 - 700}$	$\frac{8.1 \pm 1.3}{7.2 - 10.5}$	$\frac{473 \pm 94}{365 - 587}$	$\frac{33.9 \pm 7.4}{24.8 - 43.1}$	$\frac{6154 \pm 1186}{4826 - 7578}$
	П	6	$\frac{213 \pm 127}{80 - 260}$	$\frac{7.0 \pm 0.9}{5.7 - 8.6}$	$\frac{157 \pm 107}{38 - 331}$	$\frac{24.6 \pm 10.1}{15.0 - 42.4}$	$\frac{2194 \pm 1356}{670 - 4353}$
	Ш	6	$\frac{183 \pm 102}{30 - 320}$	$\frac{6.5 \pm 1.7}{4.8 - 8.5}$	$\frac{87 \pm 106}{5.4 - 297}$	$\frac{20.9 \pm 12.5}{7.0 - 43.8}$	$\frac{1307 \pm 1353}{196 - 3970}$
Наракоа	Ι	18	$\frac{180 \pm 87}{78 - 400}$	$\frac{7.0 \pm 1.3}{4.1 - 9.1}$	$\frac{121 \pm 56}{60 - 264}$	$\frac{14.9 \pm 2.6}{11.6 - 19.5}$	$\frac{1708 \pm 691}{740 - 3439}$
певское	II	6	$\frac{117 \pm 60}{46 - 230}$	$\frac{5.4 \pm 0.9}{4.1 - 7.7}$	$\frac{81 \pm 52}{17 - 178}$	$\frac{10.6 \pm 4.0}{4.8 - 18.5}$	$\frac{1153 \pm 634}{386 - 2311}$
Интересное	Ι	8	$\frac{714 \pm 374}{460 - 1600}$	$\frac{6.1 \pm 2.6}{4.6 - 12.7}$	$\frac{575 \pm 300}{342 - 1250}$	$\frac{29.6 \pm 12.6}{17.3 - 55.4}$	$\frac{7360 \pm 3719}{4385 - 15801}$
	II	8	$\frac{130 \pm 66}{50 - 240}$	$\frac{5.9 \pm 1.8}{3.7 - 8.4}$	$\frac{83 \pm 63}{16 - 194}$	$\frac{13.1 \pm 10.7}{2.3 - 31.7}$	$\frac{1196 \pm 851}{302 - 2697}$
	III	11	$\frac{452 \pm 174}{95 - 700}$	$\frac{6.1 \pm 2.0}{2.8 - 9.6}$	$\frac{374 \pm 175}{45 - 661}$	$\frac{14.6 \pm 5.8}{8.4 - 22.8}$	$\frac{4804 \pm 2186}{708 - 8388}$
Лунное	Ι	9	$\frac{442 \pm 322}{220 - 1200}$	$\frac{7.2 \pm 2.4}{3.5 - 11.2}$	$\frac{325 \pm 252}{145 - 918}$	$\frac{23.2 \pm 9.8}{13.1 - 42.1}$	$\frac{4285 \pm 3126}{2040 - 11952}$

× 10^{-11} %), приуроченных к рыхлым отложениям гранитных пород, ППР с поверхности (100— 603 мБк/с · м²) сравним с таковым на отвалах радиоактивных пород (табл. 3 и 4), хотя концентрация радия в изученных почвах меньше, чем в породах отвалов. По-видимому, это связано, в основном, с неравномерным распределением радия по глубине активного слоя почв и почвообразующих пород, где формируется основной поток радона из почв в атмосферу, и их более мелким песчано-суглинистым гранулометрическим составом по сравнению с породами отвалов. Мощность актив-

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 64 № 2 2022

Местороуление	Номер точки	Мощность	²²⁶ Ra,	²²² Rn	
месторождение	измерения	дозы, мкР/ч	$n \times 10^{-11}\%$	Бк/м ³	мБк/с · м ²
	1	420	1268	390	3202
Сарариаа	2	300	778	381	3611
Северное	3	200	520	322	356
	4	100	227	224	143
	1	250	557	113	124
	2	152	319	208	37
Элькон	3	120	282	114	54
	4	58	91	20	80
	1	1000	3233	103	2928
	2	552	1587	124	386
Эльконское плато	3	300	833	82	314
	4	52	78	52	24
	5	295	721	32	66
	1	1010	3148	150	2545
	2	620	1077	232	295
Курунг	3	252	467	61	138
	4	52	74	32	31
	5	60	115	25	28
	1	300	775	121	180
Дружное	2	200	274	49	87
	3	170	499	63	95
	1	720	2258	93	342
	2	400	1115	147	283
иптерсенос	3	200	516	92	102
	4	100	187	35	121
Лишоо	1	700	1802	68	703
Луннос	2	340	810	150	1579

Таблица 3. Концентрация ²²²Rn в воздухе (Бк/м³) над отвалами и плотность его потока с поверхности (мБк/с · м²)

ного слоя в рыхлых образованиях (почвы, породы) может составлять 1—3 м (Горшков и др., 1957). Фактически измеренное гамма-спектрометром МКС-61-01Д содержание радия в почве соответствует его средней концентрации в слое 30—50 см (Высокоостровская и др., 1997), т.е. в пределах мощности почвенного профиля изученных горно-таежных почв — 30—60 см.

Вопрос о промышленном освоении Эльконской группы урановых месторождений в Алданском нагорье поднимался несколько раз, и эти работы не начаты в связи с выявлением Стрельцовского и Кривоградского урановорудных полей, находящихся в значительно лучших географо-экономических условиях. Однако, когда большинство урановорудных районов СССР оказались за пределами России, освоение Эльконского района стало актуальным. В 2007 году урановый холдинг "Атомредметзолото" Госкорпорации "Росатом" получил лицензию на доизучение и последующую отработку месторождения Южное, месторождений Северное и Лунное (Машковцев и др., 2010). Для этой цели в ноябре 2007 г. было создано ОАО "Эльконский ГМК". Согласно плану освоения месторождений в 2012 г., закрытое акционерное общество (ЗАО) "Лунное" начало опытно-промышленные испытания по переработке золотобраннеритовых руд способом кучного выщелачивания в Федоровской рудной зоне на месторождении Лунное. Технологическая схема такого испытания предусматривала последовательное выщелачивание: на первом этапе - золота и серебра цианид-содержащими растворами, с последующим обезвреживанием остатков солей синильной кислоты, содержащихся в поровой влаге рудного штабеля; на втором этапе – урана сернокислыми растворами с последующей детоксикацией отвальных хвостов кучного вышелачивания. Однако в начале переработки руды планы изменились – принято решение добывать из складированных рудных штабелей только золото, а извлечение урана отложить на неопределенное время из-за экономической неэффективности. В связи с возможностью использования в будущем рудных штабелей кучного выщелачивания и некоторых отвалов разведочных горных выработок для извлечения урана их невозможно отнести к радиоактивным отходам. Согласно ОСПОРБ 99/2010, к радиоОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

			-	
Почва	Почвообразующая порода	Мощность дозы, мкР/ч	226 Ra, $n \times 10^{-11}\%$	²²² Rn, мБк/с · м ²
	Месторождение Северное	11		
Подбур	Элювий кристаллических сланцев и гнейсов	12	2.7	13
Подбур		70	40.0	100
	делювии гранитов	50	28.4	498
	Делювий кристаллических сланцев и гнейсов	22	7.8	19
Аллювиальная	Аллювиальные отложения	14	7.5	40
	Месторождение Курунг			
Подбур	Делювий кристаллических	8	2.7	16
	сланцев и гнейсов	24	6.8	52
Подзолистая	Делювий гранитов	56	33.0	603
Аллювиальная	Аллювиальные отложения	21	10.2	21
	Почва Подбур Подбур Аллювиальная Подбур Подзолистая Аллювиальная	Почва Почвообразующая порода Месторождение Северное Элювий кристаллических сланцев и гнейсов Подбур Элювий кристаллических сланцев и гнейсов Подбур Делювий гранитов Делювий кристаллических сланцев и гнейсов Делювий кристаллических Аллювиальная Аллювиальные отложения Подбур Делювий кристаллических сланцев и гнейсов Подзолистая Делювий гранитов Аллювиальная Аллювиальные отложения	ПочваПочвообразующая породаМощность дозы, мкР/чМощость дозы, мкР/чМощность дозы, мкР/чПодбурЭлювий кристаллических сланцев и гнейсов12ПодбурДелювий кристаллических сланцев и гнейсов20Делювий кристаллических сланцев и гнейсов22АллювиальнаяАллювиальные отложения14ПодбурДелювий кристаллических сланцев и гнейсов22ПодбурДелювий кристаллических сланцев и гнейсов8ПодбурДелювий кристаллических сланцев и гнейсов24ПодбурДелювий гранитов56АллювиальнаяАллювиальные отложения21	Почва Почвообразующая порода Мощность дозы, мкР/ч 226 Ra, n × 10 ⁻¹¹ % Мощость дозы, мкР/ч 226 Ra, n × 10 ⁻¹¹ % Мощость дозы, мкР/ч n × 10 ⁻¹¹ % Подбур Элювий кристаллических сланцев и гнейсов 12 2.7 Подбур Делювий кристаллических сланцев и гнейсов 70 40.0 Делювий кристаллических сланцев и гнейсов 22 7.8 Аллювиальная Аллювиальные отложения 14 7.5 Месторождение Курунг 14 7.5 Подбур Делювий кристаллических сланцев и гнейсов 8 2.7 Подбур Делювий кристаллических сланцев и гнейсов 33.0 33.0 Аллювиальные отложения 21 10.2 33.0

Таблица 4. Фоновые значения плотности потока радона с поверхности почв в Эльконском районе

активным отходам относятся не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых сумма отношений удельных активностей радионуклидов к их минимально значимой удельной активности (МЗУА) превышает 1. Здесь нужно отметить, что для природного урана (ряд ²³⁸U) в условиях радиоактивного равновесии со всеми продуктами распада его МЗУА₁₁ равно 1000 Бк/кг, т.е. 81.3×10^{-4} %, или 81.3 г/т (Нормы..., 2019). Для неравновесного 238 U МЗУА_U составляет 10000 Бк/кг, т.е. 813 × × 10⁻⁴%, или 813 г/т. В породах отвалов горных выработок уран находится в состоянии радиоактивного равновесия (Машковцев и др., 2010), поэтому его МЗУА_U для них равно 1000 Бк/кг. Сравнение показывает, что в отвалах при пересчете содержания урана в единицах удельной активности его величина в большинстве случаев превышает значения МЗУА_U, установленные в нормах радиационной безопасности (табл. 2). Из 35 обследованных отвалов 30 отвалов по удельной активности урана соответствуют твердым низко радиоактивным отходам.

Месторождения твердых полезных ископаемых различных типов и генезисов несут в себе различные элементы потенциальной радиационной опасности. В настоящее время все промышленные типы месторождений твердых полезных ископаемых по степени радиационной опасности, следуя рекомендациям ОСПОРБ-99/2010, подразделяют на четыре категории (класса) по величине Аэфф.: особо опасные (более 3500 Бк/кг), опасные (от 1000 до 3500 Бк/кг), потенциально опасные (от 100 до 1000 Бк/кг) и безопасные (менее 100 Бк/кг) (Куриленко, Хайкович, 2004). К безопасным относят месторождения, которые не нуждаются в проведении специальных исследований для заключения об их радиационной опасности для персонала и населения, проживающего

в окрестностях. К потенциально опасным — месторождения, которые по своим радиогеохимическим показателям не представляют опасности, но заключение об их радиационной опасности (или безопасности) не может быть сделано без дополнительных исследований. Опасными и особо опасными являются месторождения, при разведке и эксплуатации которых должны быть приняты специальные меры, обеспечивающие безопасность персонала и населения. Согласно выше приведенной классификации, из 35 обследованных отвалов пород и руд, расположенных на участках урановых месторождений (Северное, Элькон, Эльконское плато, Курунг и др.) 21 относятся к особо опасным, 10 — к опасным и 4 — к потенциально опасным.

В Эльконском урановорудном районе радиоактивные породы и руды на дневную поверхность начали складировать в отвалы при проходке горных выработок (штольни, шахты) с начале 60-х годов прошедшего столетия и, видимо, продолжали до конца 70-х годов, пока не были остановлены полностью подземные горно-проходческие работы. В 1984 году геологические исследования в Эльконском районе были завершены, а месторождения отнесены к резервным (Машковцев..., 2010). Поэтому примерный возраст отвалов в настоящее время может быть 45-55 лет. В Эльконском горсте поисковые и геолого-разведочные работы на уран были проведены быстрыми темпами в условиях строгой секретности без привлечения специалистов в области охраны окружающей среды и соблюдения правил обращения с радиоактивными отходами. В результате на территориях некоторых горных выработок извлеченные на дневную поверхность радиоактивные горные породы и руды были складированы в русле водотоков (фиг. 3).

Более чем полувековое хранение радиоактивных отвалов разведочных горных выработок на дневной поверхности способствовало масштабному радиоактивному загрязнению окружающей



Фиг. 3. Отвал радиоактивных пород, расположенный в долине руч. Акин (месторождение Эльконское плато).

среды. В настоящее время границы ореола водного рассеяния ЕРН в аллювиальных пойменных почвах фиксируются на расстоянии до нескольких десятков км от источников (отвалов), а ореол ветрового рассеяния в почвах водоразделов — до 1 км (Собакин и др., 2015, Собакин, 2018). Из отвалов с водами атмосферных осадков более интенсивно выщелачивается уран, поэтому радиоактивное равновесие между ураном и радием в гидроморфных почвах, водных мхах и донных отложениях вблизи источников резко нарушено в сторону избытка урана. Соответственно, величина коэффициента радиоактивного равновесия между ураном и радием меньше единицы и составляет 0.008–0.4. На участках месторождений Эльконское плато и Курунг в зоне водного рассеяния ЕРН в пределах 150 м от отвалов удельная активность урана в некоторых компонентах ландшафтов превышает его M3VA_U в несколько десятков раз (Собакин, 2002, 2015) (табл. 5). Длительное воздействие радиоактивных отвалов на природную среду способствовало образованию низко- (25830–59113 Бк/кг) и среднеактивных (492000 Бк/кг) радиоактивных отходов, Согласно санитарно-гигиеническим требо-

Таблица 5. Сравнение удельной активности ²³⁸U в некоторых компонентах ландшафтов с его МЗУА_U в зоне техногенного загрязнения

Kontrouout toutunobto	Активн	²³⁸ U					
компонент ландшафта	²³⁸ U M3YA _U		MЗУA _U				
Месторождение Эльконское плато							
Почва (лугово-болотная)	492000	10000	49.2				
Растения (мхи)	25830	10000	2.6				
Донные отложения (ил)	27724	10000	2.8				
Месторождение Курунг							
Растения (мхи)	33671	10000	3.4				
Донные отложения (ил)	59113	10000	5.9				

ваниям, отходы с таким уровнем радиоактивности должны направляться на специально выделенные vчастки для захоронения (Гигиенические.... 2011). На месте образования радиоактивных отходов максимальное содержание урана в лугово-болотной почве в настоящее время может превышать 5%, что сравнимо с его концентрацией в богатой руде. Открытая разработка месторождения Лунное с частичной переработкой руды не улучшила радиоэкологическую обстановку на территории Эльконского горста. Процесс разработки месторождения привел к расширению зоны с повышенным радиационным фоном за счет появления карьеров с обнаженными рудами, отвалов вскрышных пород и штабелированных руд. В этих техногенных образованиях в настоящее время мощность экспозиционной дозы гамма-излучения составляет 30-700 мкР/ч.

В связи с вышесказанным в настоящее время есть необходимость организации природоохранных мероприятий в местах добычи золота и геологоразведки на уран. Это связано с неопределенностью сроков начала полноценного промышленного освоения урановых месторождений. Нам кажется, что самым оптимальным является вывоз кондиционной высокоактивной части отвалов геологоразведочных горных выработок на переработку в Приаргунский горно-химический комбинат в Забайкальский край (г. Краснокаменск). Герметичные контейнеры с породой могут отправляться по железной дороге со станции Томмот, расстояние от которой до месторождений составляет всего 35-80 км. Большой опыт работ по вывозу технологических проб из радиоактивных отвалов месторождений Эльконское плато, Курунг и Дружное имеется у сотрудников научно-исследовательских Институтов Госкорпорации "Росатом" владельца месторождений. Оставшиеся слаборадиоактивные отвалы и штабелированные руды кучного выщелачивания можно отсыпать пустой породой для уменьшения радоновыделения, ветрового и водного рассеяния ЕРН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Эльконском урановорудном районе сложилась высококонтрастная радиоэкологическая обстановка, связанная с особенностями геологического строения территории и техногенным воздействием на нее. На обследованной территории мощность экспозиционной дозы гамма-излучения изменяется от фоновых (6 мкР/ч) до аномально высоких (1100 мкР/ч) значений. Относительно невысокие уровни мощности дозы характерны для мест распространения осадочных и метаморфических пород. Наибольшие значения мощности дозы гамма-излучения свойственны массивам гранитоидных пород и рудных метасоматических образований водоразделов. Большой разброс уровня гамма-излучения в исследованных породах обусловлен высокой вариабельностью в них концентраций

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 64 М

ЕРН. Аномальные концентрации урана и тория обнаружены в гранитоидах и метасоматитах, а калия в сиенит-порфирах. По величине эффективной удельной активности радионуклидов обследованные горные породы соответствуют разным классам строительных материалов. Величина мощности дозы гамма-излучения на поверхности отвалов разведочных горных выработок (штольни, шахты) месторождений (Северное, Элькон, Эльконское плато, Курунг, Дружное, Невское, Таежное, Весеннее, Агдинское, Интересное и Лунное) варьирует в широком диапазоне. При этом концентрация ⁴⁰К и ²³²Th в породах отвалов находится на региональном фоновом уровне, а содержание ²³⁸U изменяется от рядовых до рудных значений. Согласно классификации месторождений твердых полезных ископаемых по степени радиационной безопасности, подавляющее большинство отвалов радиоактивных пород и руд горных выработок (89% от общего количества) по Аэфф. относятся к особо опасным и опасным классам минерального сырья.

В настоящее время в Эльконском районе процессы радиоактивного загрязнения природной среды не только продолжаются, но и усиливаются за счет появления новых дополнительных источников загрязнения, связанных с добычей золота. Длительное неконтролируемое воздействие на окружающую среду радиоактивных отвалов способствовало образованию радиоактивных отходов в компонентах горно-таежных ландшафтов (почва. растения и донные отложения). В целом проведенные радиоэкологические исследования дают представление о сложившейся современной радиоэкологической обстановке в Эльконском районе, как на техногенных участках, так и за их пределами, несмотря на недостаточно высокую плотность точек радиометрических измерений на обширной территории. Возрастающие масштабы радиоактивного загрязнения природной среды в данном геологическом районе требуют пристального внимания специалистов охраны окружающей среды и Роспотребнадзора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы "Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства РС (Я) на 2018—2022 годы" и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту: № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-A21-121012190033-5.

№ 2 2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бавлов В.Н., Машковцев Г.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. О возможности освоения резервных урановых месторождений России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 2–14.

Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана // Геология руд. месторождений. 1998. № 4. С. 354–369.

Бурцев И.С., Степанова С.К., Колодезникова Е.Н., Архипов Н.Д. Опыт работы по обследованию подземных ядерных взрывов и отвалов урансодержащих руд на территории Якутии // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II науч.-прак. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 56–67.

Высокоостровская Е.Б., Данилов В.С., Краснов А.И., Смыслов А.А. Использование аэрогамма-спектрометрических данных в радиационной экологии // Российский геофизический журнал. 1997. № 7–8. С. 67–74.

Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ. М.: ВИМС, 2008. 72 с.

Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 40 с.

Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кириллов В.Е. Металлогения урана Дальнего Востока России. М.: Наука, 2006. 272 с.

Горшков Г.В., Граммаков А.Г., Железнова Е.И. и др. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. М.: Недра, 1957. 610 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Издание второе. Алданская серия. О-52-XIII (Ыллымах). ГГП Алдангеология, 2003а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Издание второе. Алданская серия. О-52-VII (Томмот). ГГП Алдангеология, 20036.

Готман Я.Д., Полякова В.М., Мигута А.К. О новой разновидности браннерита // Доклады АН СССР. Сер. Геол. 1972. № 6. С. 84–92.

Измерительный комплекс "Альфарад Плюс" для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов распада в различных средах. Руководство по эксплуатации. М., 2011. 87 с.

Инструкция по работе со сцинтилляционными радиометрами при геологических сьемках и поисках. Отв. ред. А.Г. Ветров. Ленинград: Рудгеофизика, 1987. 44 с. *Казанский В.И.* Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46. № 3. С. 195–211.

Казанский В.И., Максимов Е.П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 2. С. 212–229.

Куриленко В.В., Хайкович И.М. Месторождения полезных ископаемых как источник радиоактивного загрязнения // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Матер. 2-й междунар. конф. Томск: "Тамтем-Арт", 2004. С. 307–311.

Маргулис У.Я., Брегадзе Ю.И. Радиационная безопасность. Принципы и средства ее обеспечения. М.:Эдиториал УРСС, 2000. 120 с. *Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.*Н. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Методика выполнения измерений эффективной удельной активности природных радионуклидов и поверхностной активности цезия-137 с применением спектрометра МКС-АТ6101Д. Санкт-Петербург, 2007. 13 с.

Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 129–151.

Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М.: Энергоатомиздат, 1984. 295 с. *Мосинец В.Н.* Радиоактивные отходы уранодобывающих предприятий и их воздействие на окружающую среду // Атомная энергия. 1991. Т. 70. Вып. 5. С. 282–288.

Наумов С.С., Шумилин М.В. Урановые месторождения Алдана // Отечественная геология. 1994. № 11/12. С. 20–23. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Центр нормативно-технической информации "Медиа Сервис", 2019. 118 с.

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). М.: Центр нормативно-технической информации "Медиа Сервис", 2019. 84 с.

Разведочная ядерная геофизика. Справочник геофизика / Под. ред. О.Л. Кузнецова и А.Л. Поляченко. 2-е изд. перераб. и доп. М.:Недра, 1986. 432 с.

Сивинцев Ю.В. Естественный радиационный фон // Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып.1. С. 46–56.

Собакин П.И. Естественные и искусственные радионуклиды в мерзлотных почвах Якутии. Автореф. дис.... докт. биол. наук. Улан-Удэ: Ин-т общей и экспериментальной биологии Сиб. Отдел. РАН, 2015. 39 с.

Собакин П.И. Накопление тяжелых естественных радионуклидов мхами Южной Якутии // Сибирский экологический журнал. 2002. № 1. С. 29–34.

Собакин П.И. Радон в поверхностных и подземных водах Эльконского урановорудного района в Южной Якутии // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 2. С. 119–124.

Собакин П.И., Молчанова И.В. Радиоэкологические исследования техногенно-нарушенных участков ландшафта в зоне уранового месторождения Республики Саха (Якутия) // Дефектоскопия. 1994. № 9. С. 70–74.

Собакин П.И., Чевычелов А.П., Герасимов Я.Р. Миграция радионуклидов в поверхностных водах горно-таежных ландшафтов Эльконского урановорудного района // Геохимия. 2015. № 11. С. 1032–1042.

Собакин П.И., Чевычелов А.П., Ушницкий В.Е. Радиоэкологическая обстановка на территории Якутии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 283–288.

Соломатин Г.Б., Бражников А.С. История создания минерально-сырьевой базы урана и пути решения вопросов ураноносности Дальнего Востока и Якутии // Разведка и охрана недр. 2005. № 10. С. 36–45.

Чевычелов А.П., Собакин П.И. Миграция естественных радионуклидов в техногенных таежно-мерзлотных ландшафтах Южной Якутии. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 138 с.

Sources and effects of ionizing radiation. UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1977 Report to the General Assembly with Scientific Annex "Effects of Radiation on the Environment", United Nations. New York, 1977. 114 p.