

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ПОЧВАХ В РАЙОНЕ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭЛЬКОНСКОЕ ПЛАТО В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

© 2024 г. П. И. Собакин^{a,*} (<https://orcid.org/0000-0002-9308-122X>),
А. П. Чевычелов^a, А. Н. Горохов^a, Т. С. Айсуева^b

^aИнститут биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр-т Ленина, 41, Якутск, 677980 Россия

^bИнститут геохимии им. А.П. Виноградова, ул. Фаворского, 1А, а/я 304, Иркутск, 664033 Россия

*e-mail: radioecolog@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

Проведена оценка радиоэкологической обстановки законсервированного геологоразведочного участка на месторождении Эльконское плато на Алданском нагорье методом полевой радиометрии. Установлено, что вынос огромной массы радиоактивных пород на поверхность из подземных горных выработок (штольни, шахты) существенно увеличил площадь с повышенным радиационным фоном, равным 1.0–12.0 мкЗв/ч и более. Исследования показали, что в условиях техногенного загрязнения определяющими факторами миграции, распределения и накопления естественных радионуклидов в почвах, кроме их химических свойств, являются гумидный климат, генетические особенности радиоактивной руды, наличие многолетнемерзлых пород, почвообразовательные процессы и содержание органического вещества. В сложившихся условиях горно-таежных ландшафтов интенсивность ветрового рассеяния радионуклидов из отвалов существенно ниже, чем такового гидрогенного. Активное выщелачивание урана из пород отвалов привело к резкому нарушению в почвах долины ручья Акин радиоактивного равновесия между радием и материнским радионуклидом в сторону его избытка. Длительное бесконтрольное воздействие радиоактивных отвалов на окружающую среду способствовало накоплению активностей урана и радия в почвах до уровней низко- (14 252–66 836 Бк/кг) и среднеактивных (102 294–601 987 Бк/кг) твердых радиоактивных отходов. В настоящее время в Эльконском урановорудном районе проблема загрязнения окружающей среды естественными радионуклидами остается чрезвычайно актуальной и требует пристального внимания со стороны специалистов охраны природы.

Ключевые слова: Алданское нагорье, отвалы, загрязнение почв, отходы

DOI: 10.31857/S0032180X24120163, **EDN:** JCCQVN

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже 50–60-х гг. XX в. на территории Южной Якутии в северной части Алданского нагорья (Эльконский горст) были открыты гидротермальные месторождения урана [25]. В 1960–1980 гг. на этих урановых месторождениях были проведены широкомасштабные геологические и геологоразведочные работы путем бурения, проходки канав и подземных горных выработок [11]. Здесь запасы урана по 22 месторождениям были впервые утверждены государственной комиссией по запасам полезных ископаемых СССР в 1968 г. Позднее,

еще в течение 16 лет продолжалась разведка основных участков главной рудоносной структуры этого района — зоны Южной и крупного месторождения зоны Северной, разведанные запасы которых были переутверждены в 1981 г. Главная рудовмещающая зона Южная представляет собой подновленный в мезозое древний тектонический шов протяженностью более трех десятков километров [15]. В пределах данной зоны выделяются участки, рассматриваемые как отдельные месторождения: Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное и Минеевское. В процессе проведения детальных геологоразведочных работ на этих месторождениях

из штолен и шахт были извлечены значительные массы радиоактивных пород на дневную поверхность и складированы в отвалы без соблюдения норм радиационной безопасности. В результате отвалы пород сразу стали постоянно действующими источниками радиоактивного загрязнения природной среды [21, 22]. Сложившаяся радиоэкологическая обстановка в данном регионе давно беспокоит местных жителей, в последние годы это беспокойство только усиливается, в связи с добычей из руд месторождений Лунное и Северное золота методом кучного выщелачивания, способствующего образованию огромных количеств новых радиоактивных отходов [3, 23]. Вместе с тем на законсервированных разведочных участках урановых месторождений Эльконского урановорудного района до сих пор слабо изучены физико-химические свойства почв и современные уровни их радиоактивного загрязнения как главных компонентов наземных экосистем, аккумулирующих поллютанты.

Цель работы — оценка радиоэкологической обстановки территории складирования в отвалы радиоактивных пород полевыми радиометрическими методами, а также анализ современных уровней загрязнения почв естественными радионуклидами и их особенностей вертикального распределения по профилю.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Радиоэкологические исследования в районе расположения месторождения Эльконское плато были выполнены в августе–сентябре 2022 г. (рис. 1). К данному месторождению относят отрезок центральной части зоны Южной протяженностью 3,3 км, расположенный между месторождениями Курунг на юго-востоке и Элькон на северо-западе [11]. Разведочные работы на месторождении выполнялись в 1963–1966 и 1968–1980 гг. Возможно, значительные по объему отвалы радиоактивных пород и руд в основном появились в процессе детальных геологоразведочных работ 32–54 года назад (рис. 2). В долине ручья Акин общая площадь, занимаемая радиоактивными отвалами, составляет примерно 16 956 м². Участок Эльконское плато располагается в сложнодислоцированной толще архейских, преимущественно гранитизированных диопсидовых, пироксен-амфиболовых и амфибол-биотитовых гнейсов и раннепротерозойских гранитоидов.

Район исследования представляет горную территорию с абсолютными отметками от 624 до 1045 м. Водораздельные склоны и долина ручья каменистые, в них широко развиты курумы. В этих условиях почвенный покров развит очень слабо и здесь значительные площади вместе с почвами занимают камни, перекрытые только лесной подстилкой, мхами и лишайниками. Растительность

представлена верхне- и среднетаежными лесами, состоящими из лиственницы Каяндера с примесью сосны обыкновенной, ели сибирской и березы шерстистой. В подлеске встречаются разные виды ив, береза растопыренная, кедровый стланник и другие растения. Климат обследуемой территории резко континентальный с относительно большим количеством атмосферных осадков для Якутии (500–600 мм в год). Среднегодовые температуры воздуха составляют порядка -9.0°C с амплитудой колебания температуры в течение года до 80°C . Зимний период длится около 7 мес. Снежный покров сходит в мае–июне. Атмосферные осадки выпадают с июня по сентябрь. Большая часть атмосферных осадков расходуется на поверхностный сток. Рассматриваемый регион находится в зоне островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Здесь на водораздельных пространствах формируются подбуры типичные и сухоторфянистые. В пойме и на надпойменной террасе ручья развиваются аллювиальные, лугово-болотные и торфянисто-болотные почвы (табл. 1).

В начале радиоэкологических работ была выполнена площадная радиометрическая съемка территории, охватывающая место складирования отвалов радиоактивных пород и руд с помощью радиометра СРП-68-01 (НТП “Промприбор”, Россия) [8]. При проведении съемки величину мощности экспозиционной дозы γ -излучения измеряли на уровне поверхности земли по прямоугольной сети (50×25 м), разбитой с помощью спутникового навигационного устройства Etrex H (Garmin Ltd., США). При этом измеренные радиометром значения мощности экспозиционной дозы в мкР/ч переведены в значения мощности эквивалентной дозы в мкЗв/ч. Закладку почвенных разрезов проводили с учетом возможных преобладающих путей поступления (гидрогенное и аэротехногенное) радионуклидов из источников (отвалы) на почвенный покров. Из почвенных разрезов производили отбор образцов послойно через 0–1, 1–7, 7–15, 15–35 см максимально до глубины 56 см с учетом границ генетических горизонтов. Индексы генетических горизонтов изучаемых мерзлотных почв указаны в соответствии с принципами, изложенными в “Едином государственном реестре почвенных ресурсов России” [7].

Почвенные свойства определяли с помощью стандартных методов исследования [1, 4]. Удельные активности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных образцах измеряли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра ПрогрессГамма (НПП “Доза”, Россия) со сцинтилляционным детектором NaI (TI) при ошибке счета не более 30% [11]. Определение урана в почвах проводилось методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S8 Tiger (AXS Bruker, Германия) в аналитическом центре

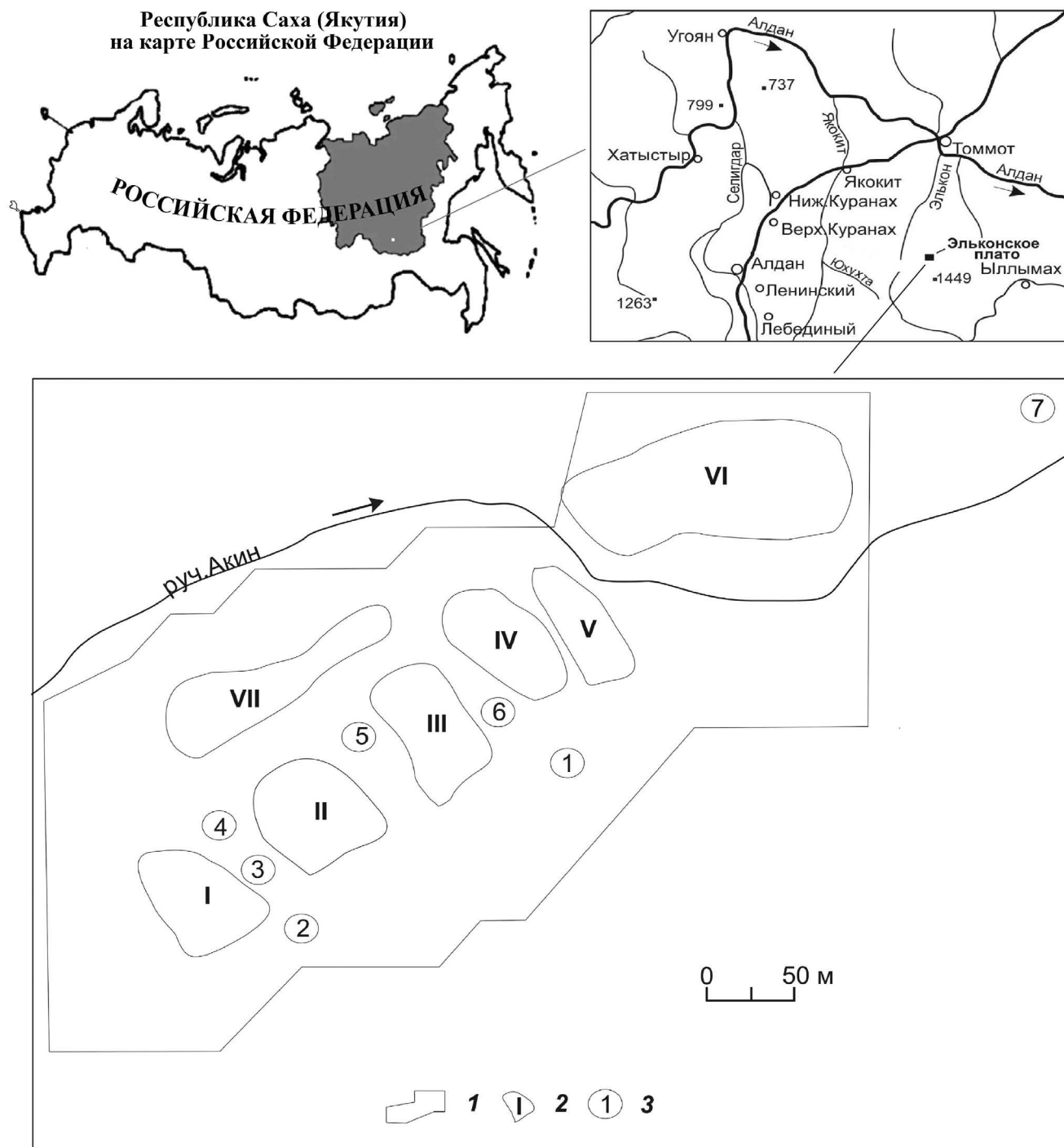


Рис. 1. Карта-схема района исследования: 1 – площадь радиометрической съемки; 2 – номера отвалов; 3 – номера почвенных разрезов.

Института геохимии СО РАН по методике, описанной в работе [10]. Данная методика обеспечивает определение удельной активности урана в почвах с погрешностью 7%. Корреляционный анализ для выявления тесноты связи между почвенными параметрами (органическое вещество, pH водной

вытяжки, сумма обменных катионов) и удельной активностью ЕРН в почвах выполнен согласно методам математической статистики, в почвоведении [6].

Для почв исследуемого района характерны небольшие мощности профилей, значительная каме-



Рис. 2. Один из самых радиоактивных отвалов урановых руд, складированный в долине ручья Акин (сентябрь, 2022 г.).

Таблица 1. Географические и морфологические характеристики исследуемых почв

Почва	Географические координаты	Местоположение	Строение профиля
Подбур типичный, разрез 1 (Entic Podzols)	58°40'13.6" N, 126°12'36.0" E, $h = 706$	Нижняя часть склона	O(0–2)–A0(2–5)–A0A1(5–10)– Alpir(10–17)–[A0](17–24)– BCpir(24–32 см)
Подбур типичный, разрез 2 (Entic Podzols)	58°40'10.5" N, 126°12'26.6" E, $h = 701$	Нижняя часть склона	O(0–2)–A0A(2–4)–AB(4–6)–B(6–12)– BC(12–32 см)
Лугово-болотная, разрез 3 (Dystric Gleysols)	58°40'12.0" N, 126°12'24.8" E, $h = 685$	Надпойменная терраса	Av(0–4)–A0A1(4–11)–A0A1(11–24)– Bh(24–29)–Bh(29–39)–BCg(39–56 см)
Аллювиальная темногомусовая, разрез 4 (Haplic Fluvisols Oxyaquic)	58°40'12.5" N, 126°12'23.8" E, $h = 682$	Надпойменная терраса	O(0–1)–O(1–3)–A0(3–5)–A0A1(5–12)– B(12–17)–B(17–23)–BC(23–30 см)
Подбур типичный, разрез 5 (Entic Podzols)	58°40'14.2" N, 126°12'28.9" E, $h = 681$	Надпойменная терраса	O(0–7)–A1(7–16)–BC(16–32 см)
Торфянисто-болотная, разрез 6 (Fibric Histosols (Dystric))	58°40'14.6" N, 126°12'33.9" E, $h = 684$	Надпойменная терраса	O(0–2)–O(2–5)–O(5–8)–T1(8–13)– T1(13–18)–T1(18–23)–T2(23–28)– T2(28–40 см)
Аллювиальная темногомусовая, разрез 7 (Eutric Fluvisols (Oxyaquic))	58°40'19.9" N, 126°12'53.6" E, $h = 664$	Высокая пойма	O(0–4)–O(4–7)–A1(7–11)–BC(11–28 см)

Примечание. В скобках – названия почв по WRB [26].

нистость и промывной водный режим. При этом величина рН водной вытяжки в почвах изменяется от кислой (4.3) до слабощелочной (7.2) (табл. 2). Количественный состав обменных оснований в почвах значительно варьирует. Например, в подбуре типичном разрез 1 и торфянисто-болотной почве разрез 6, имеющих в основном кислую реакцию рН (4.3–4.9) водной вытяжки, в составе обменных катионов преобладает H^+ , составляя 38.7–108.7 смоль(экв)/кг, а в лугово-болотной почве со слабощелочной реакцией среды (7.1–7.2) в составе обменных оснований преобладает Ca^{2+} и Mg^{2+} , количество которых равно 40.1–86.4 смоль(экв)/кг. На обследованной территории в почвах водораздела и долины ручья Акин, в силу наличия значительной массы слабо разложившегося органического вещества, наилка и древесных углей в почвенных горизонтах, значение потери при прокаливании и содержание гумуса достигают 95.9% и 20.1% соответственно. Для изученных почв обнаруженные минеральные горизонты обычно имеют супесчаный, легко- и среднесуглинистый гранулометрический состав.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На территории законсервированного геолого-разведочного участка месторождения Эльконское плато результаты проведенной наземной площадной радиометрической съемки показали, что мощность эквивалентной дозы γ -излучения изменяется от 0.13 до 12.0 мкЗв/ч. При этом наиболее высокие значения мощности дозы фиксируются в основном в пределах контуров отвалов, составляя 1.0–12.0 мкЗв/ч и более (рис. 3). Обнаруженные за пределами площади отвалов участки с повышенным радиационным фоном связаны с загрязнением почв естественными радионуклидами (ЕРН), отсыпкой местности радиоактивными породами и развалинами гранитоидных пород. Так, на карте γ -поля в южной части площади съемки, на левой стороне, выделяются небольшие по интенсивности γ -излучения или аномальные участки, ограниченные изолиниями мощности дозы выше 0.3 мкЗв/ч, которые приурочены к глыбам гранитов водораздельного склона. В настоящее время на данных участках ветровое рассеяние ЕРН из отвалов не вносит существенный вклад в формирование мощности дозы гамма-излучения из-за слабого уровня поверхностного загрязнения пород. В радиоактивных породах отвалов удельная активность ^{40}K составляет 878–3 486, ^{238}U – 41–18 204 и ^{232}Th – 15–322 Бк/кг [23]. По данным геологов-поисковиков в рудах месторождения Эльконское плато между ураном и радием существует радиоактивное равновесие [11]. Это означает, что активность радия в этих рудах должна быть равной активности его материнского радионуклида – урана. Наибольшие

значения активностей калия, урана и тория были зафиксированы в первом отвале. Отметим, что на обследуемой территории фоновые уровни удельных активностей ^{40}K в почвах и горных породах (кристаллические сланцы, гнейсы, гранитоиды) изменяются от 355 до 1 510 Бк/кг, ^{238}U – от 15 до 105 Бк/кг и ^{232}Th – от 5 до 316 Бк/кг. Из этих данных следует, что удельная активность тория в отвалах варьирует в пределах местного геохимического фона, а калия и урана превышают таковые в среднем в 5 и 463 раза соответственно. В целом отвалы по составу представляют отбитые массы руд и околорудных вмещающих горных пород разной крупности, вынесенные на поверхность из штольни после некоторой радиометрической сортировки для складирования на промышленной площадке. Радиационный фон и активности ЕРН в отвалах соответственно изменяются от фоновых до аномально высоких значений.

На месте закладки почвенных разрезов мощность дозы γ -излучения на поверхности изменялась от 0.16 до 5.0 мкЗв/ч. При этом удельная активность ^{40}K в почвах варьировала в пределах 57–1 148 Бк/кг, ^{238}U – 11–565 367 Бк/кг, ^{226}Ra – 16–36 680 Бк/кг и ^{232}Th – 4–269 Бк/кг (табл. 3). Наибольшие значения удельных активностей ЕРН были обнаружены в лугово-болотной почве (разрез 3), формирующейся на лугу вблизи первого отвала. В данной почве калий, радий и торий по глубине распределяются одинаково. Максимумы удельных активностей этих радионуклидов обнаруживаются в верхней части почвы с постепенными уменьшениями их значений по глубине. Для урана такой закономерности не обнаруживается. На общем повышенном фоне удельной активности урана по всему профилю лугово-болотной почвы максимумы значений обнаруживаются в верхней и нижней

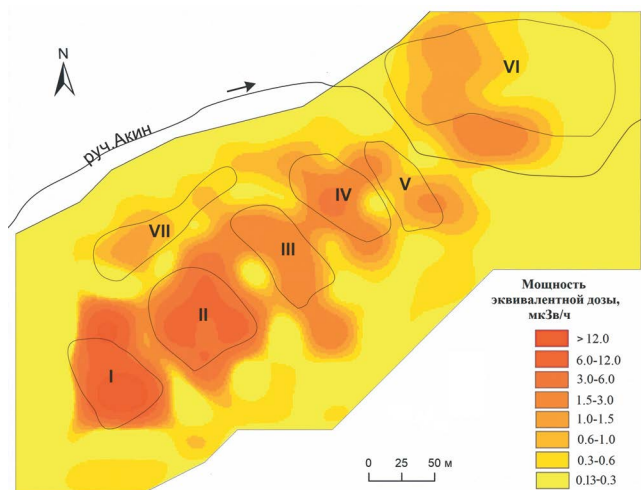


Рис. 3. Карта γ -поля на промышленной площадке в долине ручья Акин.

Таблица 2. Физико-химические свойства почв

Горизонт	Глубина, см	рН _{Н₂О}	Гумус (ППП)*, %	Обменные катионы, смоль(экв)/кг				Фракции, %; размер, мм	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Н ⁺	сумма	<0.001	<0.01
Подбур типичный, разрез 1									
О	0–2	4.9	84.7*	—	—	—	—	—	—
A0	2–5	4.4	52.9*	11.0	8.3	40.3	59.6	—	—
A0A1	5–10	4.4	33.6*	3.9	11.7	38.7	54.3	9.7	19.3
A1pir	10–17	4.4	42.2*	6.6	6.0	45.4	58.0	—	—
[A0]	17–24	4.4	73.8*	9.6	12.0	66.8	88.4	—	—
BCpir	24–32	4.3	36.8*	4.7	7.0	41.3	53.0	15.6	33.0
Лугово-болотная, разрез 3									
Av	0–4	6.5	89.1*	68.0	34.0	1.7	103.7	—	—
A0A1	4–11	7.1	51.9*	71.5	32.5	0.3	104.3	—	—
A0A1	11–24	7.2	50.3*	70.1	35.9	0.7	106.7	—	—
Bh	24–29	7.1	45.7*	86.4	40.1	0.7	127.2	—	—
Bh	29–39	7.0	40.8*	65.5	21.8	0.4	87.7	—	—
BCg	39–56	6.8	17.0	26.0	9.1	0.2	35.3	11.2	21.6
Аллювиальная темногумусовая, разрез 4									
О	0–1	5.2	95.1*	—	—	—	—	—	—
О	1–3	5.0	93.5*	47.3	32.5	22.6	102.4	—	—
A0	3–5	5.2	57.8*	33.6	25.1	20.0	78.7	—	—
A0A1	5–12	5.8	43.8*	24.7	20.9	15.2	60.8	—	—
B	12–17	6.0	16.4	10.2	10.3	3.5	24.0	8.2	16.5
B	17–23	6.1	9.8	5.2	9.2	3.6	18.0	8.9	17.5
BC	23–30	5.9	14.0	7.6	6.4	5.4	19.4	9.8	19.5
Подбур типичный, разрез 5									
О	0–7	5.6	76.7*	105.4	32.7	14.8	152.9	—	—
A1	7–16	5.6	16.9*	26.8	26.9	12.3	66.0	—	—
BC	16–32	5.8	20.9*	32.9	27.8	9.8	70.5	—	—
Торфянисто-болотная, разрез 6									
О	0–2	5.1	95.9*	—	—	—	—	—	—
О	2–5	4.5	95.9*	—	—	—	—	—	—
О	5–8	4.4	93.1*	29.5	13.0	65.3	107.8	—	—
T1	8–13	4.4	87.7*	21.7	16.6	89.7	128.0	—	—
T1	13–18	4.4	83.6*	8.3	12.0	108.7	129.0	—	—
T1	18–23	4.5	81.1*	6.3	11.4	105.5	123.2	—	—
T2	23–28	4.8	66.0*	5.3	5.2	91.6	102.1	—	—
T2	28–40	4.8	67.6*	4.3	7.6	92.5	104.4	—	—
Аллювиальная темногумусовая, разрез 7									
О	0–4	5.8	93.9*	127.7	18.2	15.4	161.3	—	—
О	4–7	5.4	77.9*	84.6	31.3	17.6	133.5	—	—
A1	7–11	5.2	20.1	24.5	15.7	20.6	60.8	—	—
BC	11–28	5.5	1.6	7.1	3.6	3.4	14.1	—	—

* Приведено значение потери при прокаливании, прочерк — не определено.

Таблица 3. Удельная активность и распределение ЕРН в почвах

Горизонт	Глубина, см	⁴⁰ K	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	²²⁶ Ra ²³⁸ U
		Бк/кг				
Подбур типичный, разрез 1						
O	0—2	Н.о.*	34	45	Н.о	1.32
A0	2—5	»	25	30	»	1.20
A0A1	5—10	177	34	32	4	0.94
A1pir	10—17	132	22	26	4	1.18
[A0]	17—24	158	30	36	5	1.20
BCpir	24—32	197	33	30	5	0.91
	Среднее	166	29	33	5	1.13
Подбур типичный, разрез 2						
O	0—2	Н.о	11	16	Н.о	1.45
A0A	2—4	178	13	12	9	0.92
AB	4—6	207	23	25	9	1.08
B	6—12	444	14	19	13	1.37
BC	12—32	503	19	16	13	0.84
	Среднее	333	16	18	11	1.13
Лугово-болотная, разрез 3						
Av	0—4	1717	227575	19237	165	0.08
A0A1	4—11	2088	565367	36620	269	0.06
A0A1	11—24	1025	318388	11820	267	0.04
Bh	24—29	1407	334421	4431	258	0.01
Bh	29—39	580	371460	3149	140	0.008
BCg	39—56	599	154980	2151	83	0.01
	Среднее	1236	328698	12901	197	0.03
Аллювиальная темногумусовая, разрез 4						
O	0—1	н.о	1754	113	Н.о	0.064
O	1—3	338	123000	175	58	0.001
A0	3—5	1148	101758	536	112	0.005
A0A1	5—12	1038	66617	219	87	0.003
B	12—17	788	15055	90	30	0.006
B	17—23	103	6335	28	11	0.004
BC	23—30	585	3702	37	16	0.010
	Среднее	667	46329	171	52	0.006
Подбур типичный, разрез 5						
O	0—7	1332	12817	1435	150	0.11
A1	7—16	868	1156	213	75	0.18
BC	16—32	1136	2312	374	131	0.16
	Среднее	1112	5428	674	117	0.15

Окончание табл. 3

Горизонт	Глубина, см	⁴⁰ K	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	$\frac{^{226}\text{Ra}}{^{238}\text{U}}$
		Бк/кг				²³⁸ U
Торфянисто-болотная, разрез 6						
O	0–2	Н.о	314	29	8	0.09
O	2–5	57	1347	43	14	0.03
O	5–8	156	2812	38	25	0.01
T1	8–13	136	2011	59	44	0.03
T1	13–18	123	601	23	81	0.04
T1	18–23	197	389	24	88	0.06
T2	23–28	104	311	37	71	0.12
T2	28–40	134	298	40	64	0.13
	Среднее	130	1010	35	49	0.06
Аллювиальная темногомусовая, разрез 7						
O	0–4	90	57	18	4	0.31
O	4–7	165	74	25	12	0.34
A1	7–11	446	98	31	16	0.31
BC	11–28	769	98	25	16	0.26
	Среднее	368	82	25	12	0.31

*Н.о. – не обнаружено.

части профиля на глубинах 4–11 и 29–39 см, соответственно составляя 567 367 и 371 460 Бк/кг. Обнаруженный максимальный уровень активности урана в данной почве превышает таковой в рудной массе отвала в 31 раз, а местный повышенный геохимический фон – в 5 384 раза. Корреляционный анализ показал, что между изученными свойствами почв, такими как рНН₂О, содержание органического вещества, сумма обменных катионов и вертикальным распределением удельных активностей ЕРН по их профилю в целом не обнаруживаются какие-либо четкие устойчивые корреляционные связи. Например, в подбуре типичном (разрез 5), приуроченному к долине ручья Акин, между содержанием органического вещества, суммой обменных катионов и распределением удельных активностей калия, урана, радия и тория по глубине почв выявляются прямые корреляционные связи (0.74–0.99). В то же время в этом же типе почв (разрез 1), формирующемся на водораздельном склоне, только для радия обнаруживаются наиболее тесные связи с рН водной вытяжки и содержанием органического вещества (0.84 и 0.86). В аллювиальной темногомусовой почве (разрез 4) прямые корреляционные связи отмечались для количества урана и содержания органического вещества, а также суммы обменных катионов (0.97 и 0.99). Неустойчивые

межэлементные связи также выявляются по распределению активностей ЕРН по глубине почв. Наиболее тесную взаимную зависимость содержания ЕРН имеют в подбуре типичном (разрез 5): К–U (0.86), К–Ra, (0.88), К–Th (0.98), U–Ra (0.99), U–Th (0.76) и Th–Ra (0.78). В аллювиальных темногомусовых почвах (разрезы 4 и 7) количество радия имеет прямую связь с торием (0.93), а уран с радием и торием (0.84 и 0.97).

ОБСУЖДЕНИЕ

В почвах долины ручья Акин особенности водной миграции ЕРН из отвалов радиоактивных руд, в условиях островного распространения многолетней мерзлоты, четко отражают их уровни загрязнения и вертикального распределения удельных активностей радионуклидов по профилю почв. Возможно, из отвалов уран мигрирует преимущественно в составе жидкого, а калий, радий и торий твердого стоков. Значительную неравномерную обогащенность ураном лугово-болотной почвы с двумя максимумами активностей радионуклида на разной глубине можно объяснить: во-первых, высокой выщелачиваемостью его из рудной массы отвала, а во-вторых, застойностью воды на луге в период затяжных дождей из-за наличия островной

мерзлоты, а также ее испарениями в жаркие дни. На обследованной площади островная мерзлота, создающая водоупор, в основном распространена на месте расположения первого отвала. Поэтому здесь после длительных летне-осенних дождей из-под отвала появляется временный водный сток, направленный в сторону небольшого луга, расположенного посреди леса. Просочившаяся по толще пород отвала дождевая вода значительно обогащается ураном до 0.04 Бк/л, что на 4 порядка выше местного геохимического фона [22]. В то же время в этой воде объемная активность радия не превышает его фоновый уровень. Активной водной миграции радия здесь препятствует пирит-карбонат-калиевошпатовый состав метасоматической радиоактивной руды с высоким содержанием K_2O , CO_2 карбонатов и S сульфидов, формирующий сульфатно-натриево-кальциевый состав водного стока [13]. В аллювиальной темногумусовой почве (разрез 4), формирующейся вне площади луга в условиях отсутствия многолетней мерзлоты, вертикальное распределение урана с калием, радием и торием становится схожим. В данной почве максимальные значения удельных активностей ЕРН фиксируются в верхней части почвы, а минимальные — в нижней. При фильтрации воды в этой почве наибольшее количество ЕРН задерживается верхними горизонтами почв. При этом ежегодные поступления на поверхность почв слабо радиоактивной хвои, листьев и наземной части отмирающих трав немного обедняют их верхние слои радионуклидами. Поэтому во многих случаях максимумы удельных активностей ЕРН оказываются в погребенном состоянии. Это очевидно по вертикальному распределению ЕРН, которое присутствует в почвенных разрезах 3, 4 и 6. В долиненной части обследованной площади интенсивная гидрогенная миграция урана из отвалов хорошо отражается в отношении активностей радия к урану в почвах (разрезы 3–7), которая изменяется от 0.001 до 0.34. В целом уровень гидрогенного

техногенного радиоактивного загрязнения почв в зоне воздействия отвалов несравнимо больший, по сравнению с аэральным. В почвах, формирующихся на водораздельном склоне выше отвалов (разрезы 1, 2), подвергающихся только аэротехногенному воздействию за счет выдувания ветром с поверхности отвалов мелкодисперсной пылевой фракции руды, в их верхней части отмечаются уровни загрязнения ураном и радием на 2–5 порядков величин ниже, чем таковые в почвах долины. Резкое уменьшение удельных активностей урана и радия в аллювиальной темногумусовой почве (разрез 7), развивающейся на высокой пойме ручья Акин на расстоянии 120 м от промышленной площадки, по сравнению с почвами, формирующимися вблизи отвалов, указывает на значительную роль почвенного покрова как естественного геохимического фильтра на пути миграции ЕРН.

В настоящее время опубликованные в открытой печати данные показывают, что в некоторых странах СНГ и Российской Федерации в районах размещения предприятий по добыче и переработке урановых руд обнаруженные значения техногенных загрязнений урана в грунтах и почвах составляют 2044–219 600 Бк/кг (табл. 4) [5, 9, 18]. Эти величины вполне сопоставимы с уровнями загрязнения почв ураном (1 347–565 367 Бк/кг) на территории законсервированного месторождения Эльконское плато. На обследованном участке данного месторождения удельные активности радионуклидов в некоторых почвах чрезвычайно высокие, поэтому целесообразно оценить их соответствия по данному радиационному показателю к радиоактивным отходам. Согласно ОСПОРБ 99/2010, к твердым радиоактивным отходам относятся не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунты, удельные активности техногенных радионуклидов в которых превышают минимально значимые удельные активности радионуклидов (МЗУА) (сумма отношений удельных активностей

Таблица 4. Уровни удельной активности урана, зафиксированные в грунтах и почвах в районе размещения предприятий по добыче и переработке урановых руд

Страна	Предприятие (место расположения)	Бк/кг	Источник
Российская Федерация	Лермонтовское горнорудное управление (г. Лермонтов, Ставропольский край)	12 500–219 600	[9, 18, 19]
	Приаргунский горно-химический комбинат (г. Краснокаменск, Забайкальский край)	6 150–12 300	[19, 20]
Республика Таджикистан	Ленинабадский горно-химический комбинат (г. Ленинабад, ныне г. Худжанд, Согдийская область)	50 295–66 420	[2, 14, 19]
Кыргызская Республика	Киргизский горнорудный комбинат (г. Фрунзе, ныне г. Бишкек)	2044–3 152	[5, 19]

техногенных радионуклидов к их МЗУА превышает 1) [17]. Установленные в НРБ-99/2009 МЗУА для ^{238}U составляет 10 000 Бк/кг, ^{226}Ra — 10 000 Бк/кг и ^{232}Th — 1 000 Бк/кг [16]. В почвенных разрезах 3, 4 и 5 обнаруженные активности ^{238}U и ^{226}Ra превышают их МЗУА в 1.2–57.0 и 1.2–3.7 раза соответственно. В целом по суммарной активности ЕРН данные почвы относятся к низко- (14 252–66 836 Бк/кг) и среднеактивным (10 2294–601 987 Бк/кг) твердым радиоактивным отходам [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время радиоэкологическая обстановка на территории законсервированного геологоразведочного участка на месторождении Эльконское плато в Южной Якутии чрезвычайно сложная. Площадная радиометрическая съемка показала, что вынос на поверхность огромной массы радиоактивных пород и складирование их в долине ручья Акин существенно изменили исходный радиационный фон территории. Наибольшие значения мощности эквивалентной дозы γ -излучения на поверхности отвалов достигают до 1.0–12.0 мкЗв/ч и более. При исходном естественном радиационном фоне местности 0.13–0.60 мкЗв/ч. Радиоактивные отвалы 32–54 лет бесконтрольно загрязняют природную среду ЕРН за счет их водного и ветрового рассеяния. При этом в силу гумидного климата горно-таежных ландшафтов Алданского нагорья водная миграция ЕРН из отвалов в составе жидкого и твердого стоков играет исключительно важную роль в их загрязнении. В почвах долины радиоактивное равновесие между ураном и радием нарушено в сторону избытка материнского радионуклида. В сложившейся радиоэкологической ситуации почвы долины ручья Акин выполняют роль естественного геохимического барьера на пути миграции ЕРН. В настоящее время в этих почвах уровни загрязнения ураном и радием настолько высокие, что соответствуют низко- и среднеактивным радиоактивным отходам. В изученном районе развиваются сильнокаменистые почвы, имеющие небольшие по мощности профили с высоким содержанием органического вещества и легкие по гранулометрическому составу. Данное обстоятельство благоприятствует в случае лесных пожаров активизации водной миграции ЕРН из загрязненной зоны по вектору стока ручья на дальние расстояния. В целом законсервированный геологоразведочный участок месторождения Эльконское плато требует проведения неотложных природоохранных мероприятий по рекультивации данной территории для перевода ее в безопасное состояние.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
2. *Бабоев Б.Д.* Физико-химические основы миграции урана в системе “дренажные воды–почва” на примере хвостохранилищ № 1–2 г. Табошар Республики Таджикистан. Автореф. ... канд. хим. наук. Душанбе, 2010. 23 с.
3. *Бурцев И.С.* Якутия радиоактивная. Якутск: Сахада, 2021. 152 с.
4. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 272 с.
5. *Дженбаев Б.М., Жолболдиев Б.Т., Калдыбаев Б.К., Кармышова У.Ж., Жумалиев Т.Н.* Радиоэкологическая оценка урановых хвостохранилищ Кыргызстана // Исследование живой природы Кыргызстана. 2018. № 1–2. С. 69–83.
6. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. 328 с.
7. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
8. Инструкция по работе со сцинтилляционными радиометрами при геологических съемках и поисках / Отв. ред. Ветров А.Г. Л.: Рудгеофизика, 1987. 44 с.
9. *Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С.* Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия НПО Алмаз // Радиация и риск. 2009. Т. 18. № 4. С. 73–81.
10. *Кузнецов П.В., Гребенщикова В.И., Айсуева Т.С.* Оценка содержания урана и тория в почвах г. Черемхово (Иркутская область) // Биосфера. 2013. Т. 5. № 2. С. 175–181.
11. *Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н.* Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

12. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением "Прогресс". М.: Центр метрологии, 2003. 16 с.
13. Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 29–151.
14. Мирсаидов У.М., Ахмедов М.З., Махмудова М.М., Шосафарова Ш.Г. Радиационно-гигиенический мониторинг на объектах уранового наследия северного Таджикистана // Сахаровские чтения: Экологические проблемы XXI века: Матер. 19-й междунар. конф. М., 2019. С. 276–279.
15. Наумов С.С., Шумилин М.В. Урановые месторождения Алдана // Отечественная геология. 1994. № 11/12. С. 20–23.
16. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Центр нормативно-технической информации "Медиа Сервис", 2019. 118 с.
17. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). М.: Центр нормативно-технической информации "Медиа Сервис", 2019. 84 с.
18. Панов А.В. Радиоэкологические проблемы в районе размещения Лермонтовского предприятия "Алмаз" по добыче и разработке урановой руды. Обзор. // Радиация и риск. 2023. Т. 38. № 1. С. 131–153.
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-1-131-153>
19. Петрухин Н.П. История создания уранодобычи. М., 2020. 438 с.
20. Россман Г.И., Бахур А.Е., Петрова Н.В. Промышленная радиационная экология минерального сырья // Минеральное сырье. М.: ВИМС, 2012. № 25. 318 с.
21. 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.
22. Собакин П.И. Естественные и искусственные радионуклиды в мерзлотных почвах Якутии. Автореф. ... докт. биол. наук. Улан-Удэ, 2015. 39 с.
23. Собакин П.И., Ушницкий В.Е., Герасимов Я.Р. Оценка радиоэкологической обстановки Эльконского урановорудного района (Алданский щит) методами полевой радиометрии // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 2. С. 191–204.
24. Собакин П.И., Чевычелов А.П., Васильев П.С. Радиационная и экологическая безопасность при разведке и освоении месторождений металлов в Южной Якутии // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 8. С. 58–64.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-8-58-64>
25. 50 лет Геологической службе Республики Саха (Якутия). М.: Российское геологическое о-во: Госком. Республики Саха (Якутия) по геологии и недропользованию, 2007. 381 с.
26. World reference base for soil resources 2006. IUSS Working Group. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 146 p.

Natural Radionuclides in Soils in the Area of the Elkon Plateau Uranium Deposit in South Yakutia

P. I. Sobakin¹*, A. P. Chevychelova,
A. N. Gorokhov¹, and T. S. Aisueva²

¹*Institute of Biological Problems of Cryolithozone
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, 677980 Russia*

²*Vinogradov Institute of Geochemistry, Irkutsk 664033 Russia*

*e-mail: radioecolog@yandex.ru

An assessment of the radioecological situation of the preserved geological exploration site at the Elkon Plateau field in the Aldan Highlands was carried out using field radiometry. It was found that the removal of a huge mass of radioactive rocks to the surface from underground mine workings (tunnels, mines) significantly increased the area with an increased radiation background equal to 1.0–12.0 mSv/h and more. Studies have shown that in conditions of anthropogenic pollution, the determining factors of migration, distribution and accumulation of natural radionuclides in soils, in addition to their chemical properties, are a humid climate, genetic features of radioactive ore, the presence of permafrost rocks, soil formation processes and the content of organic matter. Under the prevailing conditions of mountain-

taiga landscapes, the intensity of wind scattering of radionuclides from dumps is significantly lower than that of hydrogenic. The active leaching of uranium from the rocks of the dumps led to a sharp disturbance in the soils of the Akin Creek valley of the radioactive equilibrium between radium and the parent radionuclide towards its excess. Prolonged uncontrolled exposure of radioactive dumps to the environment contributed to the accumulation of uranium and radium activities in soils to levels of low (14 252–66 836 Bq/kg) and medium-active (102 294–601 987 Bq/kg) solid radioactive waste. Currently, the problem of environmental pollution with natural radionuclides in the Elkon uranium ore region remains extremely urgent and requires close attention from nature conservation specialists.

Keywords: Aldan Highlands, dumps, pollution soils, waste