

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.438.2

### РАДИОГЕОХИМИЯ ПОЧВ И ПЕСКОВ ТЕРРИТОРИИ МОНАЦИТОВОЙ РОССЫПИ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

© 2021 г. П. И. Собакин<sup>а</sup>, \*, А. П. Чевычелов<sup>а</sup>, А. Н. Горохов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр-т Ленина, 41, Якутск, 677980 Россия

\*e-mail: radioecolog@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Обсуждены результаты полевой радиометрической съемки, проведенной на территории добычи монацита из россыпи Васильевка в южной части Якутии. Показано, что естественная фоновая радиоактивность почв обследованной территории зависит от особенностей ее геологического строения и ландшафтно-геокриологических условий. На исследованном участке месторождения величина мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности почв в зависимости от изменений в них концентраций  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  варьирует в широком диапазоне от 0.04 до 0.50 мкЗв/ч и более. Радиогеохимические особенности почв изученной площади хорошо отображаются на радиометрических картах, представленных в виде изолиний мощности дозы и содержаний радионуклидов. Минимальные концентрации  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  отмечены в торфяно-болотной почве и торфянике верховом, развитых на водораздельных участках, сложенных кристаллическими сланцами и гнейсами, а максимальные – в подбурах и аллювиальных почвах, сформированных соответственно на продуктах выветривания гранитизированных пород и монацитоносных аллювиальных отложениях долины р. Васильевка. Изученные почвы характеризуются невысокими средними содержаниями  $^{40}\text{K}$  и  $^{238}\text{U}$ , соответствующими их фоновым значениям в почвах Якутии. Для  $^{232}\text{Th}$  в исследованных почвах свойственна повышенная по сравнению с геохимическим фоном средняя концентрация. Помимо состава почвообразующих пород на содержание и распределение радионуклидов в почвах существенно влияют почвообразовательные процессы, химические свойства элементов и техногенное воздействие. По эффективной удельной активности радионуклидов материал почв соответствует первому, второму и третьему классам строительных материалов. На отдельных участках техногенных ландшафтов почвогрунты и обогащенные пески по удельной активности тория относятся низкорadioактивным производственным отходам, для которых требуется утилизация. Выявленные участки естественной концентрации тория в аллювиальных отложениях, имеют строгие ограничения в использовании в качестве строительных материалов.

**Ключевые слова:** Алданское нагорье, изотопы калия, урана, тория, аллювиальная темногумусовая почва, Harlic Fluvisols, подбур типичный, Entic Podzols

**DOI:** 10.31857/S0032180X2112011X

#### ВВЕДЕНИЕ

В конце 40-х годов XX в. Таежной геологоразведочной экспедицией была выявлена и разведана монацитовая россыпь Васильевка на Алданском нагорье на территории Южной Якутии. В связи с необходимостью радиоактивного сырья для атомной промышленности страны в экстренном порядке в 1949–1952 гг. россыпь была разработана силами шестого специального отдела МВД СССР [21]. Радиогеохимические исследования на месте добычи монацита из россыпи впервые проводили в 90-х годах прошлого века и после некоторого перерыва возобновили только в последние годы. В результате этих научно-исследовательских работ были составлены карты радиометриче-

ских съемок местности, определены концентрации важнейших естественных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ) в рыхлых природных и техногенных образованиях горных пород с оценкой их радиационно-гигиенической принадлежности, а также выявлены некоторые особенности миграции тория в почвенно-растительном покрове в условиях техногенного загрязнения [15, 29]. Несмотря на уникальность радиогеохимической, геокриологической и геохимической обстановки территории монацитовой россыпи Васильевка, радиоактивность почв, формирующих почвенный покров данного района остается слабо изученной.

Изучение миграции естественных радионуклидов в почвах природных и техногенных ланд-

шафтов немерзлотных регионов России проводилось ранее [2, 7, 11, 14, 22], однако исследования в мерзлотной области за последнее время выполнены впервые [29, 34].

Цель исследования — оценка специфики площадного распределения естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах экспресс-полевыми радиометрическими методами на территории россыпи и определение особенностей вертикального распределения ЕРН по профилю разных типов почв с учетом их генезиса и географического распространения.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория расположена в долине среднего течения р. Васильевка на плоскогорье с абсолютными отметками 1123–1221 м над ур. моря. В геологическом строении изучаемого района участвуют кристаллические породы (сланцы, гнейсы и гранитоиды) архей-протерозойского возраста, составляющие фундамент Сибирской платформы [32]. В настоящее время место разработки монацитового россыпи Васильевка представляет собой полигон для открытой добычи сырья, законсервированных шахт, разрушенных бараксов и уцелевших остатков здания обогатительной фабрики месторождения (рис. 1).

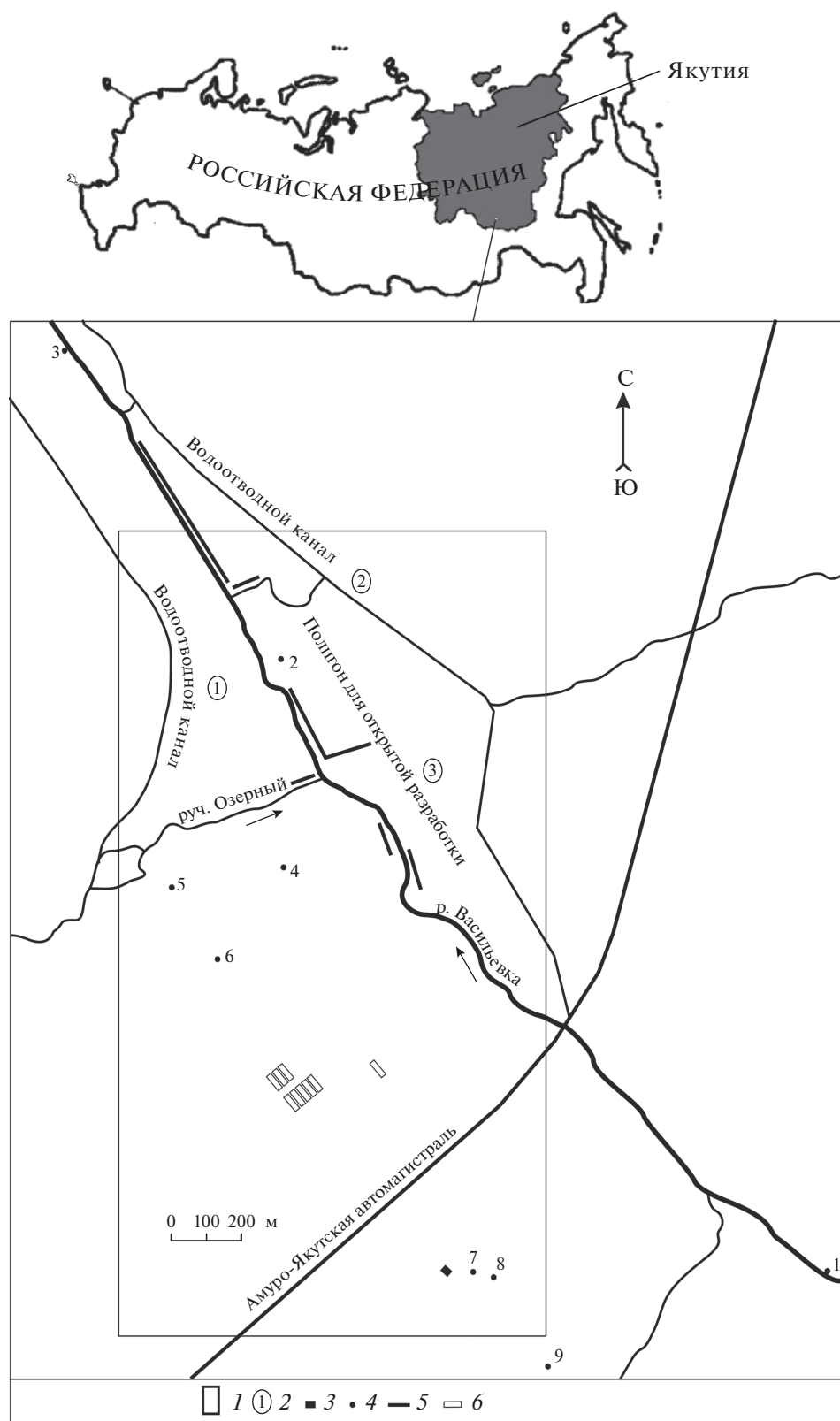
В начале полевых работ проведены маршрутные и площадные радиометрические съемки с помощью радиометра СРП-68-01 (НТП “Промприбор”, Россия) и переносного  $\gamma$ -спектрометра МКС-АТ6101Д (УП “Атомтех”, Беларусь) [10, 17]. Методика и техника полевых радиометрических съемок детально описаны ранее [29]. Согласно методике выполнения измерений радиометрическими приборами на обследованной территории, мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) и концентрацию калия, урана (по радию) и тория измеряли на уровне поверхности земли по прямоугольной ( $250 \times 100$  м) и произвольной сети в 411 точках. Как известно, в скальных горных породах в зависимости от их плотности полевым  $\gamma$ -спектрометрическим методом можно определить калий, уран и торий, сосредоточенные в полусфере с радиусом 10–20 см [13]. В рыхлых образованиях (почвы, почвогрунты, продукты разрушения горных пород) радиус активного сферического слоя изменяется от 15–20 до 30–50 см [5]. Поводом для  $\gamma$ -спектрометрического определения концентраций урана в почвах по равновесному радию послужило следующее обстоятельство. Известно, что во многих радиогеохимических ситуациях радиоактивное равновесие между ураном и радием в почвах хорошо сохраняется. Это подтверждается работами многих авторов, выполненными в разных природно-климатических зонах [30, 31]. Опыт показывает, что в условиях Алданского нагорья радиоактивное равновесие между ураном и радием

обычно нарушается в гидроморфных почвах, находящихся в зоне воздействия больших массивов горных пород с повышенным содержанием урана или отвалов урановых руд [28]. В районе расположения монацитового месторождения Васильевка, метаморфические и магматические породы участвующие в геологическом строении территории содержат невысокие концентрации урана.

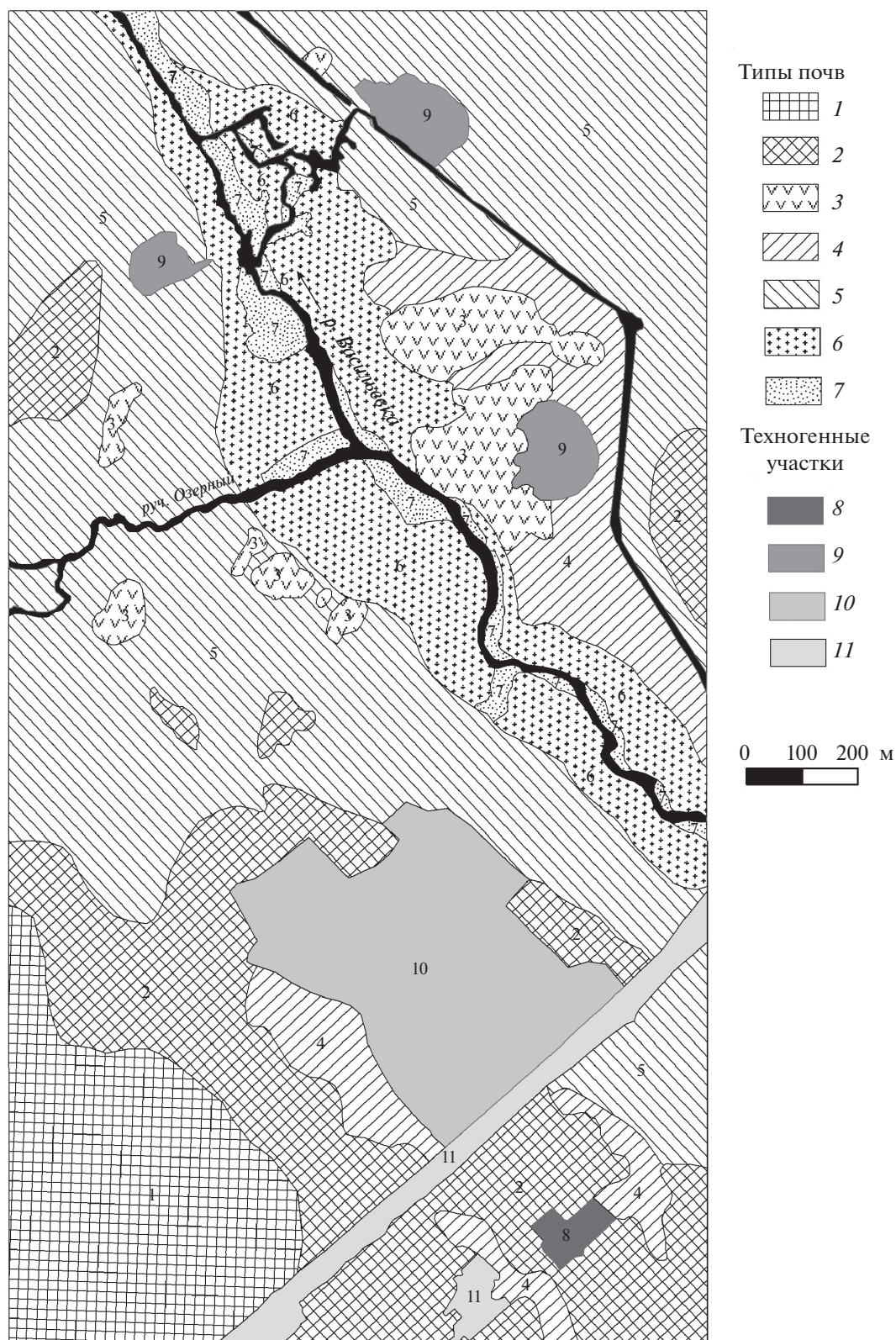
На основе опережающих данных маршрутных радиометрических измерений и геоморфологических наблюдений местности выбраны наиболее характерные участки поймы и водораздельного склона р. Васильевка для изучения полнопрофильных почв. Почвенные разрезы в ходе полевых работ были заложены в начале сентября 2014 и 2018 гг. в период максимальной мощности сезонно-талого слоя. При этом из девяти изученных разрезов только в профиле верхового торфяника обнаружена многолетняя мерзлота на глубине 65 см. Отбор образцов из почвенных разрезов проводили с учетом мощности их генетических горизонтов до глубины 65 см. В отобранных пробах почв после предварительной пробоподготовки осуществляли  $\gamma$ -спектрометрический анализ на содержание ЕРН с использованием спектрометра ПрогрессГ (НПП “Доза”, Россия) со сцинтилляционным детектором NaI (TI) при среднеквадратичной ошибке не более 30% [16].

При изучении состава почвенного покрова и свойств почв исследуемого региона применяли общепринятые почвенные методы исследований, такие как сравнительно-географический, сравнительно-аналитический [23] и профильно-генетический [24], а при изучении их физико-химических свойств и гранулометрического состава — известные методы лабораторных работ [1, 4, 12]. При этом обозначение генетических горизонтов почв выполняли в соответствии с принципами [8], а диагностику и классификацию почв — согласно [9]. В районе исследования на основании изучения почвенных разрезов, прикопок, рельефа местности, растительности и техногенных элементов ландшафта с использованием аэрокосмического снимка и компьютерной программы Google Earth Pro выделяли почвенные контуры, то есть площади распространения отдельных типов почв или почвенных сочетаний. Выделенные почвенные контуры на территории площади радиометрической съемки затем представлены в виде почвенной карты (рис. 2).

Долина р. Васильевка в геоморфологическом отношении представляет слабоврезанное в рельеф Алданского нагорья корытообразное понижение с пологими прилегающими бортами. В пойме р. Васильевка, вдоль ее русла, формируются аллювиальные слоистые почвы, развитые, главным образом, по бичевникам или песчаным косам, ежегодно заливаемые полыми водами. По более высоким



**Рис. 1.** Карта-схема района исследования: 1 – площадь радиометрической съемки, 2 – шахты, 3 – фабрика, 4 – номер разреза, 5 – отвалы вскрышных пород, 6 – бараки.



**Рис. 2.** Почвенная карта района исследования. Типы почв: 1 – подбуры маломощные с курумами, 2 – подбуры, торфяники верховые, 3 – бугры с торфяниками верховыми, 4 – торфянисто- и торфяно-болотные, 5 – торфянисто-болотные и подбуры сухоторфянистые, 6 – аллювиальные темногумусовые и торфянисто-болотные, 7 – аллювиальные слоистые с песками, галечниками и валунниками, техногенные участки: 8 – промплощадка обогатительной фабрики с отвалов монацитных песков, 9 – промплощадки шахт с отвалами намытых песков, 10 – поселок, 11 – дорога и дорожный карьер.

**Таблица 1.** Географические и морфологические характеристики исследуемых почв

Почва, № разреза (название по WRB)	Географические координаты	Местоположение	Строение профиля
Аллювиальная темногумусовая, 1 (Haplic Fluvisols)	57°50'14.3" N, 125°22'50.5" E, <i>h</i> = 1142	Высокая пойма	Av(0–9)–AB(9–19)–B(19–40)– [AB](40–60 см)
Аллювиальная темногумусовая, 2 (Haplic Fluvisols)	57°50'28.7" N, 125°22'34.9" E, <i>h</i> = 1130	Высокая пойма	Av(0–5)–AB(5–20)–B(20–35)– BC(35–56 см)
Аллювиальная темногумусовая, 3 (Haplic Fluvisols)	57°51'0.9" N, 125°21'55.0" E, <i>h</i> = 1124	Высокая пойма	Av(0–7)–A(7–14)–B(14–40)– C(40–60 см)
Торфяно-болотная, 4 (Dystric Histic Gleysols)	57°50'11.1" N, 125°22'31.7" E, <i>h</i> = 1131	Подножье склона	O(0–5)–O1(5–20)–O2(20–35)– BCg(35–58 см)
Торфяник верховой, 5 (Dystric Fibric Histosols)	57°50'6.5" N, 125°22'15.1" E, <i>h</i> = 1148	Средняя часть склона	O(0–5)–O1(5–20)–O2(20–65 см)
Подбур типичный, 6 (Entic Podzols)	57°49'59.3" N, 125°22'23.4" E, <i>h</i> = 1147	Средняя часть склона	O(0–4)–A1(4–7)–B(7–11)– BC(11–28 см)
Подбур оподзоленный, 8 (Entic Podzols)	57°49'29.9" N, 125°23'11.9" E, <i>h</i> = 1152	Верхняя часть склона	O(0–3)–A0A2(3–12)–B(12–17)– BC(17–34 см)

участкам поймы формируются аллювиальные темногумусовые почвы в комплексе с торфянисто-болотными, развитыми под нормальными и заболоченными осоковыми лугами. На нижних склонах бортов долины формируются торфянисто- и торфяно-болотные почвы в комплексе с подбурами сухоторфянистыми, а по повышению рельефа, на буграх – верховые торфяники. В почвенном покрове средней части долины данной реки абсолютно преобладают подбуры, а в верхней – маломощные подбуры или литоземы, сочетающиеся по микроповышениям рельефа с каменными россыпями (табл. 1).

Физико-химические свойства почв изучаемого района соответствуют их географо-генетическим особенностям, которые определяются влиянием холодного гумидного климата и горно-таежной растительности. Аллювиальные темногумусовые почвы (разр. 1–3) характеризуются, согласно шкале [18], сильнокислой и кислой реакцией среды, большим количеством почвенного органического вещества, содержание  $C_{орг}$  изменяется от 3.6 до 21.9%, повышенные его количества отмечаются в верхней, средней и нижней частях профилей (табл. 2). Также данные почвы отличаются низким содержанием обменных оснований  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  и легким супесчаным гранулометрическим составом. В то время как гранулометрический состав минерального гор. BCg, торфяно-болотной

почвы разр. 3, согласно градациям Н.А. Качинского (1958), оценивается как легкосуглинистый, а автоморфного подбура типичного разр. 6 – как легко- и среднесуглинистый. Необходимо подчеркнуть, что все изучаемые почвы и минеральные (разр. 1–3, 6 и 8), и органогенные (разр. 4, 5) отличаются сильнокислой и кислой реакцией среды, а также низким содержанием обменных оснований в составе их почвенно-поглощающего комплекса. Особенно примечателен в этом отношении верховой торфяник разр. 5, где значения  $pH_{H_2O}$  опускаются до 2.4–2.6. Данный торфяник также отличается низкой зольностью, составляющей 2.4–20.5% и в основном менее 15%. В торфяных горизонтах торфяно-болотной почвы разр. 4 по сравнению с торфяником зольность значительно возрастает, достигая значений 41.8–66.2%. Также в данной почве отмечаются наиболее высокие значения суммы обменных оснований  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , максимально составляющие 30.0–30.7 смоль(экв)/кг почвы (табл. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Радиогеохимические особенности изученной территории четко отражаются на картах МЭД и содержания ЕРН (рис. 3). Площади распространения метаморфических пород (кристаллические сланцы, гнейсы) на картах концентраций  $^{238}U$  и

Таблица 2. Физико-химические свойства почв

Горизонт	Глубина, см	рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	C <sub>орг</sub> , %	Обменные катионы, смоль(экв)/кг почвы				Фракции, %; размер, мм	
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	сумма	<0.001	<0.01
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 1									
Av	0–9	4.6	27.8*	9.4	2.7	5.1	17.2	6.6	10.6
AB	9–19	4.4	10.1	7.8	1.7	2.1	11.6	5.4	7.7
B	19–28	5.3	8.9	5.8	1.9	1.3	9.0	4.4	8.5
B	28–40	4.9	8.2	5.6	2.4	2.1	10.1	4.3	8.2
[AB]	40–60	4.6	21.9	3.5	1.6	3.6	8.7	5.2	11.6
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 2									
Av	0–5	4.5	28.8*	21.3	3.7	–	25.0	5.5	12.3
AB	5–10	3.8	6.2	4.5	1.4	–	5.9	7.3	15.7
AB	10–15	3.5	12.1	5.9	1.2	–	7.1	8.0	15.9
AB	15–20	3.9	13.2	6.1	1.5	–	7.6	9.5	19.7
B	20–25	4.0	6.8	4.7	1.1	–	5.8	7.5	15.4
B	25–35	4.2	6.4	5.2	2.1	–	7.3	7.3	15.9
BC	35–56	4.3	3.6	6.1	1.9	–	8.0	7.0	16.1
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 3									
Av	0–7	4.1	18.7	7.4	2.5	4.3	14.2	6.0	13.2
A	7–14	3.7	14.3	5.3	1.5	3.1	9.9	4.7	8.4
B	14–28	4.0	9.2	5.0	2.1	1.4	8.5	3.5	6.3
B	28–40	3.8	5.2	5.5	1.8	3.9	11.2	7.3	14.0
C	40–60	4.2	1.9	1.5	0.7	1.7	3.9	5.1	8.7
Торфяно-болотная почва, разрез 4									
O	0–5	4.5	89.1*	–	–	–	–	–	–
O1	5–10	3.8	58.2*	24.8	5.2	–	30.0	–	–
O1	10–15	3.5	58.2*	25.1	5.6	–	30.7	–	–
O1	15–20	3.9	50.9*	20.0	4.8	–	24.8	–	–
O2	20–25	4.0	23.6*	8.3	1.7	–	10.0	–	–
O2	25–35	4.2	33.8*	9.4	2.6	–	12.0	–	–
BCg	35–58	4.3	2.7	3.9	1.9	–	5.8	11.9	24.3
Торфяник верховой, разрез 5									
O	0–5	2.8	89.7*	–	–	–	–	–	–
O1	5–10	2.5	85.3*	7.5	1.9	–	9.4	–	–
O1	10–15	2.4	88.7*	5.8	2.3	–	8.1	–	–
O1	15–20	2.4	88.9*	6.3	3.8	–	10.1	–	–
O2	20–40	2.6	93.4*	6.7	2.2	–	8.9	–	–
O2	40–55	3.1	97.6*	16.6	2.1	–	18.7	–	–
O2	55–65	3.3	79.5*	15.9	3.0	–	18.9	–	–
Подбур типичный, разрез 6									
O	0–4	3.4	92.7	12.7	3.2	–	15.9	–	–
A1	4–7	3.4	18.9	6.8	2.0	–	8.8	11.9	22.0
B	7–11	3.4	5.8	2.7	1.2	–	3.9	16.0	31.3
BC	11–28	3.8	1.5	1.7	1.3	–	3.0	13.9	32.8
Подбур оподзоленный, разрез 8									
O	0–3	2.6	85.2*	25.0	7.9	24.7	57.6	–	–
A0A2	3–12	2.3	57.0*	17.4	4.7	45.9	68.0	5.2	12.2
B	12–17	2.9	9.2	6.3	1.6	13.5	21.4	18.3	31.2
BC	17–34	3.3	13.5	7.8	2.3	13.7	22.8	17.3	32.0

\* Приведено значение потери при прокаливании, прочерк – не определено.

$^{232}\text{Th}$  отмечаются относительно невысокими их значениями и соответственно пониженными величинами МЭД ( $<0.10\text{--}0.20$  мкЗв/ч). На карте МЭД аномальные участки, разобщенные изолиниями  $0.20\text{--}0.60$  мкЗв/ч и приуроченные к руслу р. Васильевка и руч. Озерный, представляют слабозадернованную наиболее обнаженную часть монацитовой россыпи. На этих участках форма изолиний МЭД хорошо совпадает с формой изолиний  $^{232}\text{Th}$ , что указывает на ториевую природу аномалий. В районе исследования гранитоиды являются основными источниками монацитовой россыпи и незначительно охвачены радиометрической съемкой только на юго-западной части площади обследования. Данные породы на карте  $\gamma$ -поля выделяются изолиниями более  $0.20\text{--}0.40$  мкЗв/ч. При этом на картах в местах распространения гранитоидов, конфигурация изолиний МЭД очень сопоставима с таковой, характерной для  $^{232}\text{Th}$ . Техногенная радиоактивная аномалия, обнаруженная в районе расположения обогатительной фабрики, по площади немного расширена из-за прямоугольной сети наблюдения. Здесь на поверхности почвогрунтов зафиксирован самый высокий показатель МЭД  $\gamma$ -излучения —  $16.0$  мкЗв/ч, превышающий региональный фон ( $0.23$  мкЗв/ч) в  $69$  раз, который тесно связан с загрязнением промплощадки фабрики шлихами, обогащенные торием. В структуре  $\gamma$ -поля исследованной площади локальные радиоактивные аномалии не находят отображения, а на карте нанесены в виде отдельных точек. Данные радиоактивные аномалии обнаружены в ходе проведения маршрутных радиометрических измерений на промплощадках шахт и в долино-пойменной части водотоков. Более интенсивные аномалии техногенного происхождения с МЭД  $1.7$ ,  $5.8$ ,  $7.2$  и  $7.4$  мкЗв/ч зафиксированы возле шахт, в пределах небольших участков с площадью около  $160\text{--}1100$  м<sup>2</sup>. Здесь загрязнения почвогрунтов торием, а также частично и ураном, связаны с первичным обогащением песков. В поймах и на надпойменных террасах р. Васильевка и руч. Озерный участки с МЭД  $1.3$ ,  $2.1$  и  $4.2$  мкЗв/ч, представляющие аномалии естественного происхождения, приурочены к местам концентрирования монацита в аллювиях [28].

Известно, что среди множества ЕРН, входящих в состав горных пород и почв, по вкладу внешнего фонового облучения доминируют три группы  $\gamma$ -излучателей:  $^{40}\text{K}$ , члены уранового и ториевого рядов. В условиях радиоактивного равновесия всех дочерних продуктов в этих рядах их вклады составляют  $35$ ,  $25$  и  $40\%$  от общего излучения соответственно [26]. Однако это соотношение может существенно изменяться в зависимости от конкретной почвенно-геохимической обстановки территории. Расчеты, выполненные с

использованием дозовых эквивалентов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , приведенные в работе [35], и концентраций данных элементов в почвах показывают, что на изученной площади величину МЭД в основном формируют  $\gamma$ -излучения тория, в среднем —  $72\%$ . На долю  $\gamma$ -излучений калия и урана приходится  $20$  и  $8\%$  соответственно от величины общей мощности дозы излучения. При этом величины коэффициентов корреляции между концентрациями  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  в почвах и МЭД  $\gamma$ -излучения составляют  $0.96$ ,  $0.63$ ,  $0.26$  соответственно при уровне значимости  $0.01$  ( $n = 156$ ). На обследованной площади между ЕРН получены следующие значения коэффициентов корреляции ( $r$ ): Th : K  $0.51$ , U : K  $0.28$  и Th : U  $0.17$ . Все эти коэффициенты статистически достоверны при уровне значимости  $0.05$  и  $0.01$  ( $n = 156$ ). Сложившаяся на исследованной территории радиогеохимическая обстановка хорошо отображается на картах радиометрической съемки. Форма изолиний МЭД  $\gamma$ -излучения на карте  $\gamma$ -поля очень близка к форме изолиний концентраций тория. В то же время конфигурация изолиний концентраций калия и урана на картах, менее схожа с таковой МЭД.

В техногенных аномалиях, приуроченных к территориям промплощадок шахт и фабрики, концентрация тория в почвогрунтах составляет  $604\text{--}6300$  мг/кг. Такое содержание тория в почвогрунтах при пересчете в единицах активности соответствуют  $2334\text{--}25389$  Бк/кг, что существенно больше, чем его минимально значимая активность ( $1000$  Бк/кг). На этом основании данные загрязненные почвогрунты по активности тория относятся к радиоактивным отходам. Согласно ОСПОРБ 99/2010 [20], к радиоактивным 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 превышает  $1$ . Как известно для природного тория ( $^{232}\text{Th}$ ) в условиях радиоактивного равновесия со всеми продуктами распада его минимально значимой удельной активности равна  $1000$  Бк/кг, то есть  $248$  мг/кг или  $248$  г/т [19].

На площади радиометрической съемки по данным  $\gamma$ -спектрометрических измерений и с привязкой к ранее составленной почвенной карте представлены значения МЭД и концентрации ЕРН для разных типов почв.

На площади съемки по данным радиометрических измерений и с привязкой к ранее составленной почвенной карте представлены значения МЭД и концентрации ЕРН для разных типов почв. При мощности дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности почв  $0.04\text{--}0.60$  мкЗв/ч, содержание  $^{40}\text{K}$  в них изменяется от  $0.2$  до  $5.8$ ,  $^{238}\text{U}$  от  $0.4$  до  $6.1$ , а  $^{232}\text{Th}$  от  $0.6$  до  $208$  мг/кг. В целом в изученных

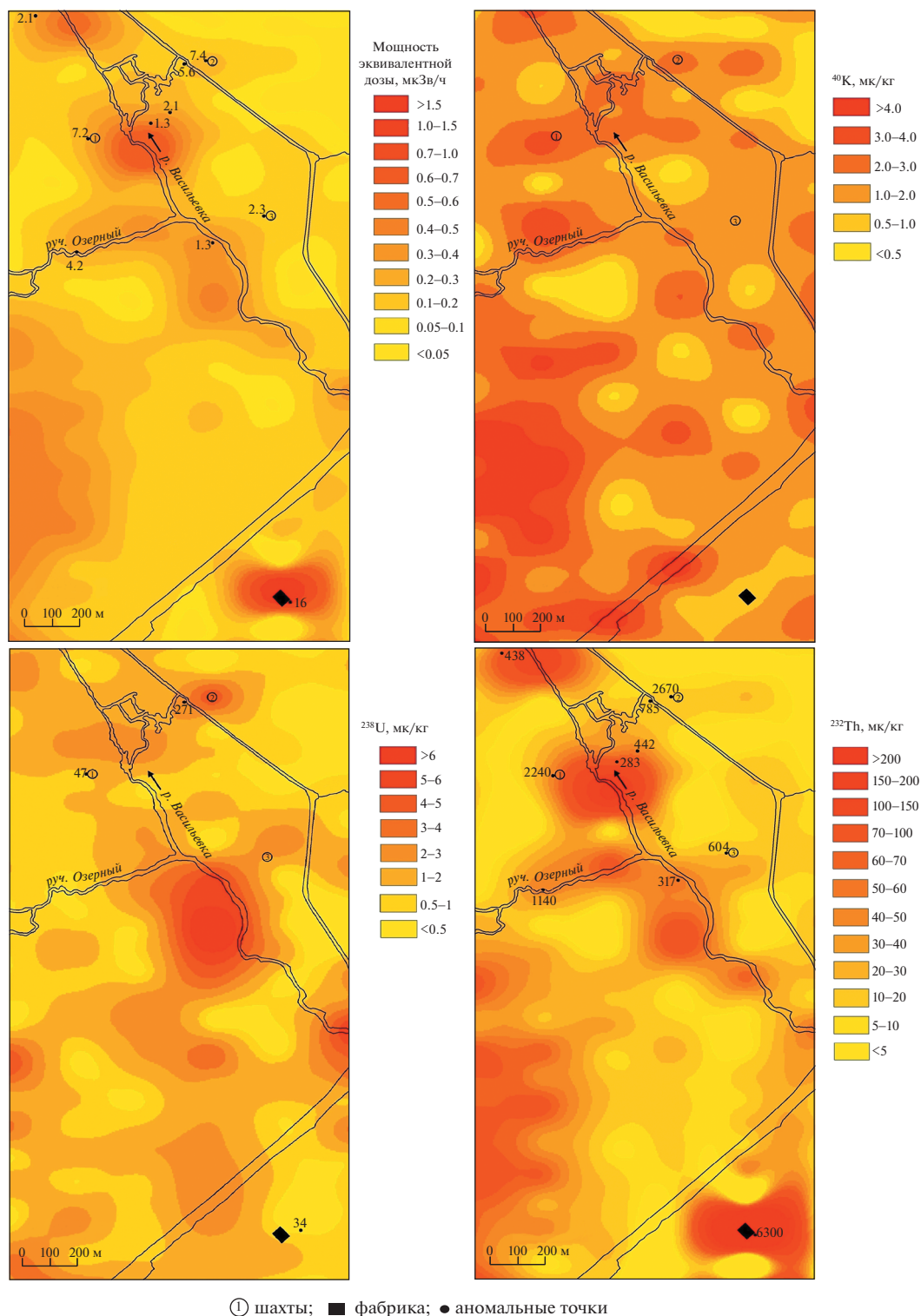


Рис. 3. Карта  $\gamma$ -поля и содержаний ЕРН в районе разработки монацитовей россыпи.

почвах концентрации ЕРН варьируют в пределах одного—двух порядков величин. Такой широкий диапазон изменения содержаний ЕРН в почвах связан в основном с радиогеохимическими особенностями состава почвообразующих пород и с

генезисом почв и ландшафтно-геокриологическими условиями территории. Поэтому не случайно органогенным почвам, развивающимся на заболоченных участках (торфяно-болотная) и на буграх мерзлотного пучения (торфяник верхо-



**Таблица 3.** Содержание ЕРН в почвах (0–50 см), над чертой – среднее и его ошибка, под чертой – пределы колебания содержаний

Почвы	n*	Мощность дозы, мкЗв/ч	<sup>40</sup> К	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	A <sub>эф</sub> , Бк/кг
			мг/кг			
Подбуры маломощные с курумами	19	0.47 ± 0.12 0.18–0.60	3.6 ± 1.2	1.6 ± 1.2	64 ± 18	435 ± 116
			1.3–5.8	0.5–3.9	27–95	205–606
Подбуры	54	0.18 ± 0.8 0.10–0.46	2.0 ± 1.0	1.4 ± 0.8	19 ± 13	160 ± 73
			0.6–4.4	0.5–3.7	5–72	67–448
Торфяники верховые	7	0.11 ± 0.3 0.07–0.16	0.6 ± 0.5	0.8 ± 0.3	6 ± 5	56 ± 37
			0.1–1.6	0.4–1.3	2–16	20–125
Торфянисто- и торфяно-болотные	7	0.11 ± 0.03 0.06–0.12	1.2 ± 0.7	1.1 ± 0.7	8 ± 6	82 ± 46
			0.2–2.2	0.6–2.3	1–19	26–151
Торфянисто-болотные и подбуры сухоторфянистые	37	0.10 ± 0.05 0.04–0.24	1.1 ± 0.9	0.8 ± 0.5	8 ± 9	78 ± 65
			0.1–2.8	0.4–3.1	0.6–39	13–195
Аллювиальные темногумусовые и торфянисто-болотные	16	0.37 ± 0.17 0.15–0.80	1.9 ± 0.9	4.0 ± 2.2	50 ± 35	353 ± 210
			0.5–3.4	0.6–6.1	6–138	86–797
Аллювиальные слоистые с песками, галечниками и валунниками	8	0.48 ± 0.21 0.25–0.90	2.3 ± 0.7	2.3 ± 2.1	83 ± 58	516 ± 280
			0.9–3.2	0.5–5.8	32–206	254–1106

\* n – число измерений.

вой), свойственна наименьшая радиоактивность, а для минеральных каменистых почв (аллювиальные, подбуры) поймы, надпойменной террасы и водораздела – наибольшая. Нужно подчеркнуть, что при избыточной влажности почв вода выступает как неактивный наполнитель почвенной среды, что в результате приводит к уменьшению величины МЭД их поверхности. На исследованной части территории монацитовой россыпи Васильевка среднее содержание <sup>40</sup>К в почвах составляет 1.9, <sup>238</sup>U – 1.6, а <sup>232</sup>Th – 28.0 мг/кг. Отметим, что по данным в 2013 г. в мерзлотных почвах Якутии, формирующихся на суглинистых и песчаных отложениях разного происхождения, нормальные природные концентрации <sup>40</sup>К в среднем составляли 1.8, <sup>238</sup>U – 1.7 и <sup>232</sup>Th – 7.0 мг/кг [27]. Из этих данных следует, что в почвах на обследованном участке россыпи среднее содержание калия и урана сопоставимо с их фоновыми содержаниями в почвах Якутии. В то же время средняя концентрация тория в почвах в 4 раза превышает его средний нормальный фоновый уровень, что однозначно подтверждает ториевую почвенно-геохимическую специализацию исследуемой территории.

Величину эффективной удельной активности радионуклидов (A<sub>эф</sub>) находили расчетным путем по формуле [19]:

$$A_{эф} = A_{Ra} + 1.3A_{Th} + 0.09A_K,$$

где A<sub>Ra</sub> и A<sub>Th</sub> – удельные активности <sup>226</sup>Ra и <sup>232</sup>Th, находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, A<sub>K</sub> – удельная активность <sup>40</sup>К (Бк/кг). В изученных почвах величина A<sub>эф</sub> варьирует в пределах 20–1106 Бк/кг (табл. 3). Наибольшее значения A<sub>эф</sub> характерны для минеральных почв. На обследованной территории органогенные почвы и некоторая часть слаборадиоактивных минеральных почв попадают в первую категорию (<370 Бк/кг) строительных материалов, для которых нет ограничений при использовании в строительных работах. В большинстве минеральных почв по величине A<sub>эф</sub> попадают во второй и третий классы строительных материалов (371–1500 Бк/кг), которые можно использовать в строительном производстве. В аномальных точках, приуроченных к поймам р. Васильевка и руч. Озерный, величина A<sub>эф</sub> в аллювиальных песках составляет 1660–5972 Бк/кг. Как известно материалы с эффективной удельной активностью выше 4000 Бк/кг не должны использоваться в строительстве. Для сравнения отметим, что в аллювиальных песках аномально высокие концентрации тория в единицах активности составляют 1277–4594 Бк/кг и в среднем на два порядка превышают его средние показатели в донных отложениях рек (6.9–409.0 Бк/кг) в некоторых странах мира (Испания, Португалия, Малайзия и др.) [30]. Это указывает на высокую потенциальную радиационную опасность обогащенных торием аллювиальных песков для населения в случае использования их в строительстве. В работе [29] показано,

что в районе расположения данной россыпи концентрации ЕРН, особенно тория в рыхлых горных породах (пески, валуны и др.) и почвах, варьируют в широком диапазоне. Отметим, что на Алданском нагорье, кроме монацитов россыпи Васильевка, известны и другие месторождения (Керакское, Николкинское, Михайловское, Малолеглиерское, Малонимнырское и др.) [6, 21]. Все они расположены по долинам водотоков (реки, ручьи) вблизи массивов гранитоидных пород кристаллического фундамента Сибирской платформы и в радиоэкологическом плане не исследованы. Из-за отсутствия данных о радиоактивности монацитовых месторождений Алданского нагорья, высокорadioактивные аллювиальные пески россыпей при их бесконтрольном использовании могут применяться при проведении строительных работ в населенных пунктах. Так случилось в г. Алдане в Алданском районе Республики Саха (Якутия), когда песок, добытый из местного карьера, был использован при внутреннем оштукатуривании жилых домов, что привело к увеличению радиационного фона помещений, и соответственно способствовало дополнительному облучению людей [25].

Характер вертикального распределения ЕРН по профилю почв сложный. В аллювиальных почвах высокой поймы реки на фоне равномерного распределения ЕРН по глубине, хорошо проявляется техногенная гидрогенная аккумуляция тория, частично и урана в верхних горизонтах почв (табл. 4, разр. 2 и 3). В начале разработки месторождения, после перекрытия русел реки и ручья, вода была спущена по искусственно созданным водоотводным каналам. После такого технического мероприятия на надпойменной террасе бульдозерами велись вскрышные работы по снятию верхнего почвенно-растительного слоя вместе с материнскими породами и складированием их в отвалы вдоль береговой зоны. После остановки добычи монацита из россыпи в результате естественного восстановления русел водотоков начался смыв мелкозема отвалов с весенними и летне-осенними паводковыми водами. В настоящее время в береговой зоне отвалы в большинстве сохранились, но некоторую часть из них почти полностью смыло. В породах отвалов содержание  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  изменяется в широком диапазоне 42–189 и 0.5–30 мг/кг соответственно. При этом обнаруженные уровни концентрации радионуклидов в отвалах, превышают средние местные фоновые значения в почвах в 18 раз. Отложения на поверхности почв песчано-илистого материала с повышенной концентрацией тория и урана происходило во время затопления высокой поймы паводковыми водами. Это привело к увеличению средних концентраций  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  в почвах. В аллювиальных почвах (разр. 2 и 3), приуроченных к полигону открытой разработки, среднее содержание  $^{232}\text{Th}$  и

$^{238}\text{U}$  в 1.5–2.7 раза больше, чем в аллювиальной почве разр. 1 высокой поймы, расположенной выше от места разработки месторождения. В торфяно-болотной почве, сформировавшейся на песчано-щебнистых склоновых отложениях продуктов выветривания горных пород, на фоне неравномерного вертикального распределения ЕРН по профилю отмечается тенденция увеличения их концентрации с глубиной. При этом обнаруженное в почвообразующей породе наибольшее содержание ЕРН на глубине 35–58 см по уровню близко к таковому гранитоидных пород, залегающих в верхней части водораздела. Данная торфяно-болотная почва находится у подножья водораздельного склона и периодически затопляется склоновыми водами после длительных дождей и во время весеннего снеготаяния. Особенности вертикального распределения ЕРН в профиле торфяно-болотной почвы можно объяснить следующими обстоятельствами: во-первых, при фильтрации склоновых вод через почву их механические примеси, содержащие ЕРН задерживаются торфяным горизонтом; во-вторых, в процессе эволюции почвы из-за слабого накопления растениями торфообразователями (осоки, злаки и пушицы) ЕРН, верхняя часть почвы разбавляется слаборadioактивными органическими веществами. В торфянике, формирующемся на вершине бугра мерзлотного пучения, в верхних горизонтах ЕРН не обнаружены, то есть их концентрации оказались меньше существующего предела обнаружения лабораторного  $\gamma$ -спектрометрического метода (разр. 5). Относительно невысокие по уровню содержания ЕРН зафиксированы в торфяных горизонтах в интервале глубин 20–65 см. Изученный торфяной бугор пучения высотой примерно 3 м и диаметром у основания 50–60 м расположен на водораздельном склоне. Здесь на вершине бугра торфяник имеет исключительно атмосферный тип водного питания, а поступления ЕРН с поверхностным стоком не происходит. На территории Южной Якутии торфяные бугры проходят длительный эволюционный путь: активный рост, устойчивое функционирование и деградацию. Возраст таких бугров мерзлотного пучения по данным радиоуглеродного метода может составлять 2170–10 750 лет [3]. В процессе развития верхового торфяника подстилаемая каменная почвообразующая порода со временем оказывается глубоко от поверхности в связи с нарастанием над ней мощного торфяного горизонта. При этом некоторая часть торфа и почвообразующей породы переходит в многолетнемерзлое состояние. Видимо, это происходило когда-то с изученным верховым торфяником, который в настоящее время в торфяном горизонте на глубине 65 см содержит многолетнюю мерзлоту. Из-за такой криогенной обстановки на бугре мерзлотного пучения полнопрофильный разрез заложить не удалось. По данным буровых работ геокриологов из-

Таблица 4. Содержание и распределение ЕРН в почвах

Горизонт	Глубина, см	<sup>40</sup> K	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th
		мг/кг		
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 1				
Av	0–9	4.0	3.1	37.2
AB	9–19	4.0	2.6	27.6
B	19–28	4.1	3.0	27.6
B	28–40	3.9	2.4	30.1
[AB]	40–60	4.2	2.7	30.3
Среднее*		4.0 ± 0.1	2.8 ± 0.3	30.6 ± 3.9
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 2				
Av	0–5	2.9	2.9	52.4
AB	5–10	3.3	4.8	103.7
AB	10–15	3.1	4.1	60.6
B	15–20	3.2	3.8	69.0
B	20–25	3.4	4.3	67.0
B	25–35	3.0	3.8	62.7
BC	35–56	3.5	4.4	83.4
Среднее		3.2 ± 0.2	4.0 ± 0.6	71.3 ± 17.1
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 3				
Av	0–7	3.3	8.1	168.7
A	7–14	3.6	4.0	81.6
B	14–28	4.0	3.2	55.3
B	28–40	4.0	2.8	50.9
C	40–60	4.4	2.5	55.1
Среднее		3.9 ± 0.4	4.1 ± 2.3	82.3 ± 49.2
Торфяно-болотная почва, разрез 4				
O	0–5	0.6	Не опр.	2.2
O1	5–10	1.3	3.3	10.0
O1	10–15	1.1	3.7	12.2
O1	15–20	2.0	2.8	14.8
O2	20–25	3.4	2.7	14.4
O2	25–35	2.3	4.0	17.5
BCg	35–58	3.8	5.3	94.5
Среднее		2.1 ± 1.2	3.6 ± 0.9	23.7 ± 31.6
Торфяник верховой, разрез 5				
O	0–5		Не опр.	
O1	5–10		»	
O1	10–15		»	
O1	15–20		»	
O2	20–40	0.5	0.5	1.5
O2	40–55	0.5	1.0	1.6
O2	55–65	0.6	0.5	1.6
Среднее		0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.3	1.6 ± 0.1
Подбур типичный, разрез 6				
O	0–4	1.0	Не опр.	2.3
A1	4–7	2.0	1.2	17.7
B	7–11	2.9	2.0	23.7
BC	11–28	3.0	2.5	27.8
Среднее		2.2 ± 0.9	1.9 ± 1.1	17.9 ± 11.2

\* Среднее содержание в почве.

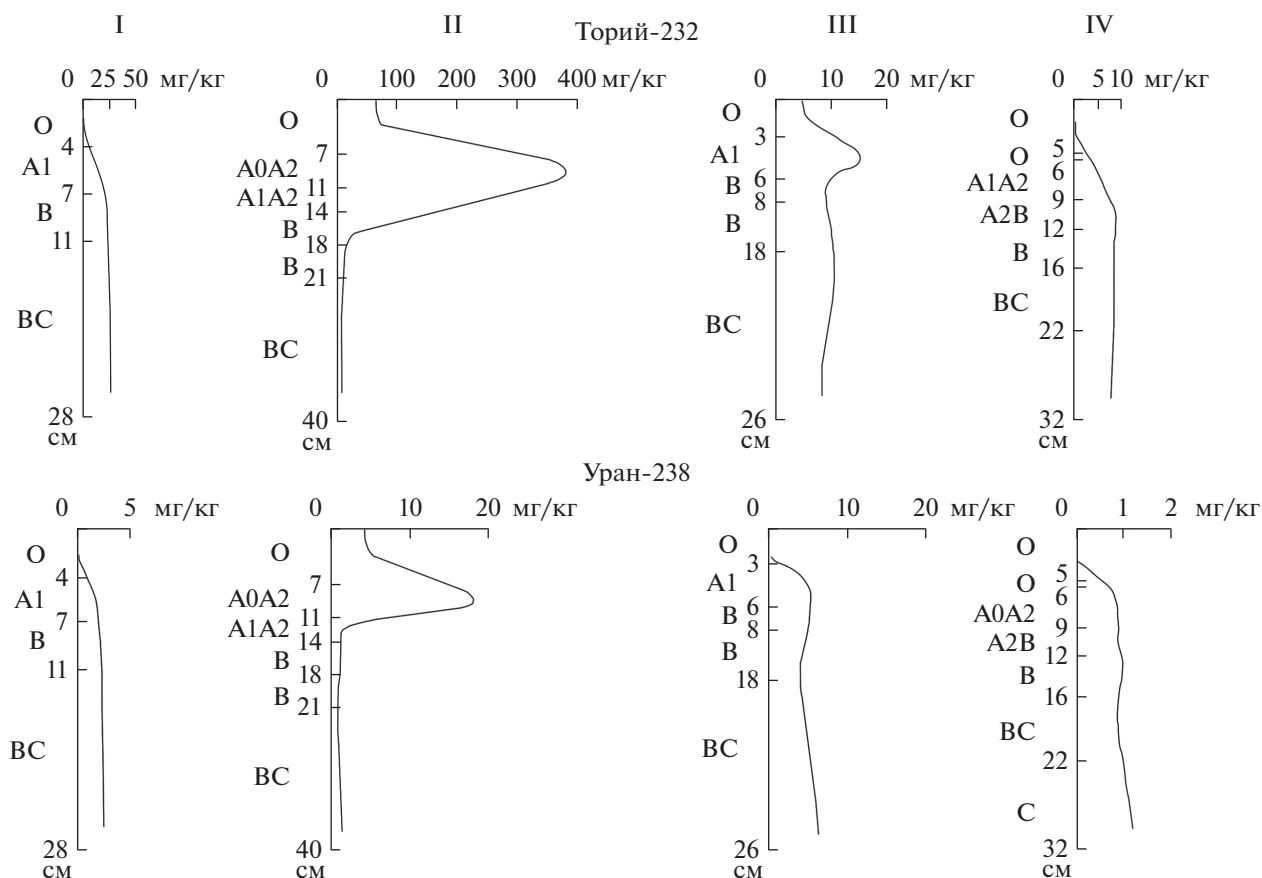


Рис. 4. Вертикальное распределение  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  в почвенном профиле подбуров: с наветренной стороны от отвала — 1130 м (I — разрез 6); с подветренной стороны от отвала — 25 м (II — разрез 7), 80 м (III — разрез 8) и 365 м (IV — разрез 9).

вестно, что мощность торфа на буграх мерзлотного пучения в Южной Якутии может достигать до 1–3 м [3]. Бугры пучения, расположенные на одной той же территории, могут находиться на разной стадии развития и соответственно могут иметь различную мощность торфа. На наиболее зрелых и недеградированных буграх пучения наличие слаборадиоактивного мощного торфяного горизонта над почвообразующей породой приводит к уменьшению радиационного фона на их поверхности. Так, в верховом торфянике величина мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности составляла всего 0.07 мкЗв/ч. В то же время в торфяных буграх пучения с близким залеганием к поверхности каменистых почвообразующих пород мощность дозы достигала 0.14 мкЗв/ч.

В профиле подбура типичного, сформированного на водораздельном склоне, содержание  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  с глубиной постепенно увеличивается. При этом наблюдается резкое уменьшение концентраций ЕРН в подстилке, состоящей преимущественно из лишайников, указывающее на слабое биогенное накопление. Здесь важную роль в распределении ЕРН по профилю почвы, видимо,

играют гетерогенный состав почвообразующих пород и промывной водный режим, способствующий выщелачиванию из верхних горизонтов в нижние мелкодисперсные частицы, содержащих радионуклиды.

В зоне аэротехногенного загрязнения повышенная концентрация  $^{232}\text{Th}$  в почвенном профиле подбура обнаруживается в верхнем гумусово-аккумулятивном и органо-минеральном горизонтах почвы (рис. 4, разр. 7, 8, 9) на расстоянии 365 м от отвала радиоактивных песков по розе ветров. При увеличении расстояния от источника загрязнения в верхнем слое 0–18 см почв содержание тория уменьшается по сравнению с фоновым значением в 1.2–24 раза. Отвал песков возле обогатительной фабрики появился в 1949–1952 гг. во время разработки месторождения, после их первичного обогащения на промплощадках шахт. В настоящее время незаросшая часть отвала по длине составляет около 70 м и ширине 10–20 м. В отвале содержание урана изменяется в пределах 2.3–34.0, а тория 228–1200 мг/кг. При этом концентрация тория в песках в среднем в 61 раз больше, чем урана, поэтому в составе аэротехногенных

выпадениям вокруг отвала явно преобладает торий. Вследствие этого аэральное загрязнение почв ураном по направлению ветра от источника фиксируется только на расстоянии в пределах 100 м.

Проведен корреляционный анализ для оценки связи между почвенными параметрами ( $pH_{H_2O}$ ,  $C_{орг}$ , сумма поглощенных оснований, содержание физической глины и ила) и содержанием  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  и  $^{232}Th$  в почвах, корреляционные связи оказались неустойчивыми. Вероятно, на взаимные корреляции  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  и  $^{232}Th$  в изученных типах почв кроме состава почвообразующих пород существенно влияют химические свойства элементов, почвообразовательные процессы, водородное и аэротехногенное воздействия. Так, на водораздельном склоне на наветренной стороне от отвала радиоактивных песков в подбуре типичном (разр. 6) существует тесная связь между концентрацией  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  и  $^{232}Th$ . В этом же типе почвы (разр. 8), находящейся на подветренной стороне от отвала, взаимная связь проявляется только между  $^{40}K$  и  $^{238}U$ . В аллювиальных почвах (разр. 2 и 3), приуроченных к территории полигона открытой разработки месторождения, корреляционные связи между  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  и  $^{232}Th$  обнаруживаются, а вне зоны полигона не выявляются (разр. 1). Прямая статистически достоверная зависимость между концентрацией ЕРН и некоторыми почвенными параметрами (сумма поглощенных оснований, содержание физической глины) выявлена только в профиле торфяно-болотной почвы (разр. 4) и подбура типичного (разр. 6). В других случаях обнаруженные корреляционные зависимости оказались статистически не достоверными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В районе расположения монацитовая россыпи Васильевка на территории Южной Якутии естественный радиационный фон на поверхности почв изменяется в широком диапазоне от 0.04 до 0.50 мкЗв/ч и более. На обследованной территории из-за слабой развитости почв и их значительной каменистости основную величину МЭД  $\gamma$ -излучения на поверхности создают камни (глыбы, щебень и др.) с песчано-суглинистым заполнителем. Поэтому радиоактивность почв четко зависит от особенностей геологического строения территории, которая хорошо отображается на картах мощности дозы и концентраций ЕРН. Наибольшая радиоактивность свойственна минеральным почвам (аллювиальным, подбурам), сформировавшимся в рыхлых продуктах выветривания гранитизированных пород водораздела и монацитоносных аллювиальных отложениях долины р. Васильевка. При этом повышенную радиоактивность почв, как правило, создает торий. Поэтому конфигурация изолиний МЭД  $\gamma$ -излучений

на радиометрической карте максимально схожа с изолиниями концентраций тория. Для водораздельных участков, сложенных кристаллическими сланцами и гнейсами, характерна относительно низкая радиоактивность почв (торфяно-болотная, торфяник верховой). Наличие на таких участках островной многолетней мерзлоты способствует заболачиванию местности и накоплению верхового торфа на буграх мерзлотного пучения. Все это приводит к снижению величины МЭД  $\gamma$ -излучения на поверхности почв. В изученных почвах на территории монацитовая россыпи средние концентрации  $^{40}K$  и  $^{238}U$  соответствуют их фоновым значениям, характерным для почв Якутии, а среднее содержание  $^{232}Th$  превышает его фоновый уровень в 4 раза. На содержание и распределение ЕРН в почвах существенно влияют неоднородности состава почвообразующих пород, унаследованные от исходных коренных материнских горных пород, почвообразовательные процессы, аэротехногенное и водородное воздействия. Радионуклиды  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  и  $^{232}Th$  в зависимости от совместного влияния этих факторов в почвах распределяются по аккумулятивно-элювиальному, аккумулятивно-элювиально-иллювиальному, элювиально-иллювиальному, равномерному и неравномерному типам. По величине  $A_{эф}$  изученные почвы района можно отнести к первому, второму и третьему классам строительных материалов. Высокие значения  $A_{эф}$  в песчаных аллювиальных отложениях р. Васильевка и руч. Озерный ограничивают их применение в строительных работах. На отдельных участках промплощадок шахт и фабрики в почвогрунтах и монацитоносном песчаном отвале величины удельной активности  $^{232}Th$  соответствуют радиоактивным отходам. При этом максимальное значение МЭД  $\gamma$ -излучения на поверхности почвогрунтов 16.0 мкЗв/ч, превышающее в 69 раз фоновый уровень, отмечается там, где были рассыпаны высокордиоактивные шлихи. В целом полевая радиометрическая съемка дает вполне адекватное представление о площадном распределении общей радиоактивности и содержания ЕРН в почвенном покрове монацитовая россыпи, который вскрывает связи между радиоактивностью почв и радиогеохимическими и ландшафтно-геокриологическими особенностями территории.

## 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.

### 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. *Асварова Т.А., Абдулаева А.С., Магомедов М.А.* Естественные радионуклиды в породах и почвах высокогорных районов Большого Кавказа // Почвоведение. 2012. № 6. С. 695–707.
3. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Ошикава К., Чижова Ю.Н., Станюковская Ю.В.* Миграционные бугры пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири // Инженерная геология. 2013. № 3. С. 14–34.
4. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 272 с.
5. *Высокоостровская Е.Б., Данилов В.С., Краснов А.И., Смыслов А.А.* Использование аэрогамма-спектрометрических данных в радиационной экологии // Российский геофизический журн. 1997. № 7–8. С. 5–17.
6. *Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кириллов В.Е.* Металлогения урана Дальнего Востока России. М.: Наука, 2006. 272 с.
7. *Егорова И.А., Кислицина Ю.В., Пузанов А.В.* Радионуклиды в почвах Северо-Западного Алтая // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 31–35.
8. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
9. *Еловская Л.Г.* Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 172 с.
10. Инструкция по работе со сцинтилляционными радиометрами при геологических съемках и поисках / Отв. ред. А.Г. Ветров. Л.: Рудгеофизика, 1986. 44 с.
11. *Кайзер М.И., Ларина Г.В., Кузнецова О.В.* Металлы и радионуклиды в почвах и торфах Алтайской горной области. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2016. 140 с.
12. *Качинский Н.А.* Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
13. *Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Основы  $\gamma$ -спектрометрии природных сред. М.: Атомиздат, 1969. 468 с.
14. *Крячюнас В.В., Шахова Е.В.* Основные закономерности миграции  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в почвах города Архангельска // Экология человека. 2013. № 8. С. 23–27.
15. *Ложников Б.Н.* Обследование урансодержащих отвалов горных пород на территории Якутии. Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия). Якутск: ЯФ ГУ “Изд-во СО РАН”, 2004. С. 284–292.
16. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного  $\gamma$ -спектрометра с программным обеспечением “Прогресс”. Центр метрологии, 2003. 16 с.
17. Методика выполнения измерений эффективной удельной активности природных радионуклидов и поверхностной активности цезия-137 с применением спектрометра МКС-АТ6101Д. СПб., 2007. 13 с.
18. *Мякина Н.Б., Аринушкина Е.В.* Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 63 с.
19. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Центр нормативно-технической информации “Медиа Сервис”, 2019. 118 с.
20. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). М.: Центр нормативно-технической информации “Медиа Сервис”, 2019. 84 с.
21. *Пятов Е.А.* Стране был нужен уран. История геологоразведочных работ на уран в СССР. М.: ВИМС, 2005. 246 с.
22. *Рачкова Н.Г., Шуктумова И.И., Таскаев А.И.* Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 698–705.
23. *Роде А.А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 92 с.
24. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.
25. *Семенова Г.Е., Лопухова Т.П.* Краткий анализ радиационно-лабораторного контроля за период 1970–1992 гг. и проблемы радиационной безопасности населения Якутии на настоящий период // Радиационное загрязнение территории Республики Саха (Якутия). Проблемы радиационной безопасности: Сб. докл. I респ. науч.-практ. конф. Якутск, 1993. С. 110–119.
26. *Сивинцев Ю.В.* Естественный радиационный фон // Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып. 1. С. 46–56.
27. *Собакин П.И., Перк А.А.* Радиоактивные элементы в почвах Якутии // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2013. № 5. С. 77–86.
28. *Собакин П.И., Чевычелов А.П., Герасимов Я.Р.* Миграция естественных радионуклидов в поверхностных водах горно-таежных ландшафтов Эльконского урановорудного района (Южная Якутия) // Геохимия. 2015. № 11. С. 1032–1042.
29. *Собакин П.И., Герасимов Я.Р., Перк А.А.* Радиоэкологическая обстановка в районе монацитового россыпи в Южной Якутии // Геохимия. 2019. Т. 64. № 4. С. 440–448.
30. *Титаева Н.А., Таскаев А.И.* Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1983. 232 с.
31. *Титаева Н.А.* Геохимия природных радиоактивных рядов распада. М.: ГЕОС, 2005. 226 с.
32. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК “Интерпериодика”, 2001. 571 с.

33. Фесенко С.В., Емлютина Е.С. Концентрация тория в природных средах: обзор мировых данных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 6. С. 635–648.
34. Чевычелов А.А., Собакин П.И. Содержание и распределение естественных радионуклидов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в мерзлотных почвах Центральной Якутии // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология. 2020. Т. 13(1). С. 109–123.
35. 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. N.Y., 1977. 114 p.

## Radiogeochemistry of Soils and Sands of the Monazite Placer in South Yakutia

P. I. Sobakin<sup>1, \*</sup>, A. P. Chevychelov<sup>1</sup>, and A. N. Gorokhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, 677980 Russia

\*e-mail: radioecolog@yandex.ru

The results of a field radiometric survey conducted on the territory of monazite mining from the Vasilyevka placer in the southern part of Yakutia are presented. It is shown that the natural background radioactivity of the soils of the surveyed territory mainly depends on its features of the geological structure and, to some extent, on the landscape-geocryological conditions. In the studied area of the field, the value of the exposure dose of gamma radiation on the soil surface, depending on changes in their concentrations of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ , varies in a wide range from 0.04 to 0.50  $\mu\text{Sv/h}$  or more. Radiogeochemical features of the soils of the studied area are well displayed on radiometric maps, presented in the form of dose rate isolines and radionuclide contents. The minimum concentrations of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  were observed in peat-bog soil and verkhovoye peat bog developed in watershed areas composed of crystalline schists and gneisses, and the maximum concentrations were observed in subburs and alluvial soils formed, respectively, on the products of weathering of granitized rocks and monazite-bearing alluvial deposits of the Vasilevka River Valley. The studied soils are characterized by low average concentrations of  $^{40}\text{K}$  and  $^{238}\text{U}$ , corresponding to their background values in the soils of Yakutia.  $^{232}\text{Th}$  in the studied soils is characterized by an increased average concentration compared to the geochemical background. In addition to the composition of soil-forming rocks, the content and distribution of radionuclides in soils are significantly affected by soil-forming processes, chemical properties of elements and technogenic effects. According to the effective specific activity of radionuclides, the studied soils correspond to the first, second and third classes of building materials. In some areas of technogenic landscapes, soils and enriched sands are considered low-radioactive industrial waste, which requires disposal, according to the specific activity of thorium. The identified areas of natural thorium concentration in the alluvial sediments of watercourses have strict restrictions on their use as building materials.

*Keywords:* Aldan upland, isotopes of potassium, uranium, thorium, Alluvial dark humus, Haplic Fluvisols, Podbur is typical, Entic Podzols