ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 1, с. 110–118

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.438.2

СОДЕРЖАНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ФОРМЫ МИГРАЦИИ ^{238}U В ПОЧВАХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

© 2020 г. А. П. Чевычелов[a], *, П. И. Собакин[a]

[a] *Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр-т Ленина, 41, Якутск, 677980 Россия*

**e-mail: chev.soil@list.ru*

Поступила в редакцию 01.03.2019 г.
После доработки 07.07.2019 г.
Принята к публикации 20.07.2019 г.

Исследовано содержание, внутрипрофильное распределение и миграционноспособные формы ^{238}U в автоморфных почвах – подбурах (Entic Podzols) и гидроморфных аллювиальных почвах (Fluvisols) как природных, так и техногенных ландшафтов Южной Якутии. В техногенных ландшафтах Южной Якутии на территории Эльконского ураново-рудного района отмечаются два вида миграции элементов в почвах – аэротехногенный и гидрогенно-техногенный, которые определяют степень радиоактивного загрязнения почв ^{238}U, характер внутрипрофильного распределения и соотношение миграционноспособных форм данного радионуклида. Наблюдается повышение подвижности ^{238}U в радиоактивно-загрязненных почвах по сравнению с почвами природных ландшафтов. При этом в гидроморфных аллювиальных почвах по сравнению с автоморфными подбурами отмечается рост как общей степени радиоактивного загрязнения, так и количества миграционноспособных форм урана.

Ключевые слова: накопление ^{238}U в почвах, радиоактивное загрязнение

DOI: 10.31857/S0032180X20010062

ВВЕДЕНИЕ

Уран является самым тяжелым из химических элементов, достоверно известных в земной коре. Он обладает порядковым номером 92 и атомным весом 238.07. В природе известно три долгоживущих изотопа урана, которые характеризуются следующей распространенностью: ^{238}U – 99.27%, ^{235}U – 0.72% и ^{234}U – 0.01% и периодами полураспада – 4.51×10^9, 7.13×10^8 и 2.47×10^5 лет соответственно [11]. Следовательно, основным изотопом урана, который содержится в горных породах, корах выветривания и почвах, является ^{238}U, количество которого составляет 99.3% от общего содержания урана. В земной коре кларк урана 2.3×10^{-4}%, а в почвах мира содержание данного элемента варьирует от 0.7 до 10.7×10^{-4}% [5]. Среднее количество урана для всей совокупности почв наиболее распространенных ландшафтов бывшего СССР с естественной радиоактивностью составляет $(3.2 \pm 0.6) \times 10^{-4}$% [20]. При этом содержание ^{238}U в почвах высокогорных районов Большого Кавказа изменяется от 1.3 до 1.8×10^{-4}% [1], составляя в среднем для горных районов Кавказа, Забайкалья и Северо-Востока России соответственно $(1.7 \pm 0.1, 1.9 \pm 0.1$ и $1.5 \pm 0.1) \times 10^{-4}$% [4].

Согласно геохимической классификации элементов, уран относится к группе литофильных и сидерофильных элементов с переменной валентностью, образующих катионы и анионы. Основное значение в геохимии урана имеет физико-химическая миграция, он – активный мигрант в гидротермах и в зоне гипергенеза, концентрируется на барьерах многих классов. Уран относится к группе элементов подвижных и слабоподвижных в окислительной обстановке, инертных в восстановительных (глеевой и сероводородной) обстановках и осаждающихся на сероводородных и глеевых барьерах [13]. Следовательно, уран отличается высокой контрастностью миграции и осаждается на восстановительных барьерах. Что касается техногенной миграции, то уран, как и другие металлы, поступает в ландшафты, мигрируя на сотни и тысячи километров от мест добычи к местам потребления. Технофильность U в 50–60-х годах XX в. составляла 1×10^8–$n \times 10^7$, то есть он попал в одну группу с Cr, Mo, W, Ca, Ni и др. При этом под технофильностью понимается степень использования химического элемента, она характеризуется отношением ежегодной его добычи к кларку в литосфере. U технофильнее Al, K, Mg, а также многих редких элементов (Tl, Ge, V, Pt, Be и др.), но менее технофилен, чем Pb, Cl, Au [7].

Все исследователи, изучающие уровни содержания и миграцию ^{238}U в почвах различных природных зон и регионов с естественной и повышенной радиоактивностью в России [8, 9, 12, 19, 23, 25] и за рубежом [24, 26–28], справедливо отмечают следующее. Количество данного радионуклида определяется исходным содержанием в почвообразующих породах, то есть литолого-геохимическими особенностями конкретных территорий, а внутрипрофильное распределение ^{238}U, как и процессы его вертикальной и латеральной миграции в ландшафте – характером и интенсивностью почвообразовательных процессов, протекающих в данных почвах их свойствами, а также природными ландшафтно-климатическими условиями. При этом для почв гумидной зоны выдерживается ряд миграции элементов Ra > U > Th [15].

В настоящее время наименее изученными вопросами почвенной геохимии ^{238}U являются проблемы, связанные с количественным содержанием, характером внутрипрофильного распределения и соотношением миграционноспособных форм данного радионуклида в различных типах почв в зависимости от ландшафтно-климатических условий миграции. Решение вопросов миграции ^{238}U в подбурах и аллювиальных почвах Южной Якутии – цель представленной статьи.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в Эльконском урано-рудном районе (**ЭУРР**) на территории Южной Якутии. Данный район геоморфологически приурочен к Эльконскому горсту, представляющему горное поднятие на Алданском нагорье, характеризующееся низко- и среднегорным рельефом и преобладанием в растительном покрове горно-таежной растительности. Климат исследуемой территории – континентальный, холодный гумидный и супергумидный [21]. В почвенном покрове региона в автоморфных позициях формируются подзолы (Albic Podzols) и подбуры (Entic Podzols), а в поймах рек и ручьев – аллювиальные почвы (Fluvisols).

Естественные горно-таежные ландшафты Эльконского горста в большей степени нарушены длительными и широкомасштабными геологоразведочными работами поиска радиоактивного сырья, которые здесь проводились в последней трети XX в. В результате этих работ было извлечено из недр и складировано на дневную поверхность в отвалы более 1 млн т горнорудной массы. Общее количество урана, содержащегося в данной рудной массе, оставляет около 2000 т [22]. Это исходно предполагает в ландшафтно-климатических условиях данного района значительные масштабы и высокую степень радионуклидного загрязнения почвенно-растительного покрова в

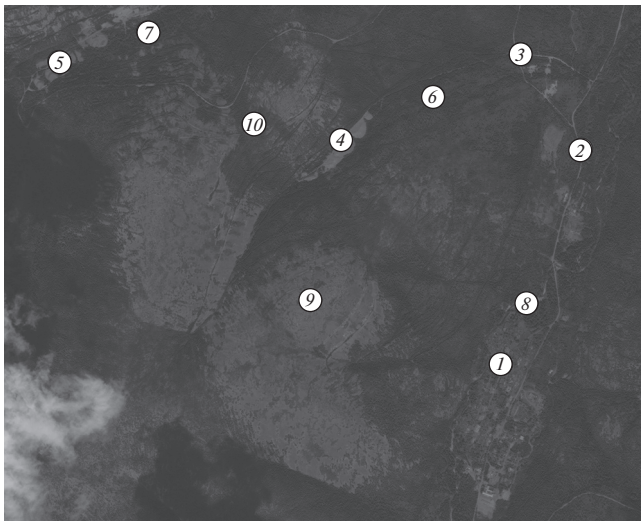

Рис. 1. Фрагмент космоснимка исследуемой территории: *1* – пос. Заречный; *2* – дорога пос. Заречный – г. Томмот; *3* – дорога на месторождение Курунг; *4* – отвалы месторождения Курунг; *5* – отвалы месторождения Эльконское плато; *6* – руч. Пропадающий; *7* – руч. Акин; *8* – р. Курунг; *9* – тундрогольцы и каменные пустоши; *10* – водораздельные склоны с горно-таежной растительностью.

зоне влияния отвалов [18]. Отвалы, как правило, приурочены к днищам и склонам долин малых рек и ручьев, а составляющие их компоненты, в том числе естественные радионуклиды, подвержены интенсивному ветровому и водному рассеянию в процессе гипергенного выветривания.

Объектами исследования являлись автоморфные почвы – подбуры (Entic Podzols (Arenic)) и гидроморфные аллювиальные почвы (табл. 1). Техногенно-загрязненные подбуры (разрезы 1ЭГ-02 и 4ЭГ-02) и аллювиальные почвы (Dystric and Eutric Fluvisols (Arenic)) (разрезы 1ЭГ-06, 2ЭГ-06 и 5ЭГ-02) располагались соответственно на водораздельном склоне и в долине ручья, пропадающего в зоне влияния радиоактивных отвалов месторождения Курунг (рис. 1).

При проведении работ использовали общепринятые почвенные методы исследований: сравнительно-географический, профильно-генетический и сравнительно-аналитический [16, 17]. Химический состав и свойства почв определяли по стандартным методикам, принятым в почвоведении: pH – потенциометрически, содержание гумуса – по Тюрину, обменных катионов – по Гедройцу, гранулометрический состав – по Качинскому [2].

В изучаемых почвах ^{238}U определяли γ-спектрометрическим методом по дочернему ^{226}Ra на многоканальном анализаторе “Прогресс-Гамма” со сцинтилляционным детектором NaJ(Tl) размером 63 × 63 мм, с 7.3% разрешением по γ-линии ^{137}Cs (666 Кэв). Проведены γ-спектрометрические

Таблица 1. Географические и морфологические характеристики исследуемых почв

Почва, № разреза	Географические координаты	Местоположение	Строение профиля
		Подбуры	
Подбур типичный, 1ЭГ-02	58°40′04.1″ N, 126°14′06.2″ E, *h* = 716 м	На территории ЭУРР, подножие водораздельного склона	A0(0–8)–A0A1(8–15)–B(15–23)–BC(23–26)–C(26–32 см)
Подбур типичный, 3Н-02	58°41′18.2″ N, 126°18′37.0″ E, *h* = 755 м	Там же, верхняя часть водораздельного склона	A0(0–10)–A0A1(10–16)–B(16–28)–BC(28–32)–CD(32–36 см)
Подбур оподзоленный, 4ЭГ-02	58°40′01.3″ N, 126°14′12.0″ E, *h* = 679.8 м	Там же, нижняя часть водораздельного склона	A0(0–2)–A0A1(2–5)–A1A2(5–8)–B(8–14)–BC(14–19)–CD(19–37)–D(37–45 см)
Подбур оподзоленный, 1Г-05	58°27′50.6″ N, 126°44′02.0″ E, *h* = 986.6 м	Алданское нагорье, вершина водораздела	A0A1(0–4)–A1A2(4–7)–BC(7–30)–CD(30–50 см)
		Аллювиальные почвы	
Аллювиальная темногумусовая, 2ЭГ-06	58°40′08.3″ N, 126°14′35.6″ E, *h* = 662.0 м	На территории ЭУРР, пойма руч. Пропадающего в 500 м ниже отвалов участка Курунг 1	A0A1(0–4)–A1(4–14)–BC(14–42)–[AB](42–52 см)
Аллювиальная темногумусовая, 5ЭГ-02	58°40′12.1″ N, 126°15′06.3″ E, *h* = 635.8 м	Там же, в 850 м ниже отвалов участка Курунг 1	A0(0–1)–A0A1(1–2)–A1(2–18)–B(18–24)–C(24–45)–[AC](45–58 см)
Аллювиальная слоистая, 1ЭГ-06	58°42′11.8″ N, 126°15′29.9″ E, *h* = 627.9 м	Там же, в 1350 м ниже отвалов участка Курунг 1	A0(0–1)–A1(1–4)–BC(4–9)–[AB](9–11)–C1(11–45)–C2(45–70 см)
Аллювиальная темногумусовая, 6ЭГ-03	58°42′46.0″ N, 126°18′16.4″ E, *h* = 542.8 м	На территории ЭУРР, долина р. Курунг в 8 км ниже отвалов участка Курунг 1	A0(0–2)–A1(2–8)–B(8–11)–[AB](11–14)–BC(14–19)–C(19–29 см)
Аллювиальная темногумусовая, 3Д-06	58°53′19.1″ N, 126°22′12.4″ E, *h* = 298 м	Долина р. Алдан, пойма р. Джелинда в 1.5 км от устья	A1(0–4)–AB(4–15)–BC(15–36)–C(36–48 см)

измерения в сосудах Маринели объемом 1 л. Обработку γ-спектров осуществляли матричным методом с помощью программного обеспечения “Прогресс” [10], максимальная погрешность измерения не более ±30%. Миграционноспособные формы ^{238}U извлекали согласно методике, предложенной в работе [3]. В качестве экстрагентов при извлечении водорастворимой формы ^{238}U использовали дистиллированную воду, обменной – ацетатно-аммонийный буферный раствор (pH 4.8), кислоторастворимой – 1 н. HCl. Остаточную (неизвлекаемую) или форму 4 ^{238}U считали по разности общего содержания урана и его количества, суммарно перешедшего в состав форм 1–3. Соотношение почвы и жидкости составляло 1 : 5, время взаимодействия почвы с раствором 1 сутки. Определение содержания урана в вытяжках осуществляли лазерно-люминесцентным методом на флюорометре АУФ-101 “Ангара” [14]. Чувствительность определения урана составляла 2×10^{-8} г/л, погрешность анализа не превышала ±15%.

Необходимо отметить, что при увеличении количества миграционноспособных форм радионуклидов, в том числе и ^{238}U, его подвижность возрастает, особенно при повышении содержания легкоподвижных фракций, то есть водорастворимой и обменной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав и свойства исследованных почв значительно различаются как на типовом, так и на подтиповом уровнях (табл. 2). Автоморфные почвы, подбуры типичные (разрезы 1ЭГ-02 и 3Н-02), характеризуются кислой реакцией среды верхних органогенных и слабокислой нижних минеральных горизонтов почвенного профиля. Содержание почвенного органического вещества и гумуса имеет аккумулятивный характер. Почвенно-поглощающий комплекс (**ППК**) данных почв в верхних горизонтах (A0, A0A1 и B) не насыщен обменными основаниями, при этом на долю обменного H^+ приходится 54–57% от суммы обменных оснований (*S*).

Таблица 2. Химические свойства и физико-химические показатели почв Южной Якутии

Горизонт	Глубина, см	pH		Гумус, %	Обменные катионы, смоль(экв)/кг почвы			Фракция, %	
		H_2O	KCl		Ca^{2+}	Mg^{2+}	H^+	<0.001 мм	<0.01 мм
Подбур типичный, разрез 1ЭГ-02									
A0	0–8	5.0	–	78.1*	–	–	–	–	–
A0A1	8–15	4.2	–	31.0	5.0	2.1	8.3	–	–
B	15–23	5.6	–	3.2	2.3	1.5	5.1	4.1	7.8
BC	23–26	5.9	–	1.9	1.4	1.2	1.0	3.5	7.6
D	26–32	6.2	–	0.1	0.3	0.2	0.4	2.3	3.9
Подбур типичный, разрез 3Н-02									
A0	0–10	5.4	–	79.1*	–	–	–	–	–
A0A1	10–16	4.7	–	30.0*	5.4	2.3	9.4	–	–
B	16–28	5.7	–	3.0	2.0	1.6	4.8	5.0	9.6
BC	28–32	5.9	–	1.5	1.2	1.0	0.8	4.2	8.1
CD	32–36	6.25	–	0.1	0.2	0.2	0.3	2.4	4.5
Подбур оподзоленный, разрез 4 ЭГ-02									
A0	0–2	4.0	–	80.5*	–	–	–	–	–
A0A1	2–5	4.0	–	56.2*	2.0	0.5	7.7	2.5	5.4
A1A2	5–8	4.0	–	11.5	2.2	0.5	7.3	2.5	7.4
B	8–14	4.1	–	5.7	2.0	0.7	3.1	10.7	17.2
BC	14–19	4.2	–	6.7	5.0	1.0	2.8	6.6	14.4
CD	25–35	4.2	–	3.6	3.7	1.5	2.9	12.7	28.2
Подбур оподзоленный, разрез 1Г-05									
A0A1	0–4	3.9	2.9	37.1*	6.8	2.6	25.0	–	–
A1A2	4–7	3.9	3.1	7.8	1.6	0.5	7.2	3.2	9.9
BC	15–25	5.2	4.0	1.0	2.6	1.6	1.0	8.9	33.7
CD	35–45	5.5	4.1	0.6	3.5	2.1	0.4	9.9	32.7
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 2ЭГ-06									
A0A1	0–4	5.8	5.0	60.5*	60.9	13.8	1.7	–	–
A1	4–14	5.9	5.0	12.7	18.6	4.3	1.1	5.8	17.2
BC	18–28	6.4	5.4	3.7	5.2	2.5	0.1	3.4	11.2
BC	32–42	6.1	5.2	5.1	6.3	2.1	0.2	3.3	11.5
[AB]	42–52	6.0	5.0	18.8	21.2	11.6	0.7	6.8	16.5
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 5ЭГ-02									
A0A1	1–2	4.8	–	56.0*	39.2	13.5	3.9	–	–
A1	2–18	4.4	–	9.9	8.8	7.8	2.4	6.4	13.9
B	18–24	4.5	–	4.8	4.6	8.3	1.2	5.2	10.6
C	30–40	5.0	–	0.6	3.8	7.5	0.6	5.3	10.3
[AC]	47–57	5.4	–	8.8	25.9	11.6	5.7	10.9	23.0
Аллювиальная темногумусовая, разрез 6ЭГ-03									
A1	2–8	6.1	5.6	36.7*	37.3	24.9	0.7	–	–
B	8–11	6.0	5.2	7.9	7.8	1.7	0.3	7.8	9.5
[AB]	11–14	5.5	5.2	20.7	20.6	15.1	1.5	8.7	15.2
BC	14–19	6.2	5.2	1.4	2.9	0.6	0.1	3.8	6.6
CD	19–29	6.0	5.1	1.3	2.8	1.6	0.3	5.8	7.4
Аллювиальная темногумусовая почва, разрез 3Д-06									
A1	0–4	7.4	6.8	17.1	29.6	21.5	Н.о.	–	–
AB	4–14	7.3	6.6	13.2	16.8	12.1	»	6.2	12.6
BC	15–25	6.6	5.6	8.2	9.4	6.4	»	4.1	10.1
C	35–45	6.2	5.2	6.5	6.5	3.4	0.1	3.8	9.3
Аллювиальная слоистая почва, разрез 1ЭГ-06									
A1	1–4	6.3	5.5	25.4	40.3	14.2	0.4	–	–
BC	4–9	6.7	5.6	2.4	3.6	1.0	0.2	3.4	6.0
[AB]	9–11	6.0	4.9	10.8	8.2	2.0	0.3	3.9	7.2
C1	15–25	6.8	5.7	0.6	2.3	1.9	0.2	2.6	5.3
C1	35–45	6.3	5.1	2.6	3.3	1.2	0.1	2.7	4.6
C2	55–65	6.1	4.9	3.8	7.4	2.0	0.4	4.5	10.5

* Приведено значение потери при прокаливании.
Примечание. Прочерк – значение показателя не определено. Н.о. – не обнаружено.

В верхних органогенных и гумусово-элювиальных горизонтах оподзоленных подтипов реакция среды (pH_{H_2O}) сильнокислая, а в нижних минеральных – кислая и слабокислая. В подбурах оподзоленных (разрезы 4ЭГ-02 и 1Г-05) содержание органического вещества носит аккумулятивный характер, а ППК горизонтов (А0, А0А1 и А1А2) еще в большей мере, чем в подбурах типичных не насыщен обменными катионами Ca^{2+} и Mg^{2+}, при этом на долю обменного H^+ приходится 73–77% от *S*. Все исследованные разрезы подбуров, как правило, характеризуются укороченным почвенными профилем (<50 см), высокой степенью каменистости и легким песчано-супесчаным гранулометрическим составом. Исключением являются горизонты ВС и CD подбуров (разрезы 4ЭГ-02 и 1Г-05), в которых отмечается утяжеление гранулометрического состава до легко- и среднесуглинистого.

Изучаемые гидроморфные аллювиальные почвы данного района также различаются по составу и свойствам, хотя и в меньшей степени, чем подбуры. Значения pH_{H_2O} в данных почвах изменяется от кислого (разрез 5ЭГ-02) до слабокислого (разрезы 2ЭГ-06, 6ЭГ-03) и даже до нейтрального и слабощелочного (разрезы 3Д-06, 1ЭГ-06). ППК данных почв насыщен обменными основаниями Ca^{2+} и Mg^{2+}, а доля обменного H^+ незначительна и максимально составляет 8–13% от *S*. Главной особенностью морфологии, свойств и состава исследуемых аллювиальных почв является наличие в них на разной глубине погребенных горизонтов АВ и АС, обогащенных органическим веществом и мелкодисперсными фракциями почвенного мелкозема: глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм). Такие погребенные почвенные горизонты выявлены в четырех из пяти исследованных разрезов аллювиальных почв. В этой связи необходимо отметить, что слоистость является генетическим признаком пойменных (аллювиальных) почв [6].

Как отмечалось ранее, почвы – это центральные блоки ландшафтов, аккумулирующие техногенные загрязнения, в том числе и радиоактивные. Поэтому оценка содержания и распределения радионуклидов в почвах техногенных ландшафтов по сравнению с фоновыми, незагрязненных территорий позволяет надежно и четко фиксировать как степень, так и одновременно характер их радиоактивного загрязнения по основным потокам рассеяния радионуклидов [22].

В качестве фонового среднего значения для подбуров принято содержание урана, равное 1 мг/кг, а для аллювиальных почв – 3 мг/кг. Интенсивность накопления ^{238}U в почвах оценивали на основе средневзвешенного значения, отнесенного к мощности отдельных почвенных горизонтов (слоев) и содержания в них данного радионуклида (табл. 3).

Среднее содержание ^{238}U в подбурах природных ландшафтов изменяется почти в 8 раз, а в аллювиальных почвах – более чем в 2 раза. Последнее обусловлено различиями минералогического состава, а также свойств и состава исследуемых почв: содержанием гумуса, частиц глины и ила. Внутрипрофильное распределение урана в данных почвах имеет соответственно элювиальный и аккумулятивный характер.

При аэротехногенном загрязнении почв поступивший на поверхность почв в виде пыли ^{238}U накапливается и закрепляется в верхней части почв в слое 19–23 см, то есть отмечается аккумулятивный характер внутрипрофильного распределения урана, а значения коэффициента относительного превышения над фоновым уровнем (*K*пр) составляют 6–47. При гидрогенно-техногенном загрязнении отмечается сложное внутрипрофильное распределение ^{238}U в аллювиальных почвах. Так, в аллювиальной темногумусовой почве разреза 2ЭГ-06 выявляется два равнозначных максимума распределения ^{238}U на глубине 4–14 и 42–52 см, в аналогичной почве разреза 5ЭГ-02 – также два, но убывающих по величине максимума на глубине 2–18 и 47–57 см. В аллювиальной слоистой почве разреза 1ЭГ-06 выделяется три убывающих максимума на глубине 1–4, 9–11 и 55–65 см. При этом по мере удаления от источников радиоактивного загрязнения значение *K*пр для исследуемых аллювиальных почв убывает от 211 до 19–29. Таким образом, в изучаемых аллювиальных почвах техногенных ландшафтов отмечается накопление ^{238}U в погребенных горизонтах, обогащенных органическим веществом (гумусом), а также частицами глины и ила. Поэтому не случайно, что для аллювиальных почв как природных, так и техногенных ландшафтов были получены относительно высокие значения коэффициентов корреляции для связей содержание ^{238}U–количество гумуса, обменного Ca^{2+}, частиц физической глины, которые соответственно составляли 0.526, 0.522, 0.542 и 0.805, 0.619, 0.479. Тогда как для подбуров природных ландшафтов изучаемой территории аналогичные корреляционные связи выявлены для ила ($r = 0.712$) и глины ($r = 0.814$), а для техногенно-загрязненных подбуров – для гумуса ($r = 0.467$), обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} ($r = 0.545$ и 0.704). Это полностью соответствует геохимическим принципам миграции урана в гумидных ландшафтах в условиях окислительной обстановки, когда данный элемент накапливается в торфяниках и аллювиальных глинах [13].

При аэротехногенном загрязнении почв, в подбуре оподзоленном (табл. 4, разрез 4ЭГ-02) содержание водорастворимой формы урана составляет 0.3–2.2%, обменной – 1.4–5.5%, кислорастворимой – 1.3–7.4% от общего количества радионуклида. При этом относительное содержа-

Таблица 3. Содержание ^{238}U в почвах Южной Якутии

№ разреза	Почва	Горизонт	Глубина, см	^{238}U, мг/кг	*К*пр*
		Подбуры техногенных ландшафтов			
1ЭГ-02	Подбур типичный	A0	0–8	100.0	100
		A0A1	8–15	95.0	95
		B	15–23	5.4	5.4
		BC	23–26	1.6	1.6
		Среднее**	26–32	1.6	1.6
				47	47
4ЭГ-02	Подбур оподзоленный	A0	0–2	40.2	40
		A0A1	2–5	15.4	15
		A1A2	5–8	4.6	4.6
		B	8–14	3.4	3.4
		BC	14–19	3.8	3.8
		CD	25–35	3.1	3.1
		Среднее		5.8	5.8
		Подбуры природных ландшафтов			
3Н-02	Подбур типичный	A0	0–10	0.3	0.3
		A0A1	10–16	0.5	0.5
		B	16–28	1.0	1.0
		BC	28–32	1.1	1.1
		C	32–36	1.4	1.4
		Среднее		0.8	0.8
1Г-05	Подбур оподзоленный	A0A1	0–4	6.3	6.3
		A1A2	4–7	5.4	5.4
		BC	15–25	5.7	5.7
		CD	35–45	7.4	7.4
		Среднее		6.3	6.3
		Аллювиальные почвы техногенных ландшафтов			
2ЭГ-06	Аллювиальная темногумусовая	A0A1	0–4	524	175
		A1	4–14	1000	333
		BC	18–28	161	54
		BC	32–42	282	94
		[AB]	42–52	1120	373
		Среднее		633	211
1ЭГ-06	Аллювиальная слоистая	A0	0–1	425	142
		A1	1–4	467	156
		BC	4–9	27	9
		[AB]	9–11	121	40
		C1	15–25	11	3.7
		C1	35–45	23	7.7
		C2	55–65	89	30
		Среднее		88	29
5ЭГ-02	Аллювиальная темногумусовая	A0	0–1	30	10
		A0A1	1–2	104	35
		A1	2–18	113	38
		B	18–24	3.8	1.3
		C	30–40	4.2	1.4
		[AC]	47–57	44	15
		Среднее		56	19
		Аллювиальные почвы природных ландшафтов			
6ЭГ-03	Аллювиальная темногумусовая	A0	0–2	2	0.7
		A1	2–8	3	1
		B	8–11	9	3
		[AB]	11–14	6	2
		BC	14–19	2	0.7
		C	19–29	2	1
		Среднее		3.7	1.2

Таблица 3. Окончание

№ разреза	Почва	Горизонт	Глубина, см	^{238}U, мг/кг	*К*пр*
3Д-06	Аллювиальная темногумусовая	A1	0–4	9.3	3.1
		AB	4–14	8.8	2.9
		BC	15–25	7.5	2.5
		C	25–35	7.1	2.4
		Среднее		8.0	2.7

* Значение коэффициента относительного превышения над фоновым уровнем.
** Средневзвешенное значение для почвенного профиля.

ние водорастворимой и кислоторастворимой форм, как и в целом миграционноспособных форм ^{238}U, в техногенно-загрязненном подбуре больше, чем в естественном подбуре (разрез 1ЭГ-05). Если в подбуре техногенного ландшафта среднее содержание миграционноспособных форм составляло 12.1%, то в подбуре природного ландшафта – только 6.5%.

Еще более сложное распределение и соотношение миграционноспособных форм урана наблюдается в изучаемых аллювиальных почвах. Учитывая то, что аллювиальные почвы в условиях гидрогенно-техногенного загрязнения содержат более значительные количества общего урана, относительное содержание в них подвижной формы данного радионуклида составляет 0.01–0.7%, то есть меньше отмечаемого для техногенно-загрязненного подбура. А содержание обменной и кислоторастворимой форм ^{238}U в аллювиальных почвах, которые изменяются значительно, существенно больше и составляет соответственно 5.0–26.1 и 3.3–31.0%. При этом суммарное количество миграционноспособных форм урана в техногенно-загрязненных аллювиальных почвах также изменяется значительно и составляет в среднем 25.4–40.8%. Содержание обменной, кислоторастворимой, как и общее содержание миграционноспособных форм урана в техногенно-загрязненных аллювиальных почвах, больше, чем в аллювиальной темногумусовой почве природного ландшафта (разрез 3Д-06). Следовательно, как при воздушном, так и водном рассеивании урана в техногенных ландшафтах ЭУРР наблюдается увеличение подвижности или миграционной способности ^{238}U в радиоактивно-загрязненных почвах по сравнению с почвами природных ландшафтов. Последнее обусловлено особенностями природных условий исследуемой территории (холодный гумидный климат, таежная зона, окислительная обстановка миграции), когда ^{238}U в почвах преимущественно мигрирует в форме комплексных органо-минеральных соединений в высшей степени валентности (U^{+6}) и характеризуется высокой подвижностью [13, 19]. В этих условиях накопление общего количества ^{238}U в почвах сопровождается увеличением содержания его миграционноспособных форм или ростом общей подвижности. При этом в гидроморфных аллювиальных почвах по сравнению с автоморфными подбурами отмечается рост, как общей степени радиоактивного загрязнения, так и количества миграционноспособных форм данного радионуклида.

ВЫВОДЫ

1. В условиях высококонтрастного литогеохимического фона, холодного гумидного климата и преобладания в растительном покрове горно-таежной растительности среднее содержание ^{238}U в почвах природных ландшафтов Южной Якутии значительно различается и изменяется от 0.8 до 8.0 мг/кг. При этом внутрипрофильное распределение урана в изучаемых автоморфных подбурах носит в большей мере элювиальный, а в гидроморфных аллювиальных почвах – аккумулятивный характер. Среднее суммарное содержание миграционноспособных форм урана в почвах естественных ландшафтов исследуемого региона составляет <10%.

2. В почвах техногенных ландшафтов ЭУРР на территории Южной Якутии наблюдается два вида миграции ^{238}U: аэротехногенный и гидрогенно-техногенный, обусловленных соответственно воздушным и водным рассеиванием данного радионуклида от источников загрязнения, которыми являются радиоактивные отвалы горных пород.

3. В автоморфных подбурах техногенных ландшафтов Южной Якутии отмечается аккумулятивный характер внутрипрофильного распределения ^{238}U. При этом данный радионуклид накапливается в поверхностном слое почв мощностью 19–23 см. Среднее суммарное содержание миграционноспособных форм ^{238}U в радиоактивно-загрязненном подбуре составляет 12% от общего количества урана.

4. В гидроморфных аллювиальных почвах техногенных ландшафтов исследуемого региона наблюдается сложное внутрипрофильное распределение ^{238}U, когда выделяются 2–3 равнозначных или убывающих максимума содержания урана. При этом данные возрастающие количества ^{238}U, как правило, приурочены к погребенным почвенным горизонтам, обогащенным гумусом, а также мелкодисперсными частицами глины и ила. Среднее суммарное содержание миграционноспособных форм ^{238}U в ра-

Таблица 4. Миграционноспособные формы ^{238}U в почвах Южной Якутии, % от общего содержания

Горизонт	Глубина, см	Формы урана*			
		1	2	3	4
Техногенный ландшафт, подбур оподзоленный, разрез 4ЭГ-02					
A0	0–2	0.3	1.4	1.3	97.0
A0A1	2–5	0.5	5.5	6.7	87.3
A1A2	5–8	1.7	3.7	5.4	89.2
B	8–14	1.8	3.8	5.6	88.8
BC	14–19	1.6	4.2	7.4	86.8
CD	25–35	2.2	5.0	5.3	87.5
Природный ландшафт, подбур оподзоленный, разрез 1ЭГ-05					
A0A1	0–4	0.2	5.2	3.3	91.3
A1A2	4–7	0.3	5.7	0.7	93.3
BC	15–25	0.8	3.7	2.5	93.0
CD	35–45	0.1	2.8	2.2	94.9
Техногенные ландшафты					
Аллювиальная темногумусовая, разрез 2ЭГ-06					
A0A1	0–4	0.1	6.5	10.0	83.4
A1	4–14	0.01	5.0	5.5	89.5
BC	18–28	0.04	14.6	17.7	67.7
BC	32–42	0.07	23.0	26.6	50.3
[AB]	42–52	0.03	5.4	7.6	87.0
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5ЭГ-02					
A0	0–1	0.7	6.3	3.3	89.7
A0A1	1–2	0.3	19.2	13.5	67.0
A1	2–18	0.2	22.1	12.4	65.3
B	18–24	0.2	15.7	15.8	68.3
C	30–40	0.3	15.0	31.0	53.7
[AC]	47–57	0.3	32.0	25.7	42.0
Аллювиальная слоистая, разрез 1ЭГ-06					
A0	0–1	0.3	7.0	8.0	84.7
A1	1–4	0.3	5.4	3.9	90.4
BC	4–9	0.1	22.2	20.4	57.3
[AB]	9–11	0.04	8.3	10.7	81.0
C1	15–25	0.04	18.2	19.5	62.3
C1	35–45	0.05	26.1	17.4	56.4
C2	55–65	0.6	5.6	9.0	84.8
Природный ландшафт, аллювиальная темногумусовая, разрез 3Д-06					
A1	0–4	0.1	26.9	3.3	69.7
AB	4–14	0.1	4.7	0.7	94.5
BC	15–25	0.1	6.5	2.5	90.9
C	25–35	0.1	4.4	2.2	93.3

* Формы урана: 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – кислоторастворимая, 4 – остаточная.

диоактивно-загрязненных аллювиальных почвах составляет 25–41% от общего содержания урана.

5. Как при воздушном, так и водном рассеивании урана в техногенных ландшафтах Южной Якутии наблюдается рост подвижности или миграционной способности ^{238}U в радиоактивно-загрязненных почвах по сравнению с почвами природных ландшафтов. При этом в гидроморфных аллювиальных почвах по сравнению с автоморфными подбурами отмечается увеличение, как общей степени радиоактивного загрязнения, так и количества миграционноспособных форм данного радионуклида.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асварова Т.А., Абдуллаева А.С., Магомедов М.А.* Естественные радионуклиды в породах и почвах высокогорных районов Большого Кавказа // Почвоведение. 2012. № 6. С. 695–707.
2. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.

3. *Архипов Н.П., Федорова Т.А., Февралева Л.Т.* Соотношение форм соединений тяжелых естественных радионуклидов в почвах // Почвоведение. 1986. № 1. С. 69–73.
4. *Балясный Н.Д., Василенко В.Н., Пегоев А.Н., Фридман Ш.Д.* Естественная радиоактивность почв в горных районах СССР // Тр. Ин-та прикладной геофизики. М.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 116–152.
5. *Водяницкий Ю.Н.* Химические аспекты поведения урана в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2011. № 8. С. 940–952.
6. *Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 296 с.
7. *Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е.* Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Наука, 1974. 280 с.
8. *Егорова И.А., Кислицына Ю.В., Пузанов А.В.* Радионуклиды в почвах Северо-Западного Алтая // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 31–35.
9. *Егорова И.А., Пузанов А.В., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Горбачев И.В.* Естественные радионуклиды (^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K) в высокогорных почвах Северо-Западного Алтая // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 4(7). С. 16–19.
10. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением “Прогресс”. М.: Центр метрологии, 2003. 16 с.
11. Основные черты геохимии урана / Под ред. Виноградова А.П. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 352 с.
12. *Панюшкина Г.И., Нагалевский В.Я.* Распределение и миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове Краснодарского края // Вестник Южного научного центра РАН. 2007. Т. 3. № 2. С. 52–56.
13. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
14. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации / Под ред. Смыслова А.А. М.: МинГео СССР, 1974. 139 с.
15. *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.
16. *Роде А.А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука, 1971. 92 с.
17. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.
18. *Собакин П.И., Чевычелов А.П., Ушницкий В.Е.* Радиоэкологическая обстановка на территории Якутии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 283–288.
19. *Титаева Н.А., Таскаев А.И.* Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1984. 232 с.
20. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
21. *Чевычелов А.П., Собакин П.И.* Миграция естественных радионуклидов в техногенных таежно-мерзлотных ландшафтах Южной Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 138 с.
22. *Чевычелов А.П., Собакин П.И.* Радиоактивное загрязнение аллювиальных почв таежных ландшафтов Якутии ^{137}Cs, ^{226}Ra и ^{238}U // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1535–1544.
23. *Шуктумова И.И., Титаева Н.А., Таскаев А.И., Алексахин Р.М.* Поведение ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra в почвах горной тундры // Почвоведение. 1983. № 8. С. 49–53.
24. *Gavrilescu M., Pavel L.V., Cretescu I.* Characterization and remediation of soils contaminated with uranium // J. Hazardous Materials. 2009. V. 163. № 2–3. P. 475–510.
25. *Gedeonov A.D., Kolchin I.V., Maliskin A.I., Andreev G.S.* Uranium-234, uranium-235, uranium-238 in soils near Siberian chemical enterprises (Tomsk-7, Seversk) // Radioprotection. 2009. V. 44. № 5. P. 151–153.
26. *Kelly S.D.* Uranium chemistry in soils and sediments // Developments in Soil Science. 2010. V. 34. P. 411–466.
27. *Tzortzis M., Tsertos H.* Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus // J. Environ. Radioactivity. 2004. V. 77. № 3. P. 325–338.
28. *Tserenpil S., Liu O.C., Maclov O.D., Fillipov M.F., Belov A.G., Norov H., Theng B.K.G.* Chemical and mineralogical composition of the Mongolian rural soils an their uranium sorption behavior // J. Environ. Radioactivity. 2013. V. 118. P. 105–112.

Content, Distribution and Migration of ^{238}U in Soils of Natural and Technogenic Landscapes of Southern Yakutia

A. P. Chevychelov[1, *] and P. I. Sobakin[1]

[1]*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, 677980 Russia*

**e-mail: chev.soil@list.ru*

The results of evaluating the content, profile distribution and migration-capable compounds with ^{238}U isotopes in automorphic soils – podburs (Entic Podzols) and hydromorphic alluvial soils (Fluvisols) in both natural and technogenic landscapes of Southern Yakutia. Technogenic landscapes of Southern Yakutia, the Elkon uranium mine region in particular, were characterized by two distinct types of element migration within the soil: aero-technogenic and hydro-technogenic. These types of element migration determine the level of ^{238}U pollution of soils, the type of profile distribution and ratio of migration-capable compounds of ^{238}U. Radioactively polluted soils were characterized by increased mobility and migration capacity of ^{238}U isotopes as compared to soils of natural landscapes. Also, in contrast to automorphic podburs, the hydromorphic alluvial soils were characterized by elevated levels of radioactive pollution, as well as of mobile uranium compounds.

Keywords: accumulation of ^{238}U in soils, radioactive pollution