

П.И. СОБАКИН, А.П. ЧЕВЫЧЕЛОВ, Я.Р. ГЕРАСИМОВ

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН,
677980, Якутск, проспект Ленина, 41, Россия; radioecolog@yandex.ru, chev.soil@list.ru, yrger@mail.ru

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ ЦЕЗИЕМ-137

Изучены современные уровни глобальных выпадений ^{137}Cs в мерзлотных почвах тундровой и таежной зон Якутии. Показано, что запасы ^{137}Cs в почвах Якутии в зависимости от ландшафтно-климатических особенностей территории варьируют в значительном диапазоне. При этом наибольшее количество ^{137}Cs содержится в почвах горных районов (Алданское нагорье и хр. Улахан-Чистай), находящихся в зоне с максимальным среднегодовым количеством осадков, а наименьшее — в почвах тундровой зоны. Зафиксировано, что средняя плотность загрязнения почв ^{137}Cs на обследованных равнинных частях территории Якутии в настоящее время в целом снизилась в три-четыре раза, по сравнению с данными аэрогамма-спектрометрических съемок, проведенных в 1968–1974 гг. на территории Якутской АССР, за счет его радиоактивного распада, заглубления, выноса с поверхностными водами и аккумуляции растительностью. Показано, что в обследованных районах равнинной и горной частей Якутии уровень глобальных выпадений ^{137}Cs в почвах в среднем в два-четыре раза меньше, чем в почвах Урала, Западной и Южной Сибири и других территорий России. Выявлена корреляционная связь между плотностью загрязнения почв ^{137}Cs и количеством атмосферных осадков. Установлены основные закономерности миграции и перераспределения ^{137}Cs в различных типах почв сопряженных по стоку участков мерзлотных ландшафтов. В суровых природно-климатических условиях Якутии в мерзлотных почвах вертикальная и латеральная миграция ^{137}Cs слабее, чем в почвах европейской части России, загрязненных радиоцезием после аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

Ключевые слова: ядерные взрывы, глобальные выпадения, мерзлотные ландшафты, почвы, миграция.

P.I. SOBAKIN, A.P. CHEVYCHELOV, YA.R. GERASIMOV

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS,
677980, Yakutsk, Lenin Ave, 41, Russia, radioecology@yandex.ru, chev.soil@list.ru, yrger@mail.ru

GEOGRAPHICAL FEATURES OF POLLUTION OF THE TERRITORY OF YAKUTIA WITH CESIUM-137

Modern levels of global ^{137}Cs deposition in permafrost soils of tundra and taiga zones of Yakutia are studied. It is shown that the reserves of ^{137}Cs in the soils of Yakutia, depending on the landscape and climatic features of the territory, vary in a significant range. The greatest number of ^{137}Cs is contained in soils of mountain areas (Aldan highlands and Chr. Ulahan-Clean), located in the zone with the maximum average annual rainfall, and the lowest — in the soils of the tundra zone. It is recorded that the average density of soil pollution ^{137}Cs on the surveyed flat parts of the territory of Yakutia is now generally decreased by three to four times compared with the data of aerogamma-spectral surveys conducted 1968–1974 on the territory of the Yakut ASSR due to its radioactive decay, burial, removal from surface waters and accumulation of vegetation. It is shown that in the surveyed areas of the plains and mountains of Yakutia, the global deposition of ^{137}Cs in soils is on average 2–4 times less than in the soils of the Urals, Western and southern Siberia and other territories of Russia. The correlation between the density of soil pollution ^{137}Cs and the amount of atmospheric precipitation was revealed. The main regularities of migration and redistribution of ^{137}Cs in different types of soils conjugated by runoff of areas of permafrost landscapes are established. In the harsh climatic conditions of Yakutia in permafrost soils vertical and lateral migration ^{137}Cs weaker than in the soils of the European part of Russia contaminated with radioactive cesium after the accident at the Chernobyl nuclear power plant.

Key words: nuclear explosions, global fallouts, frozen landscapes, soils, migration.

ВВЕДЕНИЕ

Республика Саха (Якутия) — самый крупный субъект Российской Федерации, расположенный на северо-востоке страны. Основным источником загрязнения территории Якутии долгоживущими

техногенными радионуклидами послужили ядерные взрывы, проведенные в 1949–1980 гг., а также авария на Чернобыльской атомной электростанции 1986 г. Анализ показывает, что плотность загрязнения земной поверхности техногенными радионуклидами из атмосферы возрастала в периоды проведения серийных испытательных ядерных взрывов в 1955–1958 и 1961–1962 гг., достигнув максимума к 1966 г. [1]. Фиксируемые по данным аэрогамма-спектрометрической съемки в мерзлотных почвах равнинной части Якутии уровни глобальных выпадений цезия-137 (^{137}Cs) в конце 1960-х гг. составляли 1850–5550 Бк/м² [2]. В силу обширности Якутии и слабой развитости транспортной сети загрязнение ее территории техногенными радионуклидами до сих пор остается недостаточно изученным [3–8]. Цель настоящего исследования — оценка содержания и распределения ^{137}Cs в мерзлотных почвах разных природно-климатических зон Якутии.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены в 2003–2014 гг. в тундровой и таежной зонах Якутии (рис. 1). Экспедиционные исследования осуществлялись по заранее намеченным точкам с помощью вертолета, а также с применением водного (теплоход), вездеходного и автомобильного транспорта. Территория Якутии преимущественно принадлежит к двум тектоническим структурам — Сибирской платформе и Верхояно-Чукотской складчатой области (см. рис. 1). На Сибирской платформе левобережья р. Лены широко развиты плоскогорья и плато, а в пределах Алданского щита на южной окраине — нагорья с интенсивно расчлененным рельефом. На северо-востоке Верхояно-Чукотская область представлена мощными горными системами, ориентированными в меридиональном направлении [10, 11]. В целом 70 % территории Якутии занято горами (на северо- и юго-востоке), плоскогорьями и плато (на западе и юге). На севере и в центральных районах расположены обширные низменности и равнины. Климат Якутии, за исключением островов и побережья Северного Ледовитого океана, резко континентальный. Самые низкие температуры наблюдаются в январе в бассейнах рек Яны и Индигирки (–46,8 и –48,6 °С соответственно). Наиболее высокая средняя температура июля характерна для Центрально-Якутской равнины (17,6 °С). Годовое количество осадков на обследованной территории Якутии варьирует в пределах 120–600 мм, продолжительность зимнего периода 6–8 месяцев [12].

На территории Якутии развиты в основном сплошные многолетнемерзлые породы с мощностью на севере от 150–200 м и на западе до 500–1500 м (Вилуйское плато). Только на юге (Алданское нагорье, Становой хребет) наблюдается островное распространение многолетнемерзлых пород мощностью до 150 м. Мерзлота оказывает огромное влияние на формирование почвенного покрова, а также на развитие различных специфических форм мерзлотного рельефа, таких как полигоны, байджарахи, аласы и др. [13]. Глубина деятельного слоя почвогрунтов колеблется от 0,2–0,5 м в арктической тундре до 2,5–4 м в таежной зоне (Центральная и Южная Якутия).

Образцы из почвенных разрезов отбирались преимущественно на плоских и слабо наклоненных водораздельных поверхностях, а также в суходольных незатопаемых частях долин рек. В том и другом случае данные участки представляли собой наиболее информативные части ландшафтов с относительно слабой латеральной миграцией ^{137}Cs . Кроме того, на выбранных ключевых участках в каждой природно-климатической зоне для изучения особенностей распределения и перераспределения ^{137}Cs в почвах геохимически сопряженных участков ландшафтов были заложены почвенные разрезы на каждом выделенном элементе рельефа. Почвенные образцы из разрезов отбирали послойно через 1–5 см, как правило, до глубины 50 см. Для гамма-спектрометрического анализа проб на содержание ^{137}Cs был использован многоканальный анализатор ГАММА-01 (НПЦ «Аспект», Россия) со сцинтилляционным детектором на основе йодистого натрия размером 150 × 100 мм по методике, предложенной в работе [14]. Порог обнаружения метода для ^{137}Cs при экспозиции измерения 1 ч при массе проб около 250 г составляет 1–2 Бк/кг, причем относительная среднеквадратическая погрешность метода не превышает ±30 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что в мерзлотных почвах автоморфных ландшафтов Якутии современные уровни глобальных выпадений ^{137}Cs варьируют от 366 до 2465 Бк/м² (табл. 1). При этом на обследованной территории в настоящее время вклад Чернобыльского загрязнения почв ^{137}Cs не известен. По данным территориального управления гидрометеослужбы, в августе 1987 г. в районе Якутска вклад Чернобыльского загрязнения ^{137}Cs верхнего 5-сантиметрового слоя почвы не превышал 6 % от его общего

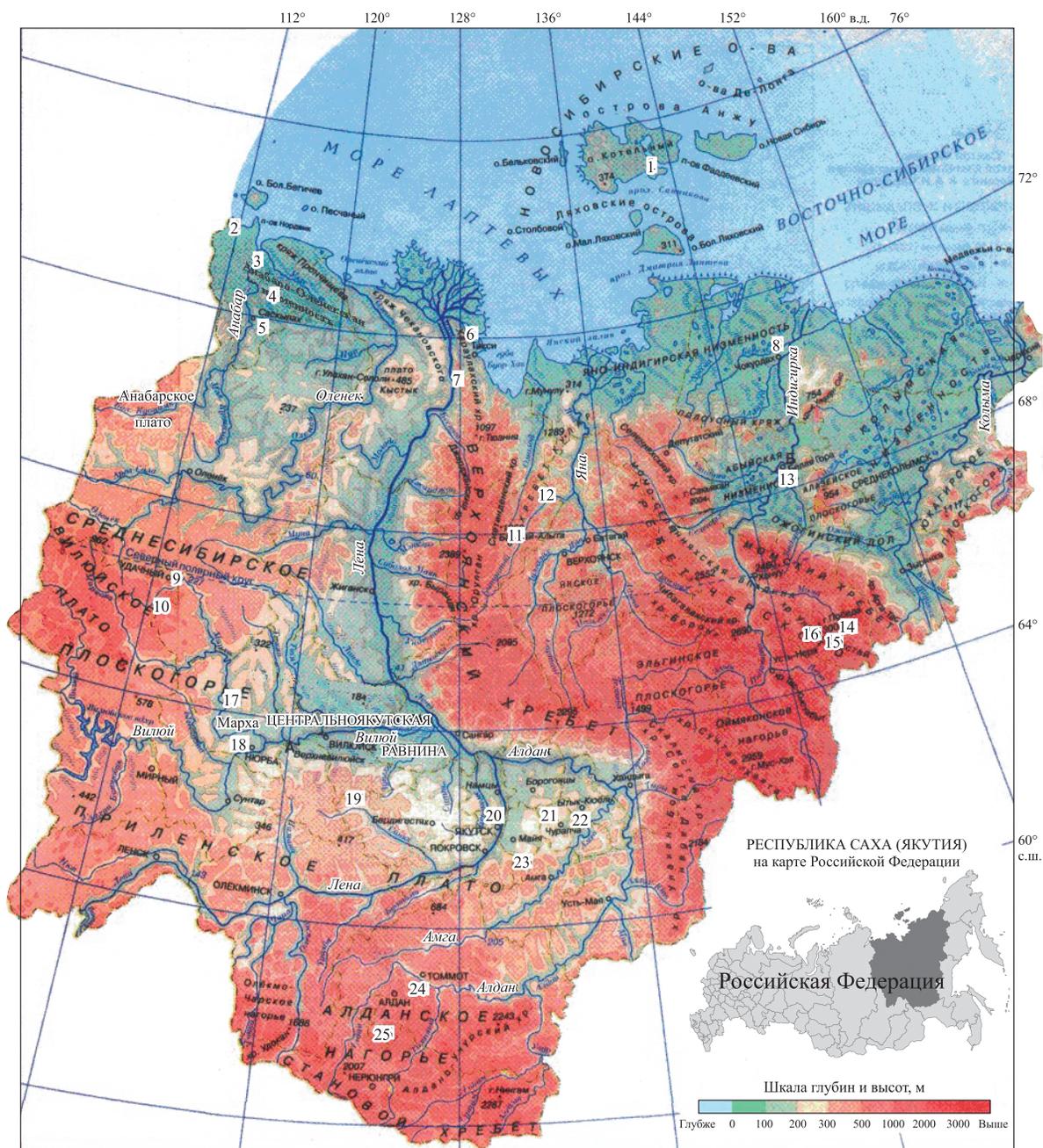


Рис. 1. Физико-географическая карта территории Якутии м-ба 1:7 500 000 [9].

Районы исследования: 1 — о. Земля Бунге, 2–5 — Анабаро-Оленёкская низменность, 6, 7 — устье р. Лены, 8 — Яно-Инди́гирская низменность, 9, 10 — Вилюйское плато, 11, 12 — Бытантайское холмогорье, 13 — Абы́йская низменность, 14 — Момская впадина, 15 — хр. Улахан-Чистай, 16 — высокогорная равнина Улахан-Чистай, 17–23 — Центрально-Якутская равнина, 24, 25 — Алданское нагорье.

запаса [15]. В настоящее время обнаруженные уровни глобальных выпадений ^{137}Cs в мерзлотных почвах Якутии в целом на один-три порядка ниже, чем в почвах районов Российской Федерации, пострадавших от аварии на Чернобыльской атомной станции (Брянская, Калужская, Тульская и Орловская области) [16–18].

Средняя плотность загрязнения почв ^{137}Cs на обследованных водораздельных участках Анабаро-Оленёкской низменности составляет 526 Бк/м^2 , в устье р. Лены — 617, на территории Яно-Инди́гирской низменности — 490, Вилюйского плато — 865, Центрально-Якутской равнины — 718 Бк/м^2 .

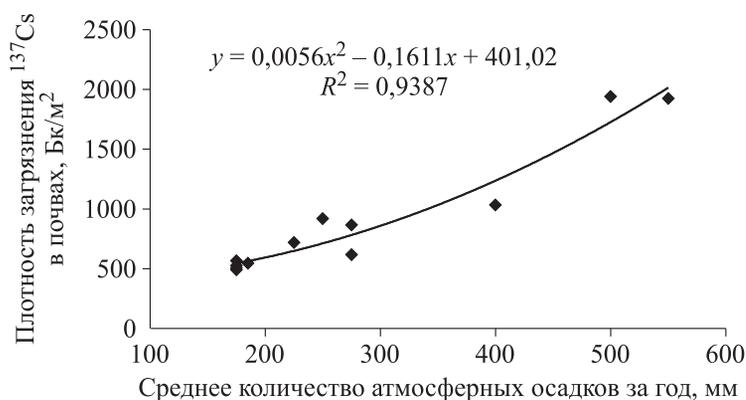
Плотность загрязнения ^{137}Cs в мерзлотных почвах на территории Якутии

Номер района исследования (см. рис. 1)	Ландшафты (почвы)	<i>n</i>	Высота над ур. моря, м	Количество осадков, мм	Содержание ^{137}Cs , Бк/м ²
1	Арктическая тундра (тундровая глеевая)	8	5–80	150–200	500 380–680
2–5	Субарктическая тундра (тундровые глеевые, подбуры, болотные)	42	10–150	150–200	526 377–745
6, 7	Субарктическая тундра (тундровые глеевые, подбуры, болотные)	74	5–100	250–300	617 522–682
8	Субарктическая тундра (тундровые глеевые, подбуры, болотные)	104	10–100	150–200	490 366–587
9, 10	Северная тайга (дерново-карбонатные, болотные)	144	300–500	250–300	865 797–1090
11, 12	Северная тайга (северотаежные, болотные)	38	400–700	150–200	566 484–648
13	Северная тайга (северотаежные, болотные)	18	100–200	120–250	546 477–645
14	Северная тайга (подбуры, подзолистые, болотные)	32	600–900	200–300	918 807–982
15	Горная тундра (подбуры тундровые, болотные)	21	1600–2600	400–600	1939 1442–2362
16	Тундра (горно-тундровые глеевые, болотные)	34	1200–1600	350–450	1033 804–1262
17–23	Средняя тайга (палевые, мерзлотно-таежные, аласные)	292	120–300	150–300	718 484–1120
24, 25	Средняя и верхняя тайга (подбуры, подзолистые, болотные)	288	700–1200	500–600	1924 1456–2465

Примечание. *n* — количество отобранных образцов. В числителе — среднее количество, в знаменателе — пределы изменения содержаний.

Если сравнить эти результаты с данными аэрогамма-спектрометрических съемок 1968–1974 гг. на территории Якутской АССР [2], то в настоящее время количество ^{137}Cs в почвах Якутии снизилось в три-четыре раза за счет его радиоактивного распада, заглупления, выноса с поверхностными водами и аккумуляции растительностью. При этом наибольшее количество ^{137}Cs содержится в почвах горных районов (Алданское нагорье и хр. Улахан-Чистай), находящихся в зоне с максимальным среднегодовым количеством осадков, а наименьшее — в почвах тундровой зоны. Корреляционный анализ выявил статистически достоверную положительную связь ($r = 0,94$, $P = 0,95$) между средним количеством осадков и средней плотностью загрязненности почв ^{137}Cs . Выявленная зависимость хорошо аппроксимируется полиномиальной функцией второй степени (рис. 2). В целом в обследованных районах равнинной и горной частей Якутии уровень глобальных выпадений ^{137}Cs в почвах в среднем в два-четыре раза меньше, чем в почвах Урала, Западной и Южной Сибири и других территорий России и зарубежья [4, 19–25].

Рис. 2. Зависимость плотности загрязнения ^{137}Cs в почвах автоморфных ландшафтов Якутии от среднего количества атмосферных осадков за год.



Распределение ^{137}Cs в почвах тундрового ландшафта Яно-Индигорской низменности

Форма мезорельефа	Почва	Горизонт, глубина, см	Содержание		
			Бк/кг	Бк/м ²	%
Геохимически сопряженные участки					
Вершина увала	Тундровая перегнойно-глеевая	Наземная масса	34,2 ± 1,6	58 ± 8	11,5
		Ао, 0–1	68,0 ± 3,2	88 ± 7	17,5
		АоА, 1–2	31,1 ± 2,5	220 ± 15	43,8
		АоА, 2–4	6,2 ± 1,4	68 ± 9	13,5
		В, 4–6	2,8 ± 0,8	69 ± 6	13,7
		В, 6–9	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 503 ± 45	Σ 100	
Склон увала	Тундровая перегнойно-глеевая	Наземная масса	23,2 ± 2,8	21 ± 4	5,8
		Ао, 0–3	102,0 ± 11,2	143 ± 14	39,1
		АоА, 4–6	21,6 ± 3,1	170 ± 18	46,4
		АВ, 6–9	2,1 ± 0,8	32 ± 6	8,7
		В, 9–12	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 366 ± 42	Σ 100	
Пойма	Торфянисто-болотная	Адг, 0–4	44,1 ± 3,2	141 ± 17	13,6
		Т ₁ , 4–7	22,0 ± 4,4	246 ± 21	23,6
		Т ₁ , 7–14	11,7 ± 3,1	281 ± 24	27
		В, 14–21	7,3 ± 2,2	372 ± 28	35,8
		В, 21–25	Н. о.	Н. о.	–
					Σ 1040 ± 85
Мерзлотный микрорельеф					
Полигон (пятно)	Тундровая глееватая	АВ, 0–2	6,7 ± 1,0	153 ± 32	Σ 100
		В, 2–4	Н. о.	Н. о.	–
		В, 4–6	Н. о.	Н. о.	–
		В, 6–8	Н. о.	Н. о.	–
Западина	Тундровая перегнойно-торфянисто-глеевая	Наземная масса	36,5 ± 4,2	102 ± 12	17,4
		Ао, 0–1	93,3 ± 3,8	183 ± 15	31,2
		АоАг, 1–3	17,2 ± 2,1	134 ± 16	22,8
		АоАг, 3–7	3,6 ± 0,8	59 ± 8	10
		В, 7–12	3,2 ± 0,7	109 ± 11	18,6
		С, 12–15	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 587 ± 65	Σ 100	
Полигон (задерненный)	Тундровая перегнойно-глеевая	Наземная масса	6,4 ± 2,1	102 ± 9	20,5
		Ао, 0–1	88,1 ± 3,1	114 ± 13	22,9
		АоА, 1–2	22,4 ± 2,7	159 ± 14	32
		АоА, 2–4	3,5 ± 0,9	38 ± 5	7,7
		В, 4–7	2,3 ± 0,5	84 ± 7	16,9
		В, 7–9	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 497 ± 32	Σ 100	
Трещина	Тундровая перегнойно-торфянисто-глеевая	Наземная масса	18,7 ± 2,2	19 ± 8	2,8
		Ао, 0–1	34,0 ± 3,8	51 ± 11	7,6
		АоАг, 1–4	99,0 ± 4,2	267 ± 26	39,5
		АоАг, 4–7	22,6 ± 1,8	149 ± 14	22,1
		В, 7–11	3,3 ± 1,0	38 ± 7	5,6
		С, 11–16	3,3 ± 0,8	151 ± 23	22,4
		С, 16–20	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 675 ± 56	Σ 100	

Примечание. Здесь и в табл. 3: Н. о. — не обнаружено; прочерк — нет данных.

Первый ключевой участок, расположенный в субарктической тундре на территории Яно-Инди-гирской низменности, имеет плоскохолмистый рельеф с крутизной склонов холмов 2–5°. Распределение ^{137}Cs в почвах изучалось на геохимически сопряженных по стоку элементарных участках (вершина увала, его склон и пойма ручья) и участках мерзлотного микрорельефа тундрового ландшафта. Длина геохимического профиля по увалу составляла 400–500 м, а по мерзлотному микрорельефу — 3 м. Вертикальное распределение ^{137}Cs во всех обследованных почвах сопряженных по стоку элементарных участков указывает на то, что максимальная удельная активность данного радионуклида приурочена к верхним аккумулятивным горизонтам (табл. 2). Глубина миграции увеличивается в сопряженных по стоку участках ландшафта от вершины склона к пойме. В тундровой перегнойно-глеевой почве водораздела и склона основное количество ^{137}Cs аккумулируется в верхней перегнойно-гумусовой части профиля (до 85,5 % от общего запаса). В торфянисто-болотной почве поймы радионуклид мигрирует в более глубокие слои, максимум запаса ^{137}Cs обнаруживается здесь на глубине 14–21 см, а в верхней части торфянистого горизонта удерживается всего 13,6 % от общего запаса радионуклида в почвенном профиле.

Наблюдаемые различия в характере вертикального распределения ^{137}Cs в двух исследованных почвах определяются избыточной увлажненностью аккумулятивного ландшафта по сравнению с вышележащими. Запас ^{137}Cs в почвах элювиально-транзитного ландшафта (вершина и склон увала) в 2,6 раза меньше, чем в почве аккумулятивного ландшафта (пойма). Растительный мохово-лишайниковый покров обследованных участков содержит от 5,8 до 11,5 % запаса ^{137}Cs , что значительно выше, чем в лесной и луговой растительности средних широт России. Повышенное накопление ^{137}Cs мхами и лишайниками по сравнению с высшими растениями отмечалось также ранее [4, 23, 26–28]. Сходный характер распределения ^{137}Cs наблюдается и в почвах мерзлотного микрорельефа (см. табл. 2). Так, в профилях почв западин и трещин радионуклид мигрирует на большую глубину, а его запас выше по сравнению с почвами полигонов. Это обусловлено высокой застойной влажностью данных почв, а также дополнительным поступлением радионуклида с водами, стекающими с поверхности полигонов после дождя и схода снежного покрова.

Следует отметить, что в начале сентября 2003 г., в период максимальной оттайки деятельного слоя тундровой зоны, в почвах трещин мерзлота залежала на глубине всего 20 см от поверхности. Это означало, что в почвах трещин ^{137}Cs мигрировал до горизонта многолетней мерзлоты. Интересные данные были получены при сравнении распределения ^{137}Cs по профилям перегнойно-торфянисто-глеевой почвы Яно-Инди-гирской тундры и торфяно-глеевой почвы тундры морской террасы, сформированной в низовьях р. Печоры (рис. 3). Оказалось, что в почве, развитой на вершине водораздельного пространства тундры, ^{137}Cs обнаруживается на глубине только до 16 см, а в почве Печорской морской террасы — до 80 см [29]. Обе почвы формируются на суглинистых отложениях элювиального ландшафта, где в нижней части профиля залегают многолетнемерзлые породы. Наблюдаемые различия в вертикальной миграции радионуклида связаны с разной увлажненностью данных территорий, так как в тундре устья р. Печоры выпадает примерно в 1,5–2 раза больше атмосферных осадков, чем в тундре Яно-Инди-гирской низменности [13, 30].

На втором ключевом участке, находящемся в северной тайге (Вилуйское плато) и охватывающем водораздел и пойму ручья Сытыкан (правый приток р. Далдын), запас ^{137}Cs в почвах варьирует от 88 до 1188 Бк/м² (табл. 3). Можно заметить небольшое увеличение запаса ^{137}Cs в аллювиальной почве высокой поймы ручья по сравнению с таковым в почвах водораздела и низкой поймы. Анализ вертикального распределения ^{137}Cs в почвенных профилях показывает, что в дерновом горизонте и лесной подстилке дерново-карбонатной типичной почвы водораздела обнаруживается от 7 до

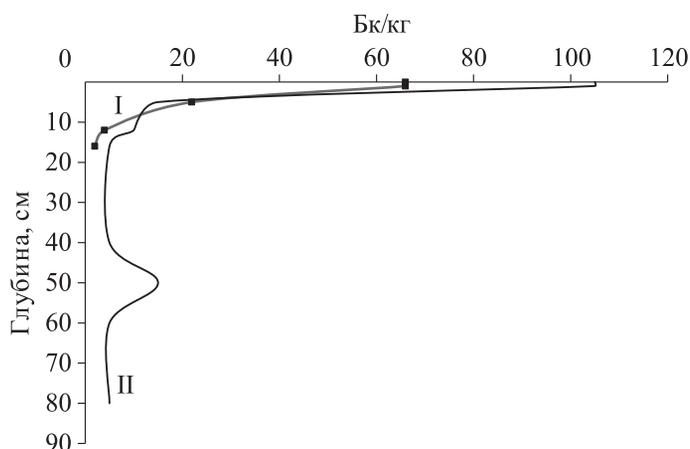


Рис. 3. Распределение ^{137}Cs по профилю тундровых почв.

Почвы: I — перегнойно-торфянисто-глеевая (Яно-Инди-гирская низменность), II — торфяно-глеевая (устье р. Печоры).

Распределение ^{137}Cs в почвах геохимически сопряженных участков ландшафтов разных природно-климатических зон Якутии

Место отбора проб	Почва	Горизонт, глубина, см	Содержание		
			Бк/кг	Бк/м ²	%
1	2	3	4	5	6
Северотаежный ландшафт Вилюйского плато					
Вершина водораздела	Дерново-карбонатная типичная	Ad, 0–2	84,4 ± 8,0	126 ± 10	13,4
		A, 2–4	128,9 ± 23,1	399 ± 23	42,6
		AB, 4–6	58,3 ± 4,0	326 ± 18	34,8
		B, 6–12	3,4 ± 1,0	86 ± 5	9,2
		BC, 12–17	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 937 ± 76	Σ 100	
Склон водораздела	Дерново-карбонатная типичная	Ao, 0–2	53,4 ± 5,4	48 ± 5	7
		Ao, 2–4	123,3 ± 13,2	246 ± 21	35,9
		A, 4–6	47,4 ± 4,0	209 ± 19	30,5
		AB, 6–8	15,5 ± 3,9	116 ± 12	17
		BC, 8–10	2,6 ± 0,7	66 ± 5	9,6
		BC, 10–15	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 685 ± 45	Σ 100	
Высокая пойма	Аллювиальная	Ad, 0–2	9,6 ± 2,8	51 ± 4	4,3
		AB, 2–4	6,8 ± 1,6	166 ± 14	14
		BC, 4–6	6,5 ± 1,7	349 ± 26	29,4
		BC, 6–12	6,0 ± 1,4	271 ± 21	22,8
		BC, 12–15	7,4 ± 2,1	351 ± 32	29,5
		BC, 15–26	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 1188 ± 102	Σ 100	
Низкая пойма	Аллювиальная	Ad, 0–2	1,5 ± 0,8	37 ± 3	42
		B, 2–6	2,1 ± 0,7	51 ± 4	58
		BC, 6–8	Н. о.	Н. о.	–
		BC, 8–12	Н. о.	Н. о.	–
		BC, 12–14	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 88 ± 23	Σ 100	
Долинно-пойменный ландшафт р. Амги (Центрально-Якутская равнина)					
Надпойменная терраса	Лугово-черноземная	Ad, 0–1	60,0 ± 2,0	401 ± 13	47
		A, 1–2	29,5 ± 1,5	389 ± 20	45,7
		A, 2–3	3,1 ± 0,5	62 ± 10	7,3
		A, 3–4	Н. о.	Н. о.	–
		A, 4–6	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 852 ± 16	Σ 100	
Высокая пойма	Аллювиальная	Ad, 0–2	11,1 ± 1,1	209 ± 15	13,8
		BC, 2–4	15,8 ± 0,8	362 ± 14	23,9
		BC, 4–6	14,6 ± 0,6	327 ± 5	21,6
		BC, 6–8	5,4 ± 0,5	117 ± 8	7,8
		C, 8–10	6,8 ± 0,4	144 ± 2	9,5
		C, 10–12	5,7 ± 0,3	125 ± 6	8,4
		C, 12–14	10,2 ± 1,2	227 ± 10	15
		C, 14–16	Н. о.	Н. о.	–
		C, 16–20	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 1511 ± 90	Σ 100	
Низкая пойма	Аллювиальная	Ad, 0–1	3,8 ± 0,8	52 ± 3	35,4
		Ad, 1–2	3,7 ± 0,6	47 ± 4	32
		BC, 2–3	2,8 ± 0,7	48 ± 2	32,6
		BC, 3–4	Н. о.	Н. о.	–
		C, 4–5	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 147 ± 15	Σ 100	

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
Таяжно-аласный ландшафт Центрально-Якутской равнины					
Водораздел	Палевая	Ао, 0–2 АоА, 2–3 А, 3–4 А, 4–5 АВ, 5–10 ВС, 10–12	31,0 ± 11,8 54,2 ± 11,3 16,8 ± 3,5 6,7 ± 1,2 2,1 ± 0,7 Н. о.	27 ± 2,3 65 ± 11,2 255 ± 48 40 ± 12 84 ± 29 Н. о. Σ 471 ± 113	5,7 13,8 54,2 8,5 17,8 – Σ 100
Аласная котловина					
Луг	Дерново-луговая	Ad, 0–1 А, 1–2 А, 2–3 А, 3–4	62,0 ± 3,2 68,4 ± 7,4 15,2 ± 7,2 Н. о.	198 ± 7 506 ± 17 109 ± 8 Н. о. Σ 813 ± 33	24,4 62,2 13,4 – Σ 100
Высыхающее озеро					
берег 1	Торфянисто-сапропелево-глеевая	Ad, 0–5 At, 5–8 At, 8–10 At, 10–12	16,5 ± 0,5 4,5 ± 0,4 3,1 ± 0,1 Н. о.	597 ± 14 84 ± 10 56 ± 6 Н. о. Σ 737 ± 30	81 11,4 7,6 – Σ 100
берег 2	Торфянисто-сапропелево-глеевая	At, 0–2 At, 2–5 At, 5–8 At, 8–10 At, 10–12 LD, 12–14 LD, 14–18	6,0 ± 0,2 10,0 ± 0,3 8,4 ± 0,6 2,5 ± 0,2 10,5 ± 0,5 6,3 ± 0,4 Н. о.	57 ± 2 211 ± 3 121 ± 5 61 ± 2 139 ± 3 81 ± 3 Н. о. Σ 670 ± 28	8,5 31,5 18,1 9,1 20,7 12,1 – Σ 100
дно	Сапропель	0–5 5–10 10–15 15–20	8,2 ± 0,4 8,2 ± 0,3 10,4 ± 0,5 Н. о.	194 ± 4 201 ± 11 250 ± 12 Н. о. Σ 645 ± 25	30,1 30,2 38,7 – Σ 100
Горно-таяжный ландшафт Алданского нагорья					
Верхняя тайга, вершина водораздельного склона	Подзолистая	Ао, 0–3 АоА ₁ , 3–4 А ₁ , 4–5 А ₁ А ₂ , 5–7 А ₂ В, 7–9 ВС, 9–12 ВС, 12–17 CD, 17–25	90,0 ± 2,7 307,1 ± 10,0 129,3 ± 13,4 11,7 ± 2,1 8,7 ± 1,6 6,7 ± 0,3 4,6 ± 0,2 2,5 ± 0,4	72 ± 3 338 ± 10 738 ± 78 207 ± 38 186 ± 42 210 ± 9 249 ± 4 212 ± 32 Σ 2212 ± 144	3,3 15,3 33,3 9,3 8,4 9,5 11,3 9,6 Σ 100
Средняя тайга, начало водораздельного склона	Подбур	Ао, 0–3 АоА ₁ , 3–4 А ₁ , 4–5 А ₂ В, 5–8 В, 8–11 ВС, 11–16 ВС, 16–26	162,1 ± 12,5 243 ± 14,2 183,8 ± 11,8 72,0 ± 8,7 15,2 ± 3,2 6,0 ± 0,8 3,5 ± 0,6	150 ± 10 232 ± 8 240 ± 31 558 ± 53 304 ± 32 335 ± 12 294 ± 28 Σ 2113 ± 123	7,1 11 11,4 26,4 14,4 15,8 13,9 Σ 100

1	2	3	4	5	6
Высокая пойма	Аллювиальная	А ₀ , 0–2	Н. о.	Н. о.	–
		А, 2–8	3,0 ± 0,8	93 ± 6	3,2
		В, 8–15	4,5 ± 1,0	383 ± 18	13,3
		В, 15–22	7,6 ± 1,2	564 ± 46	19,6
		ВС, 22–30	15,2 ± 2,0	1124 ± 98	39
		ВС, 30–40	9,7 ± 2,6	717 ± 68	24,9
		ВС, 40–60	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 2881 ± 152	Σ 100	
Низкая пойма	Аллювиальная	А ₀ , 0–1	Н. о.	Н. о.	–
		А, 1–3	3,7 ± 0,6	42 ± 3	2,3
		В, 3–5	7,6 ± 1,2	77 ± 6	4,1
		ВС, 5–7	8,8 ± 2,2	118 ± 10	6,3
		ВС, 7–10	8,0 ± 1,5	184 ± 21	9,8
		С, 10–15	9,6 ± 2,6	490 ± 38	26,2
		С, 15–20	18,8 ± 3,1	960 ± 78	51,3
		С, 20–25	Н. о.	Н. о.	–
			Σ 1871 ± 106	Σ 100	

13,4 % от его общего количества в профиле. В этой почве значительное количество ^{137}Cs аккумулируется в перегнойно-гумусовой части профиля (42–66 % от общего запаса радионуклида). В аллювиальной почве высокой поймы ручья ^{137}Cs распределяется по глубине более равномерно. Этому способствует, с одной стороны, поступление его в почву из сопряженного по стоку водораздельного склона, а с другой — периодическое осаждение из паводковых вод на поверхность почвы взвешенного твердого материала, содержащего радионуклид. В низкой пойме, где почва постоянно промывается водой ручья даже при незначительных подъемах уровня воды, небольшое содержание ^{137}Cs обнаруживается только в верхней части почвенного профиля. Причем по сравнению с почвой высокой поймы его концентрации в данной почве малы и близки к концентрациям в песчано-илистых донных отложениях (0,8–2,0 Бк/кг).

На третьем ключевом участке, в нижнем течении р. Амги (средняя тайга), была исследована миграция ^{137}Cs в почвах в двух геохимических профилях (длина 150–200 м), заложенных в пойменно-долинном и аласном ландшафте на водоразделе реки. Охватывая низкую и высокую пойму реки, первый геохимический профиль выходил на ее первую надпойменную террасу, сложенную аллювиальными суглинистыми отложениями. Здесь под травянистой растительностью развиваются лугово-черноземные и дерново-луговые почвы, которые при переходе к пойме сменяются аллювиальными почвами. В пойменно-долинном ландшафте р. Амги запас ^{137}Cs в почвах варьирует от 147 до 1511 Бк/м² (см. табл. 3). При этом минимальное количество ^{137}Cs фиксируется в аллювиальной почве низкой поймы, которую постоянно промывает речная вода, уносящая радиоцезий во время затоплений. Обнаруживаемые в верхней части почвы невысокие концентрации ^{137}Cs по уровню близки к его концентрации в свежих песчано-илистых речных наносах (0,5–3,0 Бк/кг), отложенных после половодья. Из табл. 3 видно, что в исследованном геохимическом профиле наибольшее количество ^{137}Cs в расчете на квадратный метр содержится в 14-сантиметровом слое почвы высокой поймы, затапливаемой только во время весенних высоких паводков. В этот период ^{137}Cs в составе взвешенного твердого речного материала поступает на поверхность почвы. Кроме того, в аллювиальную почву высокой поймы ^{137}Cs дополнительно поступает из почвы надпойменной террасы. На не испытывающем затопления суходольном участке надпойменной террасы ^{137}Cs концентрируется целиком в 3-сантиметровом слое дернины и гумусового горизонта почвы, что указывает на его слабую вертикальную миграцию в условиях дефицита влаги. Такое же распределение ^{137}Cs обнаруживается в дерново-луговых почвах, формирующихся рядом на надпойменной террасе реки, и в черноземах долины р. Лены.

Интересно сравнить полученное распределение ^{137}Cs в этих почвах и в таких же почвах из других районов немерзлотных регионов с более влажными климатическими условиями. Обнаружено, что в почвенном профиле чернозема Алтайского края ^{137}Cs мигрирует на глубину до 12 см, при этом наибольшее его концентрации обнаруживаются в пределах верхнего 6-сантиметрового слоя (рис. 4) [19]. В этом регионе за год выпадает примерно 300–350 мм атмосферных осадков [31], тогда как в крио-

Рис. 4. Распределение ^{137}Cs по профилю чернозема.

I — Алтайский край; II — Республика Саха (Якутия).

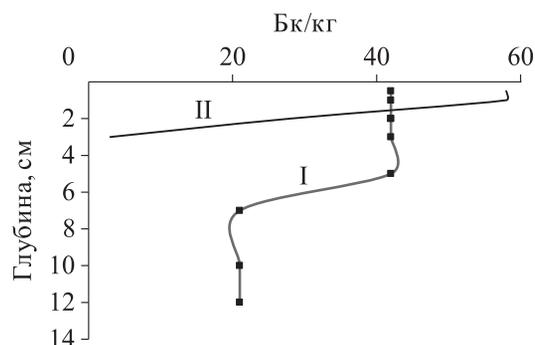
аридных условиях пойм рек Центральной Якутии их количество не превышает 180–220 мм/год. Соответственно, здесь при дефиците влаги в черноземах, лугово-черноземных и дерново-луговых почвах вертикальная миграция ^{137}Cs в профиле замедлена, в результате чего он обнаруживается только в верхнем 3-сантиметровом слое (см. рис. 4).

Во втором геохимическом сопряжении: водораздел — алас (термокарстовая котловина) — запасы ^{137}Cs варьируют от 471 до 813 Бк/м² (см. табл. 3). Отмечается значительное концентрирование радионуклида в почвах и сапропеле замкнутой аласной котловины. В этой аккумулятивной части ландшафта запас ^{137}Cs в почвах в среднем в 1,5 раза больше, чем в почвах водораздела. Максимальная аккумуляция радионуклида в аласной котловине наблюдается в ее периферической части, т. е. у подножия бортового склона аласа — на лугу и на берегу озера. Это указывает на наличие выраженного геохимического барьера в периферической части аккумулятивного ландшафта, как это отмечают и другие авторы [32]. Вертикальное распределение ^{137}Cs в исследованном геохимическом сопряжении в почвах разное. На водоразделе наибольшее количество ^{137}Cs в палеовой почве находится в гумусовом горизонте (54,2 % от его общего запаса) на глубине 3–4 см. На лугу аласа все количество ^{137}Cs сконцентрировано в 3-сантиметровом слое дернины и верхней части гумусового горизонта почвы, а на берегу озера — в 10-сантиметровом слое. В то же время на дне высыхающего озера аласа ^{137}Cs в профиле почвы и сапропеля распределяется более равномерно и обнаруживается в более глубоких слоях, что связано с их высокой влажностью и интенсивной его вертикальной миграцией.

Отметим, что в регионах России, пострадавших от аварии на Чернобыльской атомной электростанции, вертикальная и латеральная миграция ^{137}Cs в почвах в силу благоприятных природно-климатических условий (значительная продолжительность безморозного периода, слабое сезонное охлаждение и неглубокое промерзание почв) происходит гораздо интенсивнее, чем в Якутии. Так, на загрязненной территории в черноземных почвах лесостепи спустя 20 лет после аварии основная масса ^{137}Cs (70–74 %) была сконцентрирована в 10-сантиметровом слое. При этом запасы ^{137}Cs в почве днища балки с бессточным стоком в четыре раза превышают запасы ^{137}Cs в почвах целинных водораздельных участков [16].

Четвертый ключевой участок находился в южной части Якутии, на Алданском нагорье. Геохимический профиль длиной около 1 км начинался с верхней части крутого водораздельного склона (45°), включающего нижнюю часть, и выходил в пойму р. Курунг. В обследованных сопряженных элементарных участках горно-таежного ландшафта запасы ^{137}Cs в почвах изменяются от 1871 до 2881 Бк/м² (см. табл. 3). В подбурях и подзолистых почвах водораздельного пространства концентрация ^{137}Cs уменьшается вниз по профилю и прослеживается до глубины 20–26 см. При этом в перегнойно-гумусово-аккумулятивном горизонте фиксируется 22–57 % радиоцезия от его общего запаса, в лесной подстилке — 3–7 %.

В аллювиальной почве низкой и высокой поймы вертикальное распределение ^{137}Cs имеет более сложный характер. Наименьшая его концентрация обнаруживается в гумусовом горизонте почвы, далее распределение в профиле более или менее равномерное, и на глубине 15–20 и 22–30 см фиксируется резкое увеличение концентраций данного радионуклида. Такое распределение в большей степени связано с аллювиальным процессом, происходящим в пойме реки, т. е. с паводковым перетолжением заиленных наносов, обогащенных в разной степени ^{137}Cs . В пробах песчано-илистых донных отложений, отобранных вверх и вниз по течению р. Курунг от мест заложения почвенных разрезов в пойме, концентрация ^{137}Cs изменяется от 1 до 23 Бк/кг воздушно-сухой массы. Такой разброс концентраций радионуклида в донных отложениях связан с активными эрозионными процессами в горных условиях. На участках с относительно слабо развитыми эрозионными процессами, на водосборах равнинных рек концентрация ^{137}Cs в донных отложениях изменяется в более узком диапазоне. На обследованном геохимическом сопряжении наибольший запас ^{137}Cs обнаруживается в аллювиальной почве высокой поймы. Это обусловлено как паводковым отложением речных наносов, содержащих ^{137}Cs , так и дополнительным поступлением данного радионуклида из выше расположенных сопряженных участков ландшафта.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные уровни глобальных выпадений ^{137}Cs в мерзлотных почвах элювиальных ландшафтов тундровой и таежной зон Якутии варьируют в пределах 0,4–2,5 кБк/м², что в среднем в два-четыре раза меньше, чем в почвах Урала, Западной и Южной Сибири. Выявлена корреляция между плотностью загрязнения ^{137}Cs почв и количеством атмосферных осадков. Относительно высокие уровни загрязнения почв ^{137}Cs обнаруживаются в аккумулятивных формах рельефа. В почвах элювиальных участков ландшафтов ^{137}Cs концентрируется в органогенно-аккумулятивной части, с глубиной его содержание резко снижается. При этом глубина проникновения ^{137}Cs в почвах этих ландшафтов в зависимости от их водного режима и гранулометрического состава изменяется от n до $n \cdot 10$ см. В профилях почв гидроморфных ландшафтов ^{137}Cs распределяется более равномерно. Глобальные выпадения ^{137}Cs в почвенном покрове водосборных бассейнов Якутии в целом характеризуются слабой его вертикальной и латеральной миграцией.

Работа выполнена в рамках государственного задания Якутского научного центра СО РАН — Института биологических проблем криолитозоны СО РАН на 2019–2021 гг. (0376–2019–0003; рег. номер АААА–А17–117020220053–0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Б., Красилов Г.А., Логачев В.А., Матушенко А.М., Сафронов В.Г. Северный полигон Новая Земля: радиоэкологические последствия ядерных испытаний. — М.: Изд-во Гос. ин-та прикладной экологии, 1997. — 68 с.
2. Болтнева Л.И., Израэль Ю.А., Ионов В.А., Назаров И.М. Глобальное загрязнение ^{137}Cs и ^{90}Sr и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. — 1977. — Т. 42, вып. 5. — С. 355–358.
3. Павлов А.Г. Миграция цезия-137 и стронция-90 в кормовой цепи северного оленя в условиях Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М.: Изд-во Моск. гос. акад. ветеринарной медицины и биотехнологии, 2000. — 16 с.
4. Сухоруков Ф.В., Щербаков Б.Л., Страховенко Б.С., Смоляков Б.С., Кириллина В.И., Прокопьева Ю.Н. Экологическая обстановка (радионуклиды, тяжелые металлы) на территории Нюрбинского и Усть-Алданского улусов Республики Саха (Якутия). — Якутск: Изд-во Мин-ва образования Республики Саха (Якутия), 2001. — 155 с.
5. Степанов В.Е., Десяткин Р.В., Яковлева В.Д. О распределении цезия-137 в почвенно-растительном покрове таежно-алаского ландшафта Якутии на примере местности «Ынах аласа» // Сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф. — Пенза: Изд-во МНИЦ ПГСХА, 2002. — С. 216–218.
6. Черняго Б.П., Бычинский В.Г., Калиновский Г.И. Глобальный цезий-137: от Байкала до Северного Ледовитого океана // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. — Томск: Тандем-Арт, 2004. — С. 647–649.
7. Собакин П.И., Чевычелов А.П., Ушницкий В.Е. Радиоэкологическая обстановка на территории Якутии // Радиационная биология. Радиобиология. — 2004. — Т. 44, № 3. — С. 283–288.
8. Собакин П.И. Миграция ^{137}Cs в мерзлотных почвах // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2010. — Т. 50, № 5. — С. 590–598.
9. Максимов Г.Н. Родная Якутия: природа, люди, природопользование. — Якутск: Бичик, 2003. — 168 с.
10. Коржуев С.С. Рельеф и геологическое строение // Якутия (природные условия и естественные ресурсы СССР). — М.: Наука, 1965. — С. 29–114.
11. Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончарова В.Ф., Гриненко О.В., Лазарев П.А. Геоморфология Восточной Якутии. — Якутск: Якут. кн. изд-во, 1967. — 376 с.
12. Климат Якутской АССР (Атлас) // Якутская гидрометеорологическая обсерватория. — Л.: Гидрометеоздат, 1968. — 32 с.
13. Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В. Почвы северной Якутии. — Новосибирск: Наука, 1979. — 303 с.
14. Якубович А.Л., Зайцев Е.И., Пржиялковский С.М. Ядерно-физические методы анализа горных пород. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 264 с.
15. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А., Петров В.Н., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 296 с.
16. Кузнецов В.К., Калашников К.Г., Грунская В.П., Санжарова Н.И. Горизонтальная и вертикальная миграция ^{137}Cs в склоновых ландшафтах // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2009. — Т. 49, № 3. — С. 282–290.
17. Изменение природной среды России в XX веке / Ред. В.М. Котляков, Д.И. Люри. — М.: Молнет, 2012. — 404 с.

18. Ашитко А.Г., Золочевский Д.В., Овсянникова Л.В., Рожкова С.А. Радиационная обстановка на территории Калужской области 30 лет спустя после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. — 2016. — Т. 9, № 2. — С. 40–47.
19. Кузнецова М.И. Радиационно-экологическая ситуация в Горном Алтае: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алт. ун-та, 2004. — 22 с.
20. Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Трапезников В.Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — Т. 1. — 479 с.
21. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н. Сравнительный анализ распределения естественных и искусственных радионуклидов в озерных экосистемах различных регионов Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. — Томск: STT, 2009. — С. 556–561.
22. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Нифонтова М.Г. Радионуклиды глобальных выпадений в растениях лесных экосистем Уральского региона // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. — Семей: Изд-во Семипалат. пед. ин-та, 2012. — Т. 1. — С. 219–226.
23. Karadeniz Ö., Yaprak G. Geographical and vertical distribution of radiocesium levels in coniferous forest soils in Izmir // Journ. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2008. — Vol. 277, N 3. — P. 567–577.
24. Kruse-Irmer S., Giani L. Vertical distribution and bioavailability of ¹³⁷Cs in organic and mineral soils // Journ. of Plant Nutrition and Soil Science. — 2003. — Vol. 166, N 5. — P. 635–641.
25. Buraeva E.A., Stasov V.V., Nefedov V.S., Martynenko S.V., Bezuglova O.S., Goncharova L., Gorbov S.N., Vardun T.V., Dergacheva E.V., Malyshevsky V.S., Goncharenko A.A. Features of ¹³⁷Cs distribution and dynamics in the main soils of steppe zone in the Southern European Russia // Geoderma. — 2015. — Vol. 259–260. — P. 259–270.
26. Собакин П.И., Чевычелов А.П., Молчанова И.В. Миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове на территории подземного ядерного взрыва в Республике Саха (Якутия) // Дефектоскопия. — 2004. — № 9. — С. 85–91.
27. Собакин П.И., Герасимов Я.Р., Чевычелов А.П., Перк А.А., Горяченкова Т.А., Новиков А.П. Радиоэкологическая обстановка в зоне воздействия аварийного подземного ядерного взрыва «Кратон-3» в Республике Саха (Якутия) // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2014. — Т. 54, № 6. — С. 641–649.
28. Ramzaev V., Mishin A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski B., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review // Journ. of Environmental Radioactivity. — 2009. — Vol. 100, N 12. — P. 1092–1099.
29. Коробова Е.М., Украинцева Н.Г. Радиоцезий как техногенная метка природных процессов в тундровых ландшафтах Европейского Севера // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. — Томск: Тандем-Арт, 2004. — С. 291–294.
30. Игнатенко И.В. Почвы восточно-европейской тундры и лесотундры. — М.: Наука, 1979. — 278 с.
31. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. — 416 с.
32. Борисенко Е.Н., Самонов А.Е. Особенности миграции радионуклидов в долине р. Присмары (р-н Смоленской АЭС) // Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов: Тезисы докл. Всесоюз. конф. — М., 1989. — С. 22.

Поступила в редакцию 27.04.2016

После доработки 23.03.2017

Принята к публикации 27.12.2018