



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.42

DOI:10.19110/geov.2023.1.5

Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская тундра)

А. В. Пучков, Е. Ю. Яковлев

ФИЦ комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лавёрова УрО РАН, Архангельск
andrey.puchkov@fciarctic.ru; evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

В данной статье представлены результаты исследований латерального и вертикального распределения техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в торфах и почвах тундровой территории Ненецкого автономного округа на примере бассейна реки Несь (Канинская тундра). Отмечаются повышенные уровни плотности загрязнения Cs-137 и Sr-90 территории изучаемого бассейна по сравнению с литературными данными. Такие аномалии связаны с мозаичным характером латерального распределения радионуклидов, обусловленным геоморфологическими особенностями территории. Результаты расчета изотопных отношений двух радионуклидов показали, что основным источником загрязнения могут быть глобальные атмосферные выпадения.

Ключевые слова: Арктика, техногенная радиоактивность, Cs-137, Sr-90, миграция, геоморфология.

Features of accumulation and migration of technogenic radionuclides Cs-137 and Sr-90 in the tundra landscapes of the Russian Arctic (evidence from the Nes river basin, Kanin tundra)

A. V. Puchkov, E. Yu. Yakovlev

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the UB RAS

This article presents the results of studies of the lateral and vertical distribution of technogenic radionuclides Cs-137 and Sr-90 in peat and soils of the tundra territory of the Nenets Autonomous Okrug on the example of the Nes River basin (Kanin tundra). There are high levels of pollution density of Cs-137 and Sr-90 in the territory of the studied basin in comparison with the literature data. Such anomalies are associated with the mosaic nature of the lateral distribution of radionuclides, due to the geomorphological features of the territory. The results of calculating the isotopic ratios of two radionuclides showed that the main source of pollution can be global atmospheric fallout.

Keywords: Arctic, technogenic radioactivity, Cs-137, Sr-90, migration, geomorphology.

Арктические территории Российской Федерации, к которым относятся и северо-западные тундровые регионы, с начала 1950-х годов подверглись техногенному радиоактивному загрязнению. Основными его источниками стали выпадения после проведения ядерных испытаний, в том числе на архипелаге Новая Земля, загрязнения от западноевропейских радиохимических заводов, последствия ядерных катастроф (аварии на Чернобыльской и Фукусимской АЭС) (Łokas, 2013; Matishov, 2014).

Не менее значимое дополнение в техногенное радиоактивное загрязнение могут вносить отрасль атомного судостроения и судоремонта в Северодвинске, Мурманске, Снежногорске и т. д., базы надводных и подводных кораблей с транспортными ядерно-энергетическими установками Северного флота ВМФ России,

а также деятельность по обращению с радиоактивными отходами (Il'in, 2017).

Отдельные объекты «ядерного наследия» до сих пор являются радиационно-опасными с точки зрения содержания техногенных радионуклидов. К таким объектам относятся затопленные контейнеры, конструкции и блоки с радиоактивными отходами, реакторные отсеки и атомные подводные лодки. Дополнительно к этому перечню необходимо добавить и ядерные взрывы, произведенные в мирных целях для народного хозяйства (Miki, 2017). В Северо-Западном секторе РФ «мирные» ядерные взрывы проводились в Мурманской, Архангельской областях, Республике Коми и Ненецком автономном округе. Одним из самых мощных был мирный ядерный взрыв под кодовым названием «Пирит», осуществленный в 1981 году для остановки процесса

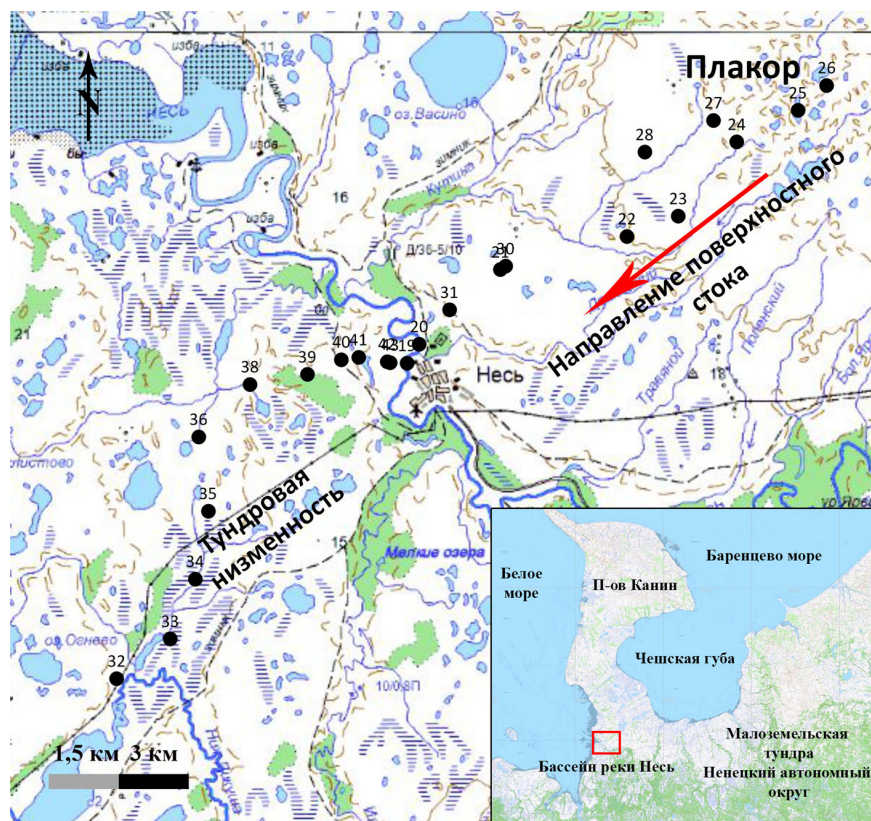
Для цитирования: Пучков А. В., Яковлев Е. Ю. Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская тундра) // Вестник геонаук. 2023. 1(337). С. 42–51. DOI: 10.19110/geov.2023.1.5

For citation: Puchkov A. V., Yakovlev E. Yu. Features of accumulation and migration of technogenic radionuclides Cs-137 and Sr-90 in the tundra landscapes of the Russian Arctic (evidence from the Nes river basin, Kanin tundra). Vestnik of Geosciences. 2023, 1(337), pp. 42–51, doi: 10.19110/geov.2023.1.5



Рис. 1. Схема профиля отбора проб почвы и торфа в бассейне реки Несь

Fig. 1. Scheme of soil and peat sampling profile in the Nes River basin



неконтролируемого фонтанирования газа из скважины К-9 Кумжинского газоконденсатного месторождения в дельте реки Печоры Ненецкого автономного округа (Богоявленский, 2017).

Такое разнообразие и значительное количество ядерно- и радиационно-опасных объектов обуславливает несомненную актуальность проведения радиэкологических исследований на территориях северо-западного сектора Русской Арктики. Среди таких территорий тундровые регионы выделяются своей слабой изученностью в связи с их труднодоступностью и суровым климатом. Ранее проведенные исследования гидробионтов в реках Канинской и Малоземельской тундр выявили наличие искусственных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в рыбе из реки Несь, тогда как в остальных реках (Северная Двина, Вижа, Ома, Пеша, Мезень, Печора) искусственной радиоактивности не было обнаружено (удельные активности радионуклидов ниже порога чувствительности радиометрической и спектрометрической аппаратуры) (Пучков, 2020).

В связи с вышеуказанным целью данной работы является установление уровней и источников радиоактивного загрязнения территории бассейна реки Несь, а также особенностей накопления и миграции радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в объектах окружающей среды.

Область и методы исследований

Исследования проводились в рамках экспедиционных работ в июне 2022 года на территории бассейна реки Несь. В общей сложности было отобрано 40 проб торфа и 6 проб почвы по профилю общей длиной около 20 км, расположенному перпендикулярно руслу реки от равнинных торфяных болот на юго-западе до локального водораздела на северо-востоке. Почва представлена оторфованным органометным горизонтом мощностью до 8 см, а также элювиальным и ил-

лювиальным горизонтами (в настоящей статье данные горизонты не разделялись по причине того, что в них содержание радионуклидов сводится к минимальным значениям вплоть до пороговых уровней). В каждой пробе были измерены следующие радиационные параметры: удельная активность и плотность загрязнения радионуклидом Cs-137, удельная активность и плотность загрязнения радионуклидом Sr-90, изотопное отношение Sr-90/Cs-137, изотопное отношение Cs-137_{горизонт 10–20 см} / Cs-137_{горизонт 0–10 см}, изотопное отношение Sr-90_{горизонт 10–20 см} / Sr-90_{горизонт 0–10 см}. Схема профиля отбора приведена на рисунке 1. Угловые координаты участка следующие: N66°30'55.9969" E44°28'13.8301", N66°40'45.7128" E44°28'53.3809", N66°40'45.7128" E44°54'08.6702", N66°31'08.8155" E44°54'13.6140".

По таксономическому почвенно-географическому районированию почвы западной части Ненецкого автономного округа относятся к Евроазиатской полярной области Канинско-Печорской провинции. Согласно атласу (Национальный..., 2011), в долине р. Несь распространены подзолы частично в комплексе с торфянисто-подзолистыми иллювиально-гумусовыми почвами. На юге района исследований встречаются глееподзолистые и торфянисто-подзолисто-глеевые почвы. Многочисленны болотные верховые торфяные в комплексе с тундровыми мерзлотными остаточноторфяными почвами. Зачастую в таких почвах органометный горизонт, состоящий из живого мохового покрова и растительных остатков разной степени разложения, маломощный. Под ним лежит минеральная оглеенная толща, в верхней части которой выделяется буровато-сизый бесструктурный горизонт, сменяемый голубовато-сизым тиксотропным глеевым горизонтом (Национальный..., 2011). Такая морфологическая структура обуславливает связывание Cs-137 в органометном слое, зачастую не превышающем 5–8 см,

и не позволяет радионуклиду мигрировать вертикально по профилю. Этот факт подтверждается и другими исследователями (Коноплев, 2016; Леухин, 2021). Так, согласно А. В. Баженову*, по степени удерживаемости Cs-137 в почвенном слое 0–10 см составлен следующий ряд: подзолистые (90–99 %) — аллювиальные луговые суглинистые (97 %) — серые лесные подзолистые (90 %) — черноземно-луговые (70–86 %), дерново-подзолистые (61–76 %), красные, солончаковые (75 %) — почвы с песчаным составом (автоморфного типа) (62 %) — пойменные почвы (30–70 %) — торфяно-болотные, торфянисто-болотные (15–22 %) — пахотные почвы (15 %).

Пробы почвы и торфа отбирались предварительной зачищенной острой лопатой на участке площадью 20 x 20 см по горизонтам 0–10 см и 10–20 см. Пробоподготовка, радиохимическая подготовка и измерения проб проводились на базе лаборатории экологической радиологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики в Архангельске. Часть измерений осуществлялось на базе радиометрической лаборатории отдела ядерной и радиационной безопасности АО «ЦС «Звездочка» в Северодвинске (лаборатория аккредитована в области проведения радиационных измерений, аттестат аккредитации RA.RU.21АД95). Отобранные пробы были высушены в сушильном шкафу BINDER E28 при температуре 105 °С. После этого пробы почвы и торфа озолялись при температуре не выше 400 °С во избежание потери радионуклидов.

Активность радионуклида Cs-137 определялась на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (США) с коаксиального детектора GEM40 из особо чистого германия (HPGe) с программным обеспечением SpectraLine (Методика..., 2022). Разрешение гамма-спектрометра по линии 1.33 МэВ (Co-60) составляло 1.75 кэВ, относительная эффективность 43 %. В качестве рабочей геометрии для измерений были выбраны пластиковые стаканы разного объема. Время измерения выбиралось в диапазоне от 2 до 5 часов в зависимости от интегральной загрузки детектора и таким образом, чтобы неопределенность площади фотопика 661 кэВ не превышала 5 %. Активность радионуклида Cs-137 определяли по гамма-линии 661.66 с квантовым выходом 89.90 %.

Активность радионуклида Sr-90 определяли по его дочернему продукту распада Y-90 (Методика..., 2013). Расчет удельной активности Sr-90 после измерения радиохимически выделенного Y-90 проводили по следующей формуле:

$$A_{Sr90} = \frac{N_s - N_b}{Eff \times M \times ChLos \times K_{abs}},$$

где A_{Sr90} — удельная активность Sr-90 в пробе,

*Баженов А. В. Цезий-137 в почвах Архангельской области: специальность 25.00.36 «геоэкология (по отраслям)»: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Архангельск, 2001. 23 с. URL: <http://fciaarctic.ru/asp/ref/3.pdf>

Bazhenov A. V. Tsezii-137 v pochvakh Arkhangel'skoi oblasti (Cesium-137 in the soils of the Arkhangelsk region). Speciality 25.00.36 "Geoecology (by branches)". Extended dissertation abstract. Arkhangelsk, 2001, 23 p. URL: <http://fciaarctic.ru/asp/ref/3.pdf>

Бк/кг; N_s — скорость счета пробы на радиометре, имп/с; N_b — скорость счета фона на радиометре, имп/с; Eff — показатель эффективности радиометра по энергии бета-излучения Y-90 ($E = 2260$ кэВ), %; M — масса счетной пробы, кг; $ChLos$ — радиохимический выход Y-90, %; K_{abs} — коэффициент поглощения бета-излучения, %. После радиохимической подготовки Sr-90 определяли с помощью альфа-бета-радиометра РКС-01 «Абелия» (НТЦ «Амплитуда», Россия) и 10-канального альфа-бета-радиометра LB 770 (Berthold Technologies GmbH & Co. KG, Германия).

Плотность загрязнения радионуклидами Cs-137 и Sr-90 определяли с учетом площади отбора и общей массы пробы. Плотность загрязнения приведена на 1 км².

Применяемое оборудование является средствами измерения утвержденного типа (сведения внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерения) и ежегодно проходят метрологическую поверку.

Результаты и обсуждения

Для понимания характера распределения значений радиационных параметров был построен высотный профиль по маршруту отбора проб. Для этого исследуемый участок был оцифрован с применением свободно распространяемой геоинформационной системы QGIS. На рисунке 2 приведен фрагмент снимка модели рельефа с отмеченным красной линией профилем отбора проб.

С использованием инструментов геоинформационной системы QGIS был получен график профиля рельефа, представленный далее на рисунках с результатами оценки радиационных параметров почв и торфа. На высотном профиле четко выделяются основные формы мезорельефа: тундровая низменность (зона аккумуляции), холм, склон (зона транзита), плакор. Почти во всех точках были отобраны пробы торфа. В нескольких точках (19, 20, 38, 39, 40, 43, см. рис. 1) на холмистом участке, а также в районе поймы реки были отобраны пробы почвы, имеющие маломощный органический слой (не более 5–8 см). В данной работе тип торфяных отложений и почвы, а также их физико-химические характеристики не учитывались при оценке накопления и миграции радионуклидов.

Результаты измерений и расчетов радиационных параметров исследованных проб торфа и почв приведены в табл. 1.

На рисунках 3–7 представлены графики изменения плотности загрязнения Cs-137 и Sr-90 по профилю отбора проб торфа и почв. Характер распределения содержания Cs-137 (рис. 3) и Sr-90 (рис. 4) в пробах по профилю отбора во многом схож. Отмечается существенная разница между плотностью загрязнения Cs-137 и Sr-90 на склоне, в зоне плакора и территории тундровой низменности. Данный факт обусловлен более существенной латеральной миграцией и плоскостным смывом поверхностным стоком радионуклидов по склону из зоны плакора, тогда как в зоне тундровой низменности радионуклиды аккумулируются в торфе и почве, где подтверждены в основном вертикальной миграции.

Согласно атласу (Национальный..., 2011), в западной части Ненецкого автономного округа на изучаемой территории плотность загрязнения Cs-137 в пе-

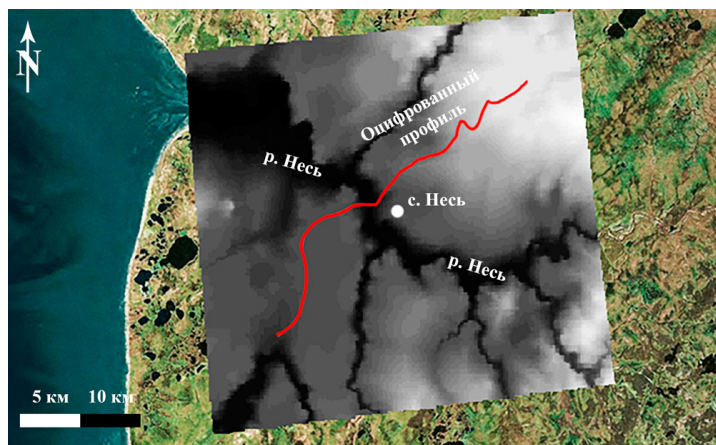


Рис. 2. Модель рельефа бассейна реки Несь (фрагмент снимка)

Fig. 2. The elevation model of the Nes River basin (fragment of the shot)

рассчете на 1986 год составляет менее 0.1 Кюри/кв. км (далее — опорное значение).

Если не учитывать постоянный радиоактивный распад Cs-137, то отдельные точки опробования по профилю показывают превышение значения 0.1 Кюри/кв. км. В основном все результаты измерения не превышают опорного значения. Но надо отметить, что с 1986 года прошло 36 лет — чуть больше одного периода полураспада Cs-137. Соответственно, на сегодняшний день опорное значение составило бы уже менее 0.05 Кюри/кв. км. Полученные данные о плотностях загрязнения Cs-137 позволяют уточнить уже имеющиеся карты пространственного распределения данного радионуклида.

При сравнении полученных результатов с другими редкими данными по радионуклиду Cs-37 в Ненецком автономном округе наблюдается снижение активности радиоцезия. Согласно А. В. Баженову*, в период с 1994 по 2000 г. в отдельных пробах южной части полуострова Канин наблюдались уровни содержания Cs-137 до 2000 Бк/кг.

В силу определенных обстоятельств, о которых будет сказано ниже, сведения о плотностях загрязнения Sr-90 на территории РФ отсутствуют. Поэтому полученные данные о содержании Sr-90 в торфах и почвах за-

падной части Ненецкого автономного округа являются новыми данными и позволяют оценить запас данного радионуклида в объектах окружающей среды. В представленных результатах исследований плотность загрязнения Sr-90 достигает 0.05 Кюри/кв. км на участках тундровых низменностей и до 0.01 Кюри/кв. км в зонах транзита, увеличиваясь в два раза в нижней части склона. Уровни загрязнения Sr-90 ориентировочно в два раза ниже, чем Cs-137, что подтверждается сведениями о выпадениях данных радионуклидов в период и после проведения ядерных испытаний (И'ин, 2017).

В каждой точке по профилю были отобраны пробы торфа и почвы двух горизонтов: 0—10 см и 10—20 см — с целью оценить характер вертикальной миграции и ее зависимость от различных форм рельефа. На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета изотопных отношений $\text{Cs-137}_{\text{горизонт 10—20 см}} / \text{Cs-137}_{\text{горизонт 0—10 см}}$, изотопное отношение $\text{Sr-90}_{\text{горизонт 10—20 см}} / \text{Sr-90}_{\text{горизонт 0—10 см}}$.

В зоне тундровой низменности (юго-запад бассейна реки Несь) отмечается существенная вертикальная миграция Cs-137 по профилю 0—20 см (изотопное отношение для двух горизонтов > 1). В отдельных точках низинных участков активность Cs-137 в горизон-

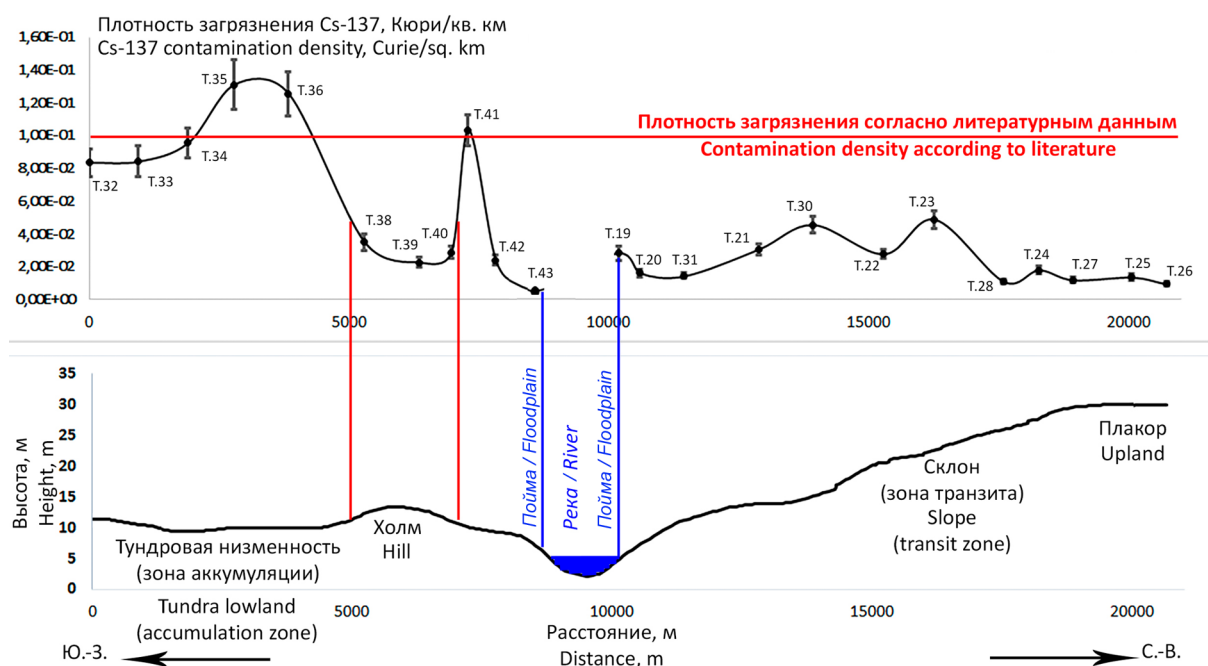


Рис. 3. Плотность загрязнения Cs-137

Fig. 3. Cs-137 contamination density

Таблица 1. Радиационные параметры отобранных проб бассейна реки Несь
Table 1. Radiation parameters of the samples of the Nes River basin

Шифр пробы Probe code	Горизонт, см Horizon, cm	Удельная активность, Бк/кг Specific activity, Bq/kg		Плотность загрязнения, Кюри/км ² Contamination density, Curie/km ²		Изотопные отношения, отн. ед. Isotope ratios, rel. units		
		Cs-137	Sr-90	Cs-137	Sr-90	Sr-90/Cs-137 (по плотности загрязнения) (by contamination density)	Cs-137 _(гор. 10–20) / Cs-137 _(гор. 0–10)	Sr-90 _(гор. 10–20) / Sr-90 _(гор. 0–10)
НП-32	0–10	70.0 ± 7.7	38.3 ± 6.9	8.34E-02 ± 8.64E-03	2.71E-02 ± 4.74E-03	3.25E-01 ± 6.61E-02	1.79E+00 ± 2.66E-01	7.81E-01 ± 1.93E-01
	10–20	125.0 ± 12.5	39.9 ± 6.8					
НП-33	0–10	55.0 ± 6.6	47.3 ± 7.6	8.40E-02 ± 9.47E-03	3.24E-02 ± 5.33E-03	3.86E-01 ± 7.69E-02	2.71E+00 ± 4.41E-01	8.41E-01 ± 1.96E-01
	10–20	149.0 ± 16.4	39.8 ± 6.8					
НП-34	0–10	71.0 ± 7.8	45.1 ± 7.2	9.55E-02 ± 9.18E-03	3.32E-02 ± 5.47E-03	3.48E-01 ± 6.64E-02	2.28E+00 ± 3.24E-01	8.85E-01 ± 2.07E-01
	10–20	162.0 ± 14.6	39.9 ± 6.8					
НП-35	0–10	97.0 ± 11.6	44.8 ± 7.2	1.31E-01 ± 1.50E-02	5.07E-02 ± 8.11E-03	3.87E-01 ± 7.62E-02	1.29E+00 ± 2.10E-01	8.62E-01 ± 1.95E-01
	10–20	125.0 ± 13.8	38.6 ± 6.2					
НП-36	0–10	118.0 ± 14.2	39.5 ± 6.7	1.25E-01 ± 1.36E-02	3.93E-02 ± 6.68E-03	3.14E-01 ± 6.34E-02	1.20E+00 ± 1.87E-01	8.82E-01 ± 2.12E-01
	10–20	142.0 ± 14.2	37.5 ± 6.4					
НП-38	0–10	33.4 ± 4.7	36.5 ± 6.6	3.50E-02 ± 5.15E-03	2.68E-02 ± 5.40E-03	7.67E-01 ± 1.91E-01	5.69E-01 ± 1.21E-01	2.44E-01 ± 8.32E-02
	10–20	19.0 ± 3.0	8.9 ± 2.6					
НП-39	0–10	52.0 ± 6.8	15.7 ± 3.9	2.27E-02 ± 3.02E-03	6.76E-03 ± 1.75E-03	2.98E-01 ± 8.70E-02	4.62E-01 ± 8.83E-02	4.52E-01 ± 1.70E-01
	10–20	24.0 ± 3.4	7.1 ± 2.0					
НП-40	0–10	44.0 ± 5.7	29.8 ± 5.4	2.87E-02 ± 3.83E-03	2.08E-02 ± 4.49E-03	7.24E-01 ± 1.84E-01	5.23E-01 ± 9.99E-02	6.61E-01 ± 2.15E-01
	10–20	23.0 ± 3.2	19.7 ± 5.3					
НП-41	0–10	200.0 ± 18.0	46.6 ± 7.5	1.03E-01 ± 9.27E-03	2.29E-02 ± 3.77E-03	2.22E-01 ± 4.16E-02	9.20E-01 ± 1.17E-01	8.35E-01 ± 1.95E-01
	10–20	184.0 ± 16.6	38.9 ± 6.6					
НП-42	0–10	65.0 ± 7.2	15.4 ± 3.4	2.40E-02 ± 3.01E-03	8.11E-03 ± 1.97E-03	3.38E-01 ± 9.24E-02	4.77E-02 ± 2.21E-02	6.04E-01 ± 2.15E-01
	10–20	3.1 ± 1.4	9.3 ± 2.6					
НП-43	0–10	10.0 ± 3.2	15.9 ± 3.3	1.08E-02 ± 3.78E-03	1.88E-02 ± 4.46E-03	1.74E+00 ± 7.36E-01	2.70E-01 ± 1.51E-01	5.16E-01 ± 1.85E-01
	10–20	2.7 ± 1.2	8.2 ± 2.4					
НП-19	0–10	65.0 ± 9.1	31.6 ± 5.7	2.82E-02 ± 4.40E-03	1.86E-02 ± 3.97E-03	6.57E-01 ± 1.74E-01	2.58E-01 ± 1.02E-01	9.84E-01 ± 3.19E-01
	10–20	4.9 ± 1.8	18.7 ± 5.0					
НП-20	0–10	49.0 ± 5.9	29.5 ± 5.6	1.61E-02 ± 2.26E-03	1.74E-02 ± 3.75E-03	1.09E+00 ± 2.79E-01	2.65E-01 ± 9.31E-02	8.55E-01 ± 2.75E-01
	10–20	5.3 ± 1.7	17.1 ± 4.4					

НП-31	0—10	88.0 ± 10.6	29.7 ± 5.9	1.43E-02 ± 1.72E-03	4.90E-03 ± 1.10E-03	3.43E-01 ± 8.70E-02	6.25E-01 ± 1.06E-01	6.43E-01 ± 2.11E-01
	10—20	55.0 ± 6.6	19.1 ± 5.0					
НП-21	0—10	102.0 ± 11.2	38.4 ± 6.9	3.05E-02 ± 3.48E-03	1.07E-02 ± 2.17E-03	3.52E-01 ± 8.19E-02	7.35E-01 ± 1.20E-01	6.17E-01 ± 1.85E-01
	10—20	75.0 ± 9.0	23.7 ± 5.7					
НП-30	0—10	105.0 ± 11.6	31.3 ± 5.3	4.55E-02 ± 5.01E-03	1.19E-02 ± 2.29E-03	2.62E-01 ± 5.80E-02	7.71E-01 ± 1.20E-01	5.81E-01 ± 1.66E-01
	10—20	81.0 ± 8.9	18.2 ± 4.2					
НП-22	0—10	87.0 ± 8.7	31.4 ± 5.7	2.77E-02 ± 2.89E-03	8.42E-03 ± 1.83E-03	3.04E-01 ± 7.33E-02	7.47E-01 ± 1.11E-01	4.43E-01 ± 1.55E-01
	10—20	65.0 ± 7.2	13.9 ± 4.2					
НП-23	0—10	109.0 ± 12.0	27.8 ± 5.0	4.88E-02 ± 5.37E-03	1.00E-02 ± 2.13E-03	2.06E-01 ± 4.93E-02	1.06E+00 ± 1.65E-01	5.72E-01 ± 1.86E-01
	10—20	115.0 ± 12.7	15.9 ± 4.3					
НП-28	0—10	103.0 ± 11.3	29.3 ± 5.6	1.10E-02 ± 1.15E-03	2.29E-03 ± 4.91E-04	2.09E-01 ± 4.98E-02	1.17E+00 ± 1.74E-01	4.37E-01 ± 1.44E-01
	10—20	121.0 ± 12.1	12.8 ± 3.5					
НП-24	0—10	57.0 ± 6.8	30.6 ± 5.5	1.79E-02 ± 2.52E-03	1.09E-02 ± 2.35E-03	6.06E-01 ± 1.56E-01	2.11E-01 ± 5.66E-02	4.77E-01 ± 1.63E-01
	10—20	12.0 ± 2.9	14.6 ± 4.2					
НП-27	0—10	65.0 ± 8.5	21.5 ± 5.2	1.18E-02 ± 1.69E-03	4.78E-03 ± 1.22E-03	4.04E-01 ± 1.18E-01	2.82E-01 ± 6.49E-02	5.63E-01 ± 2.08E-01
	10—20	18.3 ± 3.5	12.1 ± 3.4					
НП-25	0—10	43.0 ± 5.6	25.2 ± 5.0	1.35E-02 ± 1.97E-03	8.05E-03 ± 1.85E-03	5.98E-01 ± 1.62E-01	4.53E-01 ± 1.01E-01	4.88E-01 ± 1.72E-01
	10—20	19.5 ± 3.5	12.3 ± 3.6					
НП-26	0—10	40.0 ± 5.2	24.3 ± 5.8	9.22E-03 ± 1.33E-03	6.01E-03 ± 1.54E-03	6.52E-01 ± 1.92E-01	5.50E-01 ± 1.18E-01	6.63E-01 ± 2.44E-01
	10—20	22.0 ± 3.7	16.1 ± 4.5					

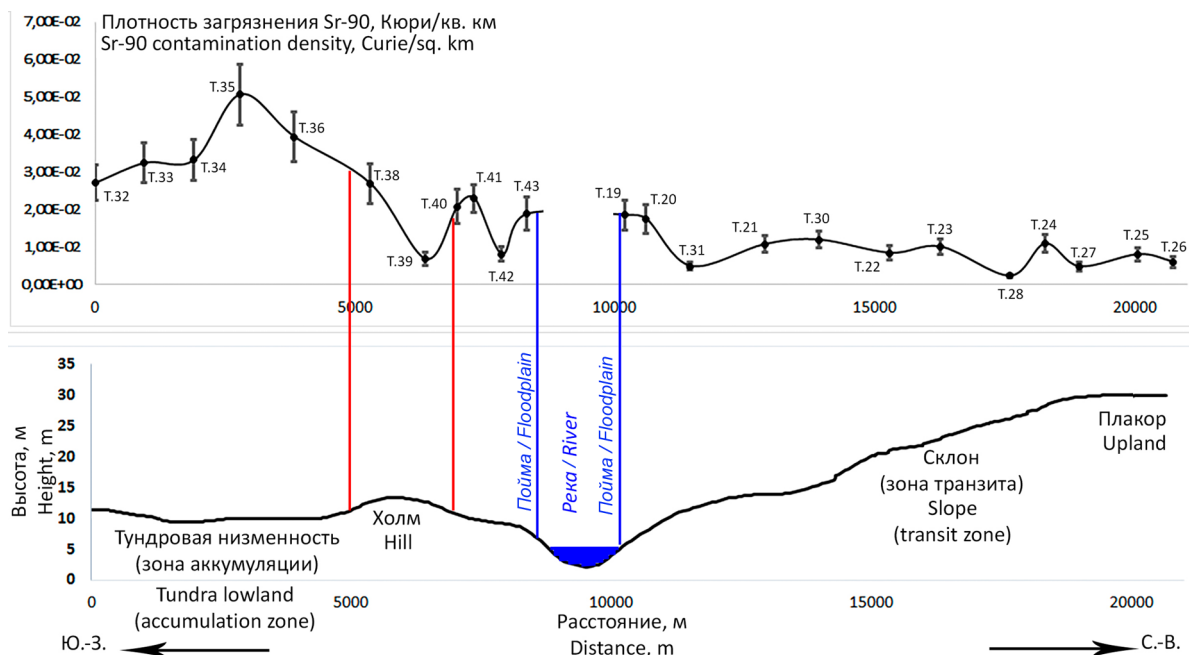


Рис. 4. Плотность загрязнения Sr-90
Fig. 4. Sr-90 contamination density

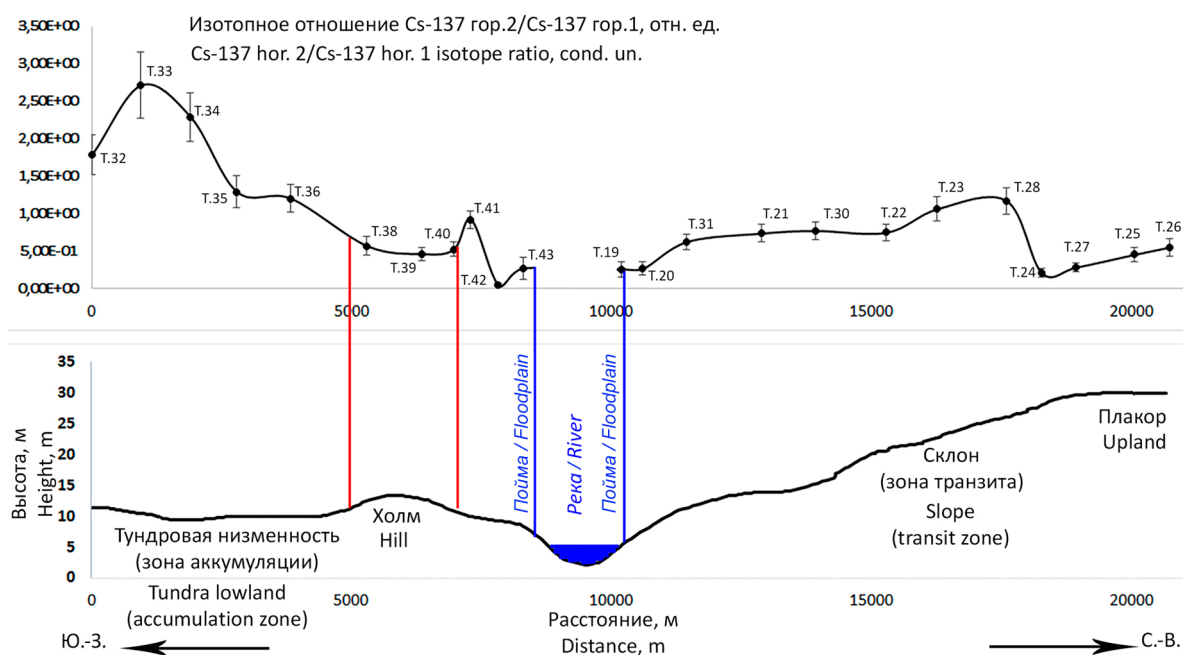


Рис. 5. Особенности миграции Cs-137 на основе изотопного отношения
Fig. 5. Features of Cs-137 migration based on isotope ratio

те 10–20 см превышает активность в горизонте 0–10 см более чем в два раза. Подобный характер миграции описан в работе (Семенков, 2015) для одного из торфяных разрезов низменного участка «Салым», где на глубине от 10 до 15 см наблюдаются более высокие удельные активности Cs-137 по сравнению с вышележащими слоями. В свою очередь, холмистая форма рельефа, склон и плакот (северо-восток бассейна реки Несь) характеризуются невысоким уровнем вертикальной миграции (изотопное отношение для двух горизонтов < 1). Данные факты могут быть обусловлены более интенсивным процессом стока по профилю отбора проб с увеличением активности радионуклидов к нижней части склона. На участках тундровой низменности и склона распределение Sr-90 имеет схожий ха-

рактер с распределением Cs-137. При этом для Cs-137 отмечается более интенсивный процесс миграции по вертикальному профилю, чем для Sr-90. Интересно, что такая же закономерность миграции радионуклидов в зависимости от структуры рельефа выявлена и в ряде других работ (Рахимова, 2015).

Для более детального описания механизма такой миграции планируется оценка плотности почвенных и торфяных горизонтов, их основных физико-химических параметров, основными из которых станут зольность, содержание органического вещества и pH. Так, в работе Коробовой (2020) кислотность торфов и почв описывается как наиболее важный параметр, влияющий на миграционную способность Cs-137. В очень кислых торфяных почвах (pH от 3.3 до 4.0) Cs-137 ак-

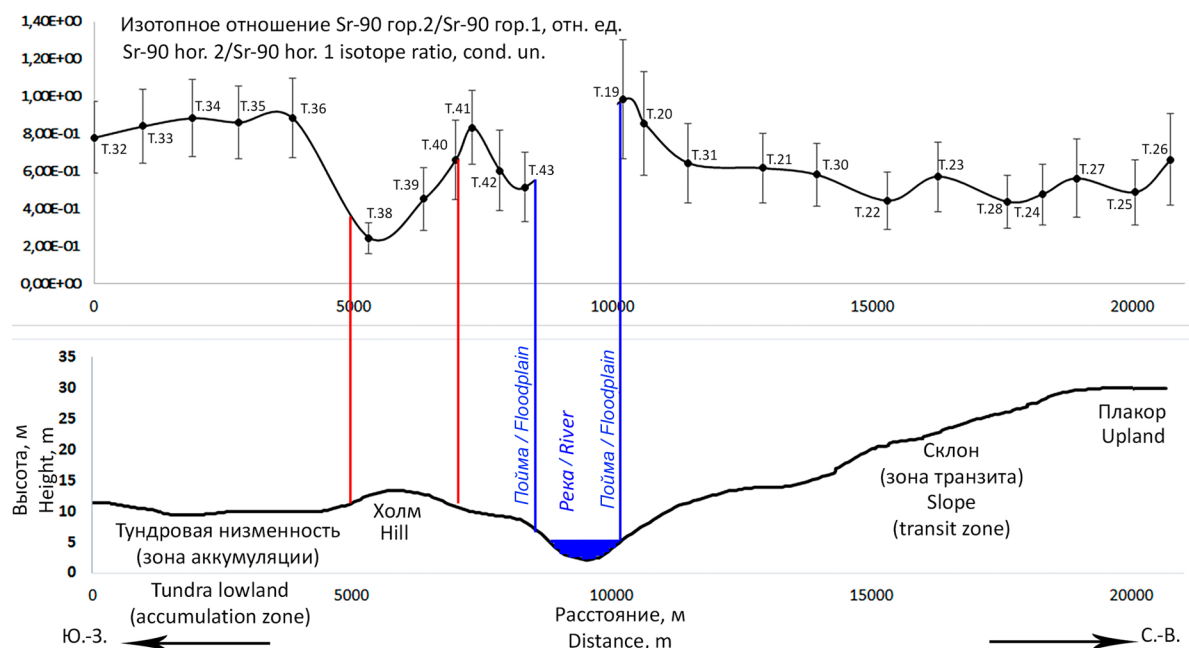


Рис. 6. Особенности миграции Sr-90 на основе изотопного отношения

Fig. 6. Features of Sr-90 migration based on isotope ratio

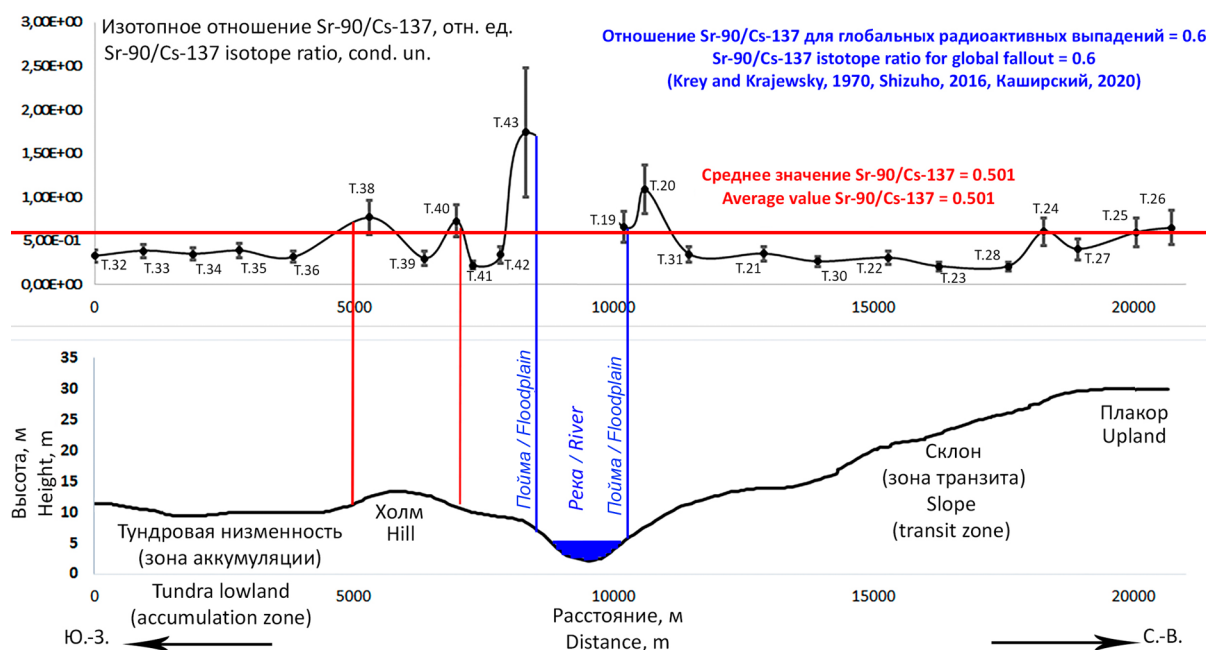


Рис. 7. Результаты расчета отношений Sr-90/Cs-137

Fig. 7. Calculation results of Sr-90/Cs-137 ratios

тивней мигрирует, чем в кислых (рН от 4.0 до 5.0) подзолах, подбурях, светлосеках и криоземах. Отдельными работами отмечается, что одними из основных процессов вертикальной миграции радионуклидов являются диффузия и конвективный перенос с током почвенной влаги (Леухин, 2021).

В целом влияние макро-, мезо- и микрорельефа на миграцию элементов, в том числе и радионуклидов, изучается давно. Например, в работе Климовой (2004) отмечается существенное накопление Cs-137 в низинных участках, тогда как склоновые области характеризуются транзитным характером латеральной миграции радионуклида. Причем в этой же работе указывается на факт усиления миграции радионуклида в условиях высокой влагообеспеченности почвы и застоя

воды в понижениях. Это как раз те явления, которые мы можем наблюдать на участке тундровой низменности на юго-западе от с. Несь, где происходят наиболее высокая аккумуляция радионуклидов Cs-137 и Sr-90 и их миграция по вертикальному профилю. Увеличение активности в верхних горизонтах почвы по направлению от верхней части склона к нижней исследовалось также в работе Барсукова (2012). Склон с крутизной 10° обеспечивал увеличение активностей радионуклидов Cs-137 на 54 % и Am-241 на 29 %. Согласно исследованиям (Коробова, 2020), в изученных элементарных ландшафтно-геохимических системах типа «вершина — склон — замыкающее понижение», что также относится и к профилю бассейна реки Несь, выявлено наличие циклической изменчивости содержания радионуклид-

ных маркеров Cs-137 и Sr-90 в почвах. При этом для обоих маркеров структура изменчивости была схожей, но не идентичной, что обусловлено различием химических свойств и особенностей миграции данных радионуклидов. Как уже было указано, бассейн реки Несь характеризуется схожими особенностями миграции радионуклидов Cs-137 и Sr-90, но более интенсивная миграция наблюдается для Cs-137.

Понятно, что для оценки смыва радионуклида поверхностным стоком на участках с необрабатываемыми почвами и проявлением плоскостного смыва важно знать содержание радионуклидов верхних нескольких миллиметров почвы (Коробова, 2020), а для выявления особенностей вертикальной миграции необходимо закладывать почвенные и торфяные колонки глубиной не менее 50 см в силу разного уровня проникновения техногенных радионуклидов (Yakovlev, 2021). Но применение метода отношений содержания радионуклида на разных горизонтах (в данной работе это 0–10 см и 10–20 см) привело к выявлению различий между активностью радионуклидов в основных структурах мезорельефа (области плакора, склона и низинных участков). Полученные результаты не противостоят ранее проведенным работам других исследователей и при этом дополняют новыми данными такие слабоизученные территории, как тундра Ненецкого автономного округа.

Важно отметить, что накопленные знания особенностей распределения, накопления и миграции Cs-137 в различных объектах окружающей среды намного превышают те же знания о радионуклиде Sr-90. Это связано в первую очередь с особенностями измерений и регистрации данных радионуклидов. Измерение активности Cs-137 проще в связи с наличием дискретной линии гамма-излучения от его дочернего продукта распада метастабильного Ba-137m. В то же время радионуклид Sr-90 является чисто бета-излучателем, и его можно определить только после радиохимической подготовки, за исключением случаев, когда активность радионуклида превышает десятки беккерелей и в счетном образце отсутствуют другие «мешающие» идентификации радионуклиды. Это позволяет использовать бета-спектрометрические комплексы для идентификации Sr-90, в том числе по энергии его дочернего продукта распада Y-90. Поэтому оценка особенностей миграции Sr-90, его накопления и распределения, особенно в труднодоступных районах Арктики, является актуальной и необходимой для решения задач.

Основным источником выявленной радиационной аномалии по результатам оценки изотопного отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ предположительно являются глобальные атмосферные выпадения в результате проведения ядерных испытаний, в том числе и локальные радиоактивные выпадения по результатам испытаний на архипелаге Новая Земля. На это указывает, в частности, и факт отсутствия более короткоживущих техногенных радионуклидов, которые свидетельствовали бы о «свежем» загрязнении. Для проведенных исследований изотопное отношение Sr-90/Cs-137 составило 0.501 отн. ед. (рис. 7). По литературным данным, отношение активности Sr-90/Cs-137 в глобальных выпадениях оценивается примерно в 0.6 (Il'in, 2017; Matishov, 2014).

Заключение

Проведенные исследования объектов окружающей среды территории бассейна реки Несь позволяют сделать вывод, что плотность загрязнения тундровых ландшафтов Ненецкого автономного округа техногенными радионуклидами (Cs-137 и Sr-90) имеет мозаичный характер, обусловленный геоморфологическими особенностями территорий. Отдельные участки тундры (болотные низменности) могут характеризоваться повышенным содержанием радионуклидов в силу процесса аккумуляции и миграции по вертикальному профилю. Плоскостной смыв радионуклидов по склонам обеспечивает их поступление в эстуарии рек и далее может обуславливать их накопление в пищевых цепочках «рыба — человек». По результатам оценки изотопного отношения Sr-90/Cs-137 можно сделать вывод, что основным источником техногенного загрязнения являются глобальные атмосферные выпадения и выпадения, обусловленные испытаниями на архипелаге Новая Земля. Отсутствие более короткоживущих радионуклидов (в первую очередь Cs-134 с периодом полураспада 2.06 лет) подтверждает данный вывод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-27-20079 «Радионуклиды в экосистемах тундры: источники, уровни загрязнения, антропогенные механизмы трансформации (на примере Ненецкого автономного округа)».

Литература / References

1. Барсуков О. А., Языкеев Д. В. Горизонтальная и вертикальная миграция ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{241}Am на обрабатываемых склоновых ландшафтах Пензенской области различной степени крутизны // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. 2012. № 29. С. 369–374.

Barsukov O. A., Yazykeev D. V. *Gorizontalnaya i vertikalnaya migratsiya ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{241}Am na obrabatyvaemykh sklonovykh landshaftakh Penzenskoi oblasti razlichnoi stepeni krutizny* (Horizontal and vertical migration of ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{241}Am on cultivated slope landscapes of the Penza region of varying degrees of steepness). *Izvestiya of Belinsky PSPU*, 2012, No. 29, pp. 369–374.

2. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Бойчук В. М. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1(25). С. 32–46.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Boychuk V. M. *Katastrofa na Kumzhinskom gazokondensatnom mestorozhdenii: prichiny, rezultaty, puti ustraneniya posledstviy* (Disaster at the Kumzhinskoye gas condensate field: causes, results, ways to eliminate the consequences). *Arctic: Ecology and Economics*, 2017, No. 1(25), pp. 32–46.

3. Климова Е. В. Влияние макро- и микрорельефа сельскохозяйственных угодий на миграцию ^{137}Cs по профилю почвы // Экологическая безопасность в АПК: Реферативный журнал. 2004. № 4. С. 155–158.

Klimova E. V. *Vliyanie makro- i mikrorelefa selskokhozyaistvennykh ugodii na migratsiyu ^{137}Cs po profilu pochvy* (Influence of macro and microrelief of agricultural lands on the migration of ^{137}Cs along the soil profile). *Ecological safety in the agrarian and industrial complex*. Abstract journal, 2004, No. 4, pp. 155–158.



4. Коноплев А. В., Голосов В. Н., Йощенко В. И., Нанба К., Онда Ю., Такаса Ц., Вакияма Й. Вертикальное распределение радиоцезия в почвах зоны аварии на АЭС Фукусима-1 // Почвоведение. 2016. № 5. С. 620—632.

Konoplev A. V., Golosov V. N., Yoshchenko V. I., Nanba K., Onda Yu., Takase Ts., Wakiyama Y. *Vertikalnoe raspredelenie radiotseziya v pochvakh zony avarii na AES Fukusima-1* (Vertical distribution of radiocesium in soils of the Fukushima-1 accident zone). Eurasian Soil Sci., 2016, No. 5, pp. 620—632.

5. Коробова Е. М., Тарасов О. В., Романов С. Л., Баранчуков В. С., Березкин В. Ю., Долгушин Д. И., Модоров М. В., Михайловская Л. Н., Лукьянов В. В. О распределении Sr-90 и Cs-137 в элементарных ландшафтно-геохимических системах восточно-уральского радиоактивного следа // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 175—177.

Korobova E. M., Tarasov O. V., Romanov S. L., Baranchukov V. S., Berezkin V. Yu., Dolgushin D. I., Modorov M. V., Mikhailovskaya L. N., Lukyanov V. V. *O raspredelenii Sr-90 i Cs-137 v elementarnykh landshaftno-geokhimicheskikh sistemakh vostochno-uralskogo radioaktivnogo sleda* (On the distribution of Sr-90 and Cs-137 in the elementary landscape-geochemical systems of the East Ural radioactive trace). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Nuclear-Physical Research and Technologies in Agriculture", 2020, pp. 175—177.

6. Леухин А. В., Михайлова А. В., Сазонов А. Р., Сазонова О. Г. Вертикальная миграция техногенных радионуклидов в поверхностном слое почв Волжского района Республики Марий Эл // XVIII Емельяновские чтения: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. 2021. С. 210—213.

Leukhin A. V., Mikhailova A. V., Sazonov A. R., Sazonova O. G. *Vertikalnaya migratsiya tekhnogennykh radionuklidov v poverkhnostnom sloe pochv Volzhskogo raiona Respubliki Marii El* (Vertical migration of technogenic radionuclides in the surface layer of soils of the Volga region of the Republic of Mari El) XVIII Emelyanov Readings: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 2021, pp. 210—213.

7. Методика измерений удельной активности радионуклидов в счётных образцах на гамма-спектрометрах с использованием ПО Spectra Line. М.: ЛСРМ, 2022. 25 с.

Metodika izmerenii udelnoi aktivnosti radionuklidov v schetnykh obraztsakh na gamma-spektrometrakh s ispolzovaniem PO Spectra Line (Methodology for measuring the specific activity of radionuclides in countable samples on gamma spectrometers using the Spectra Line software). Moscow: LSRM, 2022, 25 p.

8. Методика измерений удельной активности стронция-90 в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ВИМС, 2013. 19 с.

Metodika izmerenii udelnoi aktivnosti strontsiia-90 v probakh pochv, gruntov, donnykh otlozhenii i gornyykh porod beta-radiometricheskim metodom s radiokhimicheskoi podgotovkoi (Method for measuring the specific activity of strontium-90 in samples of soils, soils, bottom sediments and rocks by the beta-radiometric method with radiochemical preparation). Moscow: VIMS, 2013, 19 p.

9. Национальный атлас почв Российской Федерации / Гл. ред. С. А. Шоба. М.: Астрель: АСТ, 2011. 632 с.

National atlas of Soils of the Russian Federation. Chief editor S. A. Shoba. Moscow: Astrel: AST, 2011, 632 p.

10. Пучков А. В., Яковлев Е. Ю., Дружинин С. В. Радиационные параметры гидробионтов условно чистой территории Ненецкого автономного округа // Успехи современного естествознания. 2020. № 6. С. 118—122. DOI: 10.17513/use.37420. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43089413>

Puchkov A. V., Yakovlev E. Yu., Druzhinin S. V. *Radiatsionnye parametry gidrobiontov uslovno chistoi territorii Nenetskogo avtonomnogo okruga* (Radiation parameters of hydrobionts of the conditionally clean territory of the Nenets Autonomous Okrug). Successes of modern natural sciences, 2020, No. 6, pp. 118—122. DOI:10.17513/use.37420. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43089413>

11. Рахимова Н. Н., Ефремов И. В., Горшенина Е. Л. Миграционные способности радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в различных типах почв // Вестник Оренбург. гос. ун-та. 2015. № 10 (185). С. 412—415.

Rakhimova N. N., Efremov I. V., Gorshenina E. L. *Migratsionnye sposobnosti radionuklidov Cs-137 i Sr-90 v razlichnykh tipakh pochv* (Migration abilities of radionuclides Cs-137 and Sr-90 in different types of soils). Bulletin of the Orenburg State University, 2015, No. 10 (185), pp. 412—415.

12. Семенов И. Н., Усачева А. А., Мирошников А. Ю. Распределение цезия-137 глобальных выпадений в таежных и тундровых катенах бассейна реки Обь // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 154—173.

Semenkov I. N., Usacheva A. A., Miroshnikov A. Yu. *Raspredelenie tseziya-137 globalnykh vypadenii v taezhnykh i tundrovyykh katenakh basseina reki Ob* (Distributions of Cs-137 of global precipitation and taiga and tundra catenas of Ob river). Geology of ore deposits, 2015, V. 57, No. 2, pp. 154—173.

13. Ил'ин Г. В., Касаткина Н. Е., Моисеев Д. В., Усыгина И. С. Infrastructure Objects of the Nuclear Fleet as Sources of Radioactive Contamination of the Barents Sea: Waste Repository in Guba Andreeva // Atomic Energy. 2017. Vol. 122. No 2. P. 131—137. DOI 10.1007/s10512-017-0247-7

14. Krey P. W., Krajewski B. Comparison of atmospheric transport model calculations with observations of radioactive debris / P. W. Krey, B. Krajewski // Journal of Geophysical Research. 1970. № 75(15). P. 2901—2908.

15. Łokas E., Mieltski J. W., Ketterer M. E., Kleszcz K., Wachniew P., Michalska S., Miecznik M. Sources and vertical distribution of ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹+²⁴⁰Pu and ²⁴¹Am in peat profiles from southwest Spitsbergen // Applied geochemistry. 2013. № 28. P. 100—108.

16. Matishov G. G. Long-term dynamics of radioactive contamination in the Barents-Kara region (1960—2013) // Doklady Earth Sciences. 2014. № 458. №. 4. P. 473—479.

17. Miki S., Fujimoto K., Shigenobu Y., Ambe D., Kaeriyama H., Takagi K., Morita T. Concentrations of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr activity ratios in marine fishes after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident // Fisheries Oceanography. 2017. T. 26. №. 2. P. 221—233. <https://doi.org/10.1111/fog.12182>

18. Sarkisov A. A. Strategic approaches to planning the management of submerged nuclear fleet facilities // Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2013. № 2. P. 86—89.

19. Yakovlev E., Spirov R., Druzhinin S., Ocheretenko A., Druzhinina A., Mishchenko E., Zhukovskaya E. Atmospheric fall-out of radionuclides in peat bogs in the Western segment of the Russian arctic // Environmental Science and Pollution Research, 2021, without a number. P. 1—11. DOI: 10.1007/s11356-020-12224-7

Поступила в редакцию / Received 02.11.2022