



ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ ДЕЛЬТЫ РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА И АНАЛИЗ ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Лапиков П. И., Яковлев Е. Ю.

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук,
Архангельск, Российская Федерация, e-mail: pavel.lapikov.i@gmail.com*

В работе представлены результаты оценки содержания природных радионуклидов в почвах дельты реки Северная Двина – ключевого арктического региона России с высокой антропогенной нагрузкой. Цель исследования – оценка содержания радионуклидов в почвах дельты реки Северная Двина и анализ их пространственного распределения (на примере ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K). Пробы отобраны в 17 точках, охватывающих основные геоморфологические элементы дельты и прилегающих территорий, из слоёв 0–5 и 5–10 см. Измерения выполнены методом полупроводниковой гамма-спектрометрии на низкофоном оборудовании ORTEC. Установлено, что удельная активность ^{137}Cs в верхнем слое варьирует от 1,4 до 131 Бк/кг, что значительно расширяет известный ранее диапазон и свидетельствует о выраженной пространственной неоднородности. Выявлены два основных типа вертикального распределения ^{137}Cs : поверхностно-аккумулятивный (70% разрезов) и инверсионный (30% разрезов). Максимальные запасы ^{137}Cs (до 9,05 кБк/м²) приурочены к глеевым подзолам. Содержание природных радионуклидов не превышает среднемировых фоновых значений, что позволяет характеризовать территорию как зону с нормальным радиационным фоном. Полученные данные восполняют пробел в мониторинге радиационного состояния арктических дельтовых экосистем и могут быть использованы для разработки природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: радионуклиды, почвы, дельта Северной Двины, цезий-137, Арктика, глобальные выпадения, радиационная безопасность, пространственное распределение

ASSESSMENT OF RADIONUCLIDE CONTENT IN SOILS OF THE NORTHERN DVINA RIVER DELTA AND ANALYSIS OF THEIR SPATIAL DISTRIBUTION

Lapikov P. I., Yakovlev E. Yu.

*Federal Research Center for Integrated Study of the Arctic named after Academician
N. P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk,
Russian Federation, e-mail: pavel.lapikov.i@gmail.com*

This paper presents the results of an assessment of technogenic ^{137}Cs and natural radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in soils of the Northern Dvina River delta, a key Arctic region of Russia characterized by high anthropogenic pressure. The aim of the study is to evaluate the radionuclide content in the soils of the Northern Dvina River delta and to analyze their spatial distribution (using ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K as examples). Soil samples were collected at 17 sites covering the main geomorphological elements of the delta and adjacent areas from depths of 0–5 cm and 5–10 cm. Measurements were performed using semiconductor gamma spectrometry with low-background ORTEC equipment. The specific activity of technogenic ^{137}Cs in the upper soil layer ranges from 1.4 to 131 Bq/kg, significantly expanding the previously reported range and indicating pronounced spatial heterogeneity. Two main types of vertical distribution of ^{137}Cs were identified: surface-accumulative (70% of soil profiles) and inversion (30% of profiles), the latter being associated with illuvial processes in podzols and sorption barriers in peat-gley soils. Maximum ^{137}Cs inventories (up to 9.05 kBq/m²) are confined to gleyic podzols. The concentrations of natural radionuclides do not exceed global background values, allowing the study area to be characterized as having a normal radiation background. The obtained data fill a gap in the monitoring of the radiation status of Arctic delta ecosystems and can be used for the development of environmental protection measures under conditions of increasing anthropogenic pressure in key regions of the Russian Arctic.

Keyword: Keywords: radionuclides, soils, Northern Dvina delta, cesium-137, Arctic, global fallout, radiation safety, spatial distribution

Введение

Почвы арктических территорий выполняют важнейшую биосферную функцию, выступая естественным накопителем поллютантов и регулятором климатической системы. Оценка их состояния, включая уровень накопления загрязняющих веществ, является элементом глобального мониторинга.

Дельта Северной Двины – ключевой регион Российской Арктики с высокой антропогенной нагрузкой: здесь расположена крупнейшая в западном секторе Арктики городская агломерация и промышленные кластеры. Хрупкие экосистемы дельты испытывают хроническое техногенное воздействие, последствия которого изучены недостаточно.

Почвы, сформированные на аллювиальных отложениях, характеризуются высокой пространственной неоднородностью и специфическими условиями гумусообразования [1]. Они выступают основным накопителем загрязняющих веществ, включая радионуклиды. В отличие от хорошо изученных для дельты Северной Двины тяжёлых металлов [2-4], радиоактивное загрязнение почв дельты исследовано фрагментарно. Отдельные аспекты загрязнения тяжёлыми металлами рассмотрены также в работах [5; 6]. Радиационная обстановка определяется природной радиоактивностью пород и техногенными радионуклидами глобального происхождения [7; 8].

Техногенный ^{137}Cs является информативным трассером почвенных процессов и основным дозообразующим радионуклидом. Его поступление связано с глобальными выпадениями от испытаний ядерного оружия и аварий на АЭС [9; 10]. В почвенном профиле ^{137}Cs закрепляется в верхних гумусовых горизонтах, что позволяет использовать его как индикатор эрозивно-аккумуляционных процессов [11].

Современные систематические данные о распределении радионуклидов в почвах

дельты отсутствуют [7; 12]. Существуют данные, получаемые в ходе мониторинга государственными органами, но они могут иметь ведомственный характер на первичном этапе их получения [13]. Экологическая значимость дельты и важность ее исследования подтверждается ее функцией маргинального фильтра [14].

Цель данного исследования – оценка содержания радионуклидов в почвах дельты реки Северная Двина (на примере ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K).

В задачи исследования входило:

- определение удельной активности радионуклидов в слоях 0–5 и 5–10 см,
- анализ их пространственного распределения,
- оценка радиэкологической значимости.

Материалы и методы исследования

Отбор проб проведён в 17 точках в пределах дельты Северной Двины в радиусе 30 км методом конверта (рис. 1). В каждой точке отобраны пробы из слоёв 0-5 и 5-10 см. Типы почв определены по классификации почв России (2004). Координаты точек приведены в таблице 1.

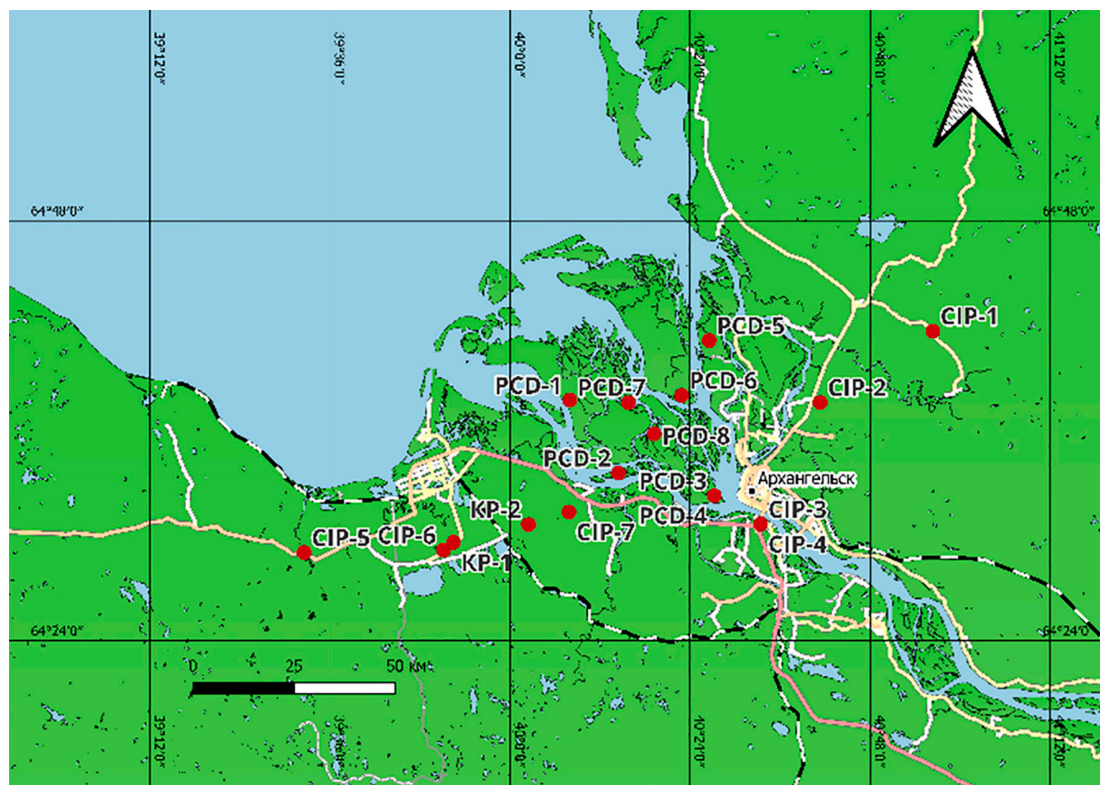


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб почв в дельте реки Северная Двина
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Координаты и даты отбора проб почв

№	Шифр	Широта	Долгота	Дата отбора
1	CIP-1	64.695355	40.939508	14.08.2024
2	CIP-2	64.627553	40.689116	14.08.2024
3	CIP-3	64.511635	40.556786	14.08.2024
4	CIP-4	64.511635	40.556786	14.08.2024
5	CIP-5	64.484485	39.542279	14.08.2024
6	CIP-6	64.486687	39.851669	14.08.2024
7	CIP-7	64.523179	40.130617	14.08.2024
8	PCD -1	64.629720	40.132810	16.07.2025
9	PCD -2	64.560291	40.240713	16.07.2025
10	PCD-3	64.538662	40.453628	16.07.2025
11	PCD-4	64.538662	40.453628	17.07.2025
12	PCD-5	64.686354	40.442466	20.07.2025
13	PCD -6	64.634318	40.381017	27.07.2025
14	PCD -7	64.627456	40.263076	27.07.2025
15	PCD -8	64.597669	40.320515	30.07.2025
16	KP-1	64.494238	39.874258	10.10.2025
17	KP-2	64.511205	40.041142	10.10.2025

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Пробы высушены при 105 °С и гомогенизированы. Удельную активность определяли на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (HPGe). Идентификацию проводили по гамма-линиям: ⁴⁰K – 1460,8 кэВ, ²²⁶Ra – по линиям ²¹⁴Pb (351,9 кэВ) и ²¹⁴Bi (609,3 кэВ), ²³²Th – по линиям ²²⁸Ac (911,2 кэВ) и ²¹²Pb (238,6 кэВ), ¹³⁷Cs – 661,7 кэВ. Минимально детектируемые активности: ⁴⁰K – 1,0 Бк, ²²⁶Ra – 0,2 Бк, ²³²Th – 0,3 Бк, ¹³⁷Cs – 0,1 Бк.

Обработка данных выполнена в R и Microsoft Office, картирование – в QGIS 3.44.3.

Результаты исследования и их обсуждение

Сеть пробоотбора охватывает основные геоморфологические элементы дельты и прилегающие территории. Полные данные по удельной активности и плотности поверхностного загрязнения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Удельная активность (Бк/кг) и плотность загрязнения (кБк/м²) ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra

Шифр	Название	Формула ПП	Глубина, см	¹³⁷ Cs		⁴⁰ K		²³² Th		²²⁶ Ra	
				Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²
CIP-1	Подзол альфегумусный	O-E-BF-C	0-5	29.0	1450	73	3650	3.1	155	1.8	90
			5-10	18.0	900	352	17600	1.8	90	1.5	75
			Сумма	47.0	2350	425	21250	4.9	245	3.3	165
CIP-2	Серогумусовая	AY-B-C	0-5	1.7	85	360	18000	13.7	685	10.5	525
			5-10	0.8	40	371	18550	11.7	585	10.2	510
			Сумма	2.5	125	731	36550	25.4	1270	20.7	1035
CIP-3	Торфяно-глеявая	T-G-CG~	0-5	1.7	85	360	18000	13.7	685	10.5	525
			5-10	6.7	335	380	19000	12.8	640	10.7	535
			Сумма	8.4	420	740	37000	26.5	1325	21.2	1060

Шифр	Название	Формула ПП	Глубина, см	¹³⁷ Cs		⁴⁰ K		²³² Th		²²⁶ Ra	
				Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²	Бк/кг	Бк/м ²
СIP-4	Серогумусовая (дерновая) аллювиальная	AY-C~	0-5	2.2	110	370	18500	13.7	685	10.1	505
			5-10	1.6	80	390	19500	12.2	610	10.8	540
			Сумма	3.8	190	760	38000	25.9	1295	20.9	1045
СIP-5	Подзол альфегумусный	O-E-VFH-C	0-5	1.4	70	340	17000	10.2	510	9.3	465
			5-10	3.8	190	530	26500	19.4	970	11.9	595
			Сумма	5.2	260	870	43500	29.6	1480	21.2	1060
СIP-6	Подзол альфегумусный глеевый	O-Eg-VHg-Cg	0-5	131.0	6550	160	8000	5.9	295	6.4	320
			5-10	50.0	2500	350	17500	5.4	270	6.1	305
			Сумма	181.0	9050	510	25500	11.3	565	12.5	625
СIP-7	Серогумусовая (дерновая) аллювиальная	AY-C~	0-5	23.0	1150	310	15500	8.2	410	7.4	370
			5-10	18.0	900	341	17050	6.8	340	7.1	355
			Сумма	41.0	2050	651	32550	15.0	750	14.5	725
PCD-1	Серогумусовая (дерновая) аллювиальная	AY-C~	0-5	4.6	230	232	1150	2.2	110	3.7	185
			5-10	1.2	60	191	100	1.3	65	2.1	105
			Сумма	5.8	290	423	1250	3.5	175	5.8	290
PCD-2	Серогумусовая (дерновая) аллювиальная	AY-C~	0-5	11.8	590	460	21150	19.2	960	13.6	680
			5-10	10.3	515	480	24000	17.3	865	12.0	600
			Сумма	22.1	1105	940	45150	36.5	1825	25.6	1280
PCD-3	Агрогумусовая старопахотная аллювиальная	AYpa-C~	0-5	6.9	345	500	25000	20.2	1010	17.0	850
			5-10	4.3	215	390	19500	11.1	555	9.4	470
			Сумма	11.2	560	890	44500	31.3	1565	26.4	1320
PCD-4	Серогумусовая (дерновая) глееватая	AY-Cg	0-5	4.1	205	400	20000	12.0	600	10.7	535
			5-10	3.7	185	300	15000	9.2	460	8.6	430
			Сумма	7.8	390	700	35000	21.2	1060	19.3	965
PCD-5	Серогумусовая (дерновая) глееватая	AY-Cg	0-5	13.6	680	400	20000	14.3	715	11.9	595
			5-10	8.3	415	398	19900	12.7	635	10.1	505
			Сумма	21.9	1095	798	39900	27.0	1350	22.0	1100
PCD-6	Серогумусовая (дерновая) глеевая аллювиальная	AYg-Cg~	0-5	11.3	565	397	19850	21.4	1070	22.1	1105
			5-10	6.2	310	319	15950	17.6	880	18.7	935
			Сумма	17.5	875	716	35800	39.0	1950	40.8	2040
PCD-7	Агрогумусовая старопахотная аллювиальная	AYpa-C~	0-5	7.3	365	294	14700	18.5	925	19.2	960
			5-10	6.1	305	278	13900	16.2	810	16.5	825
			Сумма	13.4	670	572	28600	34.7	1735	35.7	1785
PCD-8	Серогумусовая аллювиальная	AY-C~	0-5	5.8	290	293	14650	17.1	855	18.2	910
			5-10	4.3	215	281	14050	15.2	760	16.9	845
			Сумма	10.1	505	574	28700	32.3	1615	35.1	1755
KP-1	Подзол супесчаный глеевый	O-Eg-VHg-Cg	0-5	3.5	175	370	18500	4.1	205	3.0	150
			5-10	1.2	60	260	13000	2.3	115	2.5	125
			Сумма	4.7	235	630	31500	6.4	320	5.5	275
KP-2	Подзол супесчаный глеевый	O-Eg-VHg-Cg	0-5	39.0	1950	115	5750	6.4	320	5.2	260
			5-10	115.0	5750	300	15000	22.8	1140	16.0	800

Примечание: O – органический горизонт, T – торфяной, AY – серогумусовый, AYpa – агрогумусовый, AYg – серогумусовый с оглеением, E – элювиальный, Eg – элювиальный с оглеением, VF – альфегумусовый, VFH – альфегумусовый с повышенным гумусом, VH – иллювиально-гумусовый, VHg – с оглеением, B – переходный, C – порода, Cg – порода с оглеением, C~ – слоистая аллювиальная, G – глеевый, CG~ – слоистая порода с оглеением, g – признак оглеения, pa – пахотный, ~ – слоистость. Составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Природные радионуклиды (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra) в 60% разрезов не имеют статистически значимых различий между горизонтами, что характерно для почв с однородной минеральной толщей. В подзолах их содержание в слое 5–10 см может в 2–5 раз превышать верхний слой вследствие иллювиального процесса.

Удельная активность ^{137}Cs в слое 0–5 см варьирует от 1,4 до 131 Бк/кг, что значительно расширяет известный ранее диапазон (0,14–24 Бк/кг для острова Ягры [12; 15]). Аномалии в точках СР-6 (131 Бк/кг) и КР-2 (115 Бк/кг) более чем в 5 раз превышают максимальные уровни, отмеченные ранее, что указывает на роль локальных условий аккумуляции (глеевые процессы, органогенные горизонты).

Для 70% точек характерно убывание ^{137}Cs с глубиной (коэффициент снижения 1,5–5). В 30% проб зафиксирована инверсия профиля (СР-5, КР-2, СР-3), связанная с наличием сорбционного горизонта или литологической неоднородностью.

Подзолистые почвы (СР-1, СР-5, СР-6, КР-1, КР-2) имеют максимальную вариабельность ^{137}Cs (3,5–181 Бк/кг суммарно) и минимальные уровни природных радионуклидов. В автоморфных подзолах ^{137}Cs накапливается в верхнем горизонте, в глеевых – в органогенных и иллювиальных горизонтах.

Сравнительный график активности ^{137}Cs представлен на рисунке 2.

Подзолистые почвы (СР-1, СР-5, СР-6, КР-1, КР-2) имеют максимальную вариабельность ^{137}Cs (3,5–181 Бк/кг суммарно) и минимальные уровни природных радионуклидов. В автоморфных подзолах ^{137}Cs накапливается в верхнем горизонте, в глеевых – в органогенных и иллювиальных горизонтах.

Агрогумусовые почвы (РСД-3, РСД-7) имеют чёткую стратификацию: слой 0–5 см обогащён радионуклидами относительно слоя 5–10 см.

Торфяно-глеевая почва (СР-3) демонстрирует инверсию ^{137}Cs при однородном распределении природных радионуклидов – маркер сорбционного барьера.

Матрица корреляций Пирсона (рис. 3) показывает сильную связь между ^{232}Th и ^{226}Ra ($r = 0,93$), подтверждая их общее происхождение из минералов. ^{40}K коррелирует с торием ($r = 0,57$) и радием ($r = 0,41$). ^{137}Cs не имеет значимых связей с природными радионуклидами ($r \approx -0,03 \dots -0,08$), что указывает на независимость его распределения.

Сравнение с данными UNSCEAR показало, что уровни природных радионуклидов не превышают глобального фона: средние значения ^{40}K – 415 Бк/кг, ^{232}Th – 18,4 Бк/кг, ^{226}Ra – 17,9 Бк/кг, что соответствует нижней границе глобального фона. Это подтверждает отсутствие техногенного обогащения почв природными радионуклидами.

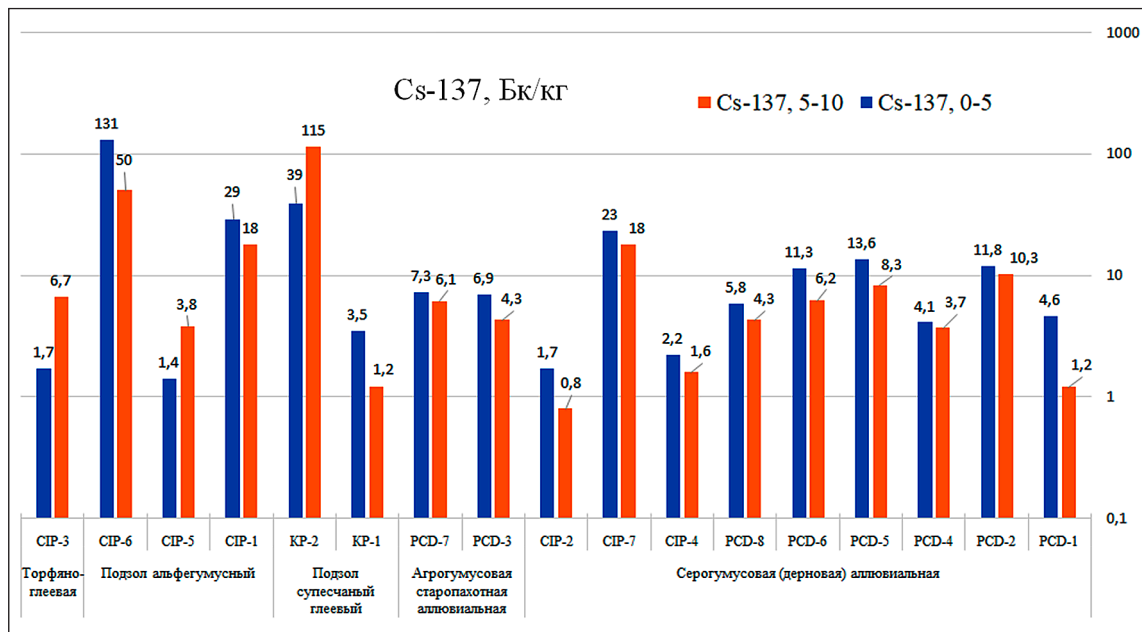


Рис. 2. Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs в почвенных профилях основных генетических типов почв дельты
Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

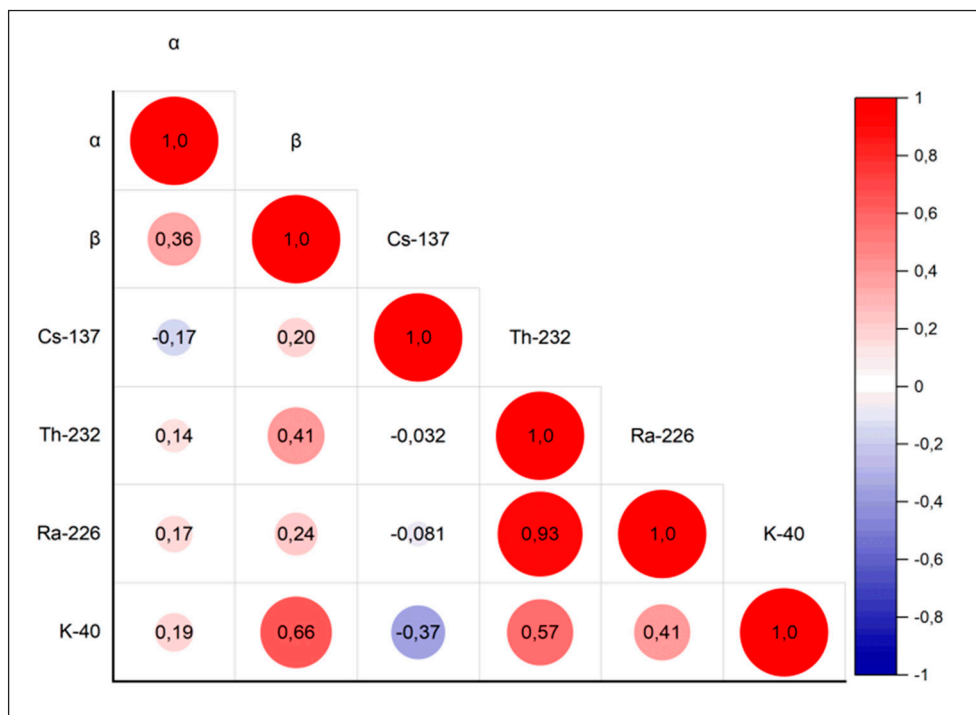


Рис. 3. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона между удельными активностями радионуклидов в почвах дельты Северной Двины
Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Выводы

1. Удельная активность ^{137}Cs в слое 0-5 см варьирует от 1,4 до 131 Бк/кг, что значительно выше ранее известных значений (0,14-24 Бк/кг).

2. Максимальные запасы ^{137}Cs (до 9,05 кБк/м²) приурочены к глеевым подзолам. В гидроморфных почвах активность цезия-137 в 5-50 раз выше, чем в автоморфных.

3. Выявлены два типа вертикального распределения ^{137}Cs : поверхностно-аккумулятивный (70%) и инверсионный (30%), связанный с иллювиальными процессами и сорбционными барьерами.

4. Средние значения ^{226}Ra (17,9 Бк/кг) и ^{232}Th (18,4 Бк/кг) соответствуют нижней границе глобального фона, территория характеризуется нормальным радиационным фоном.

Полученные результаты имеют прямое практическое значение для организации системы радиоэкологического мониторинга в дельте реки Северная Двина. Результаты исследования могут быть использованы: территориальными органами Росгидромета и Роспотребнадзора; природоохранными организациями Архангельской области; научными учреждениями при создании ре-

гиональных баз данных фонового содержания радионуклидов.

Список литературы

- Наквасина Е. Н., Паринова Т. А., Копылова М. В. Почвы лугов островной поймы Северной Двины // Вестник КрасГАУ. 2012. № 11. С. 54-60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pochvy-lugov-ostrovnoy-poymy-severnoy-dviny> (дата обращения: 31.03.2026).
- Климовский Н. В., Чернова В. Г., Петракова И. В., Новоселов А. П. Аккумуляция загрязняющих веществ донными отложениями в Двинском заливе Белого моря // Вода: химия и экология. 2017. № 10 (112). С. 3-10. EDN: YUUIYM. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32738901> (дата обращения: 31.03.2026).
- Лещев А. В. Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смешения «река-море» устья реки Северной Двины // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 17-21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sudohodnogo-kanala-porta-arhangel'sk-na-perenos-vzveshennykh-veschestv-v-zone-smesheniya-reka-more-ustya-reki-severnoy-dviny/viewer> (дата обращения: 31.03.2026).
- Котова Е. И., Коробов В. Б., Шевченко В. П., Иглин С. М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121-129. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37402> (дата обращения: 31.03.2026). DOI: 10.17513/use.37402.
- Неверова Н. В., Чупаков А. В. Оценка загрязнения устьевой области реки Северной Двины методом расчета фоновых концентраций (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni) // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6. № 4. С. 51-67. DOI: 10.21072/mbj.2021.06.4.05. EDN: IXVZLN. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47286178> (дата обращения: 31.03.2026).

6. Красницкий В. М., Бобренко И. А., Шмидт А. Г., Матвейчик О. А. Агроэкологический мониторинг почв на правом берегу Иртыша лесостепной зоны Омской области // Плодородие. 2016. № 3 (90). С. 33–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agroekologicheskij-monitoring-pochv-na-pravom-beregu-irtysha-lesostepnoy-zony-omskoy-oblasti> (дата обращения: 31.03.2026).
7. Kriauciunas V., Iglovsky S., Bazhenov A., Kuznetsova I., Shakhova E., Druzhinin S. ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra in bottom sediments of the Dvina Bay on the White Sea (the Suhoie Sea Gulf) // Arctic Environmental Research. 2018. Vol. 18. № 4. P. 148–154. DOI: 10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.148. URL: <https://aer.pensoft.net/article/31853/> (дата обращения: 31.03.2026).
8. Баженов А. В., Крячюнас В. В., Игловский С. А. Результаты исследования цезия-137 в почвах окрестностей городских агломераций Архангельска, Северодвинска и Новодвинска // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 90–95. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36888> (дата обращения: 07.03.2026). EDN: YLXXZZ.
9. Аникина Н. А., Крышев А. И. Расчет обобщенных показателей радиационно-экологического риска для районов Баренцева и Карского морей, подверженных воздействию ядерно и радиационно опасных объектов // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 3. С. 274–285. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-3-274-285. URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/41275> (дата обращения: 31.03.2026).
10. IAEA. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. URL: <https://www.iaea.org/publications/7382/environmental-consequences-of-the-chernobyl-accident-and-their-remediation-twenty-years-of-experience> (дата обращения: 31.03.2026).
11. Лурье А. А., Кубасова М. С. Современное состояние содержания ^{137}Cs в компонентах лесных биоценозов Архангельской области // АНРИ. 2015. № 1(80). С. 41–47. EDN: TJLCOT. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23005400> (дата обращения: 31.03.2026).
12. Лапиков П. И., Яковлев Е. Ю., Лапикова А. Т. Оценка содержания естественных и техногенных радионуклидов в почвах дельты реки Северная Двина (на примере острова Ягры) // Успехи современного естествознания. 2025. № 1. С. 43–49. DOI: 10.17513/use.38369. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38369> (дата обращения: 31.03.2026).
13. Гордеев В. В., Коченкова А. И., Лохов А. С., Яковлев А. Е., Белоруков С. К., Федулов В. Ю. Сезонные и межгодовые вариации концентраций и стоков растворенных и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белое море // Океанология. 2021. № 1 Т. 61. С. 41–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0030157421010068> (дата обращения: 31.03.2026).
14. Министерство природных ресурсов и экологии Архангельской области. Доклад «Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2024 год». Архангельск, 2025. 555 с. URL: <https://eco29.ru/informatsionnyerekursy-/ekologiya-oblasti/2024/> (дата обращения: 31.03.2026).
15. Коробов В. Б., Шевченко В. П., Котова Е. И. Нерешенные задачи исследования устьевой области Северной Двины // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 125–138. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).6. EDN: RBNEBY. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49622488> (дата обращения: 31.03.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках ФНИР «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений» № 125022002727-2.

Financing: The work was supported by the Research and Development Program “Features of Element and Isotope Migration in Environmental Components of the Western Sector of the Russian Arctic under Climate and Technogenic Change” № 125022002727-2.