

МИГРАЦИЯ И ПРОФИЛЬ ^{137}Cs В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ГЛУБОКИХ И ПРОТОЧНЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

© 2023 г. Н. А. Бакунов, Д. Ю. Большианов, А. О. Аксенов*

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

*e-mail: aksenov2801@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2023, после доработки 05.07.2023, принята к публикации 12.07.2023

Представлена оценка современного загрязнения донных отложений (ДО) озерно-речных систем цезием-137, происходящим из глобальных выпадений и аварийного выброса с ЧАЭС. Были исследованы ДО проточных озер из Северо-Запада России. Озеро Копанское, расположенное к югу от Финского залива, находится на следе выпадения «чернобыльского» ^{137}Cs (~ 37 кБк/м²), тогда как другие озера – Ладожское, Суходольское, Вуокса, Имандра на его периферии в Карелии и на Кольском полуострове – загрязнены преимущественно глобальным ^{137}Cs . Определены плотность загрязнения ^{137}Cs дна озер (кБк/м²), распределение ^{137}Cs в профиле донных отложений, коэффициенты диффузии (D) ^{137}Cs в ДО и содержание обменной химической формы радионуклида. Загрязнение ДО озер ^{137}Cs формировалось под влиянием седиментации взвеси с ^{137}Cs , сорбции ^{137}Cs ДО и диффузии. При седиментации ≥ 3 мм/год концентрация ^{137}Cs повышалась от верхних к нижним слоям керна (озера Вуокса, Экостровская Имандра), отражая постепенный процесс миграции ^{137}Cs в толщу отложений. Противоположный тренд концентрации ^{137}Cs наблюдался в ДО озер Ладожское и Суходольское при седиментации ≤ 0.5 мм/год. Здесь диффузия ^{137}Cs с $D = (0.5\text{--}6.2) \times 10^{-8}$ см²/с обуславливала медленный перенос радионуклида в толщу грунтов дна; в верхнем слое керна 0–5 см содержался основной запас ^{137}Cs . В ДО оз. Суходольское только от 14.4 до 20% поглощенного ^{137}Cs находилось в обменной химической форме, извлекаемой в раствор 1 М NH_4Ac .

Ключевые слова: ^{137}Cs , озера, донные отложения, запас ^{137}Cs , сорбция, диффузия.

DOI: 10.31857/S003383112305009X, **EDN:** XTJWYB

ВВЕДЕНИЕ

^{137}Cs является искусственным радионуклидом из состава продуктов ядерного деления урана и плутония с полупериодом распада $T_{\text{физ}} = 30$ лет. Загрязнению геосферы Земли ^{137}Cs глобальных выпадений (1961–1964 гг.) более 70 лет, тогда как локальному загрязнению северного полушария «чернобыльским» ^{137}Cs 37 лет. Основной массив эмпирических данных загрязнения вод, донных отложений и гидробионтов ^{137}Cs получен для среднелинотного пояса страны на следах промышленных аварий с выходом ^{137}Cs в окружающую среду ^{137}Cs [1–3]. Менее изученными в гидрологическом и радиологическом отношении оказались пресноводные водоемы высоких широт, где исследования

носили преимущественно фрагментарный характер. Выявлена высокая чувствительность наземных и водных экосистем Севера к загрязнению химическими и радиоактивными веществами [4]. Здесь даже низкие выпадения ^{137}Cs от «чернобыльской» аварии вызвали временные ограничения на употребление местным населением продуктов питания от традиционных объектов промысла. Размещение на плавучих платформах АЭС в Арктике и строительство модульных АЭС наземного базирования для арктических районов повышают актуальность изучения закономерностей миграции ИРН в водоемах и прогнозов переноса радионуклидов в экосистемах Севера.



Рис. 1. Местоположение исследуемых озер. 1 – Ладожское оз., 2 – озера Суходольское и Вуокса, 3 – Копанское оз., 4 – оз. Имандра.

Задача исследования заключалась в изучении современного состояния загрязнения ^{137}Cs ДО, сопряженных по стоку озерно-речных систем Северо-Запада России. Здесь реки берут начало из озер или протекают через них в своем среднем (нижнем) течении. Речная сеть этого региона формировалась в условиях освобождения кристаллического щита от ледяного покрова, образования большого количества озер и стока из них паводковых вод в пониженные участки рельефа. Объектом исследования стали донные отложения сопряженных по стоку систем река–озеро и озеро–река, загрязненных преимущественно ^{137}Cs глобальных выпадений. Содержание ^{137}Cs в ДО и распределение радионуклида в толще донных грунтов является откликом водных систем на ~70-летнее пребывание в водоемах низких концентраций ^{137}Cs . В работе [5] было показано, что в 1986–1988 гг. основное количество ^{137}Cs поступало в Ладогу с водами Вуоксы, а не с водами Волхова и Свири из-за загрязнения ^{137}Cs истока Вуоксы озера Сайма.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются донные отложения озер (ДО), находящихся на следе выпадения «чернобыльского» ^{137}Cs (оз. Копанское, сток в Финский залив) и на периферии следа – в Карелии и на Кольском полуострове (озера Суходольское, Вуокса, Ладожское, Имандра) (рис. 1). Все озера являются проточными. Замедленной сменой вод обладают

лишь озера Ладожское и Имандра с показателем условного обмена вод (W) 12.3 и 2.0 лет. Пробы донных отложений отбирали на станциях с глубиной от 6 до 70 м. Пробы ДО, за исключением грунта из оз. Имандра, отбирали пробоотборником фирмы UWITEC, позволяющим отобрать керн с ненарушенным сложением диаметром 60 мм. Послойное разделение керна проводилось по схеме: первый слой 0–2 см, последующие слои с шагом 0–3 см. В оз. Имандра ДО отбирали пробоотборником Limnos диаметром 85 мм; шаг разделения керна составил 0–1 см. Методы определения ^{137}Cs в пробах ДО и воды, принятые нами ранее [6], не изменялись. Относительная ошибка определения ^{137}Cs в образцах с низкой концентрацией радионуклида не превышала 40%. ^{137}Cs из проб воды объемом 60–120 л выделяли с помощью сорбента АНФЕЖ [7]. В ДО озер Копанское и Суходольское определяли содержание обменной химической формы ^{137}Cs путем экстракции радионуклида в 1 М раствор NH_4Ac при соотношении фаз 1 : 10 и времени их взаимодействия 1 сут. К анализу привлекали отдельные слои профиля ДО, в которых концентрация ^{137}Cs позволяла корректно оценить долю обменного ^{137}Cs . В водоемах определяли скорость накопления осадков с привлечением ^{137}Cs в качестве метки современного седиментогенеза [8]. По данным распределения ^{137}Cs в слоях керна определяли коэффициента диффузии радионуклида с использованием выражения [9]

$$D = b [(\ln \varepsilon) 4t], \quad (1)$$

где $b = (x_2)^2 - (x_1)^2$; $\varepsilon = C_1/C_2$; D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; x_1 и x_2 – произвольно взятые слои профиля концентраций ^{137}Cs с отметками слоя, см; C_1 и C_2 – концентрации ^{137}Cs , соответствующие слоям x_1 и x_2 ; t – время миграции, с. За дату t_0 формирования кумулятивного запаса глобального ^{137}Cs в грунтах морского дна принимался 1964 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведено содержание ^{137}Cs в кернах ДО озер по данным наблюдений 2017–2022 гг.

Содержание ^{137}Cs в алевритовом иле оз. Копанское (табл. 1) после введения поправки на распад радионуклида (1986–2017 гг.) составит $33.5 \text{ кБк}/\text{м}^2$ – значение, близкое к выпадению «чернобыльского» ^{137}Cs на побережье водоема ($\sim 37 \text{ кБк}/\text{м}^2$) [10]. Сток

Таблица 1. Загрязнение ДО озер ^{137}Cs : плотность, кБк/м^2 и содержание в поверхностном слое керна, Бк/кг

Озеро, координаты станций	Глубина, м, $H_{\text{ср}}/H_{\text{макс}}$	Площадь, км^2	^{137}Cs в кернах, кБк/м^2	^{137}Cs в слое керна 0–2 см, Бк/кг
Копанское 59°43' с.ш., 28°43' в.д.	–/25	9.85	16.5	1000
Вуокса 60°58' с.ш., 29°57' в.д.	5.1/25	92.6	4.2	39
Суходольское 60°41' с.ш., 30°03' в.д.	4/23	44.4		
Станция 1			8.75	210
Станция 2			3.83	250
Ладожское	52/230	17800		
Станция «Якимоварский залив, северный район» 67°36' с.ш., 33°00' в.д.	50	23.8	3.2	79
Станция «Западный архипелаг» 61°14' с.ш., 30°27' в.д.	33		0.78	32.5
Станция «Средняя часть озера» 60°43' с.ш., 31°48' в.д.	78		0.87	160
Имандра	16/67	876		
Имандра (Экостровская) 67°36' с.ш., 33°00' в. д.	9/42	362	1.55	28

^{137}Cs из озера с водами небольшой реки Пейпия за 31 год не привел к значительной потере радионуклида, большая часть его аккумулировалась в грунтах дна. Следовые количества ^{137}Cs в профиле ДО прослеживались до 62 см. Выпадения ^{137}Cs в 1986 г. примерно в 20 раз превысили содержание глобального ^{137}Cs в почвах ($\sim 1.7 \text{ кБк/м}^2$). Поэтому запас ^{137}Cs в ДО озера преимущественно представлен ^{137}Cs аварийного выброса с ЧАЭС.

Ожидалось, что плотность ^{137}Cs ДО озер, находящихся выше 60° с.ш., будет меньшей, чем в оз. Копанское, из-за более низкого выпадения глобального и «чернобыльского» ^{137}Cs . Содержание ^{137}Cs в ДО оз. Имандра (Экостровская) Кольского полуострова не превышало $\sim 1.55 \text{ кБк/м}^2$, тогда как в озерах Карельского перешейка Вуокса и Суходольское плотность загрязнения ДО была в 2–4 раза выше (табл. 1). В северо-западной части Ладожского озера донные отложения характеризовались плотностью 0.78 кБк/м^2 , близкой к наблюдаемой в средней части водоема с глубинами 50–70 м. При таких же глубинах в ДО Якимоварского залива озера содержалось 3.2 кБк/м^2 ^{137}Cs . В целом для Ладожского озера диапазон плотности загрязнения ДО составил $0.78\text{–}3.2 \text{ кБк/м}^2$. Ранее [11] 4-кратное различие в плотно-

сти загрязнения грунтов дна ^{137}Cs ($0.15\text{–}0.69 \text{ Бк/см}^2$) отмечалось в глубоководном озере Телецкое. Здесь с поступлением взвеси из впадающих рек и ручьев повышалась вариабельность концентрации Cs в ДО.

Загрязнение ^{137}Cs ДО озер Вуокса и Суходольское, относящихся к речной системе р. Вуокса, оценивалось с учетом выпадения «чернобыльского» ^{137}Cs 6.5 кБк/м^2 на побережье устья р. Вуокса и питания ее из оз. Сайма, загрязненного ^{137}Cs [12, 13]. Более $\sim 90\%$ водосбора Вуоксы находится на территории Финляндии. Поэтому концентрации ^{137}Cs в воде Вуоксы определялись загрязнением ^{137}Cs оз. Сайма и его водосбора площадью 61054 км^2 . Сайма при зеркале 4380 км^2 имеет 36 км^3 озерных вод. На западную часть бассейна озера ^{137}Cs выпало в $\sim 2\text{–}3$ раза больше, чем на восточную на границе с Россией ($\sim 6.5 \text{ кБк/м}^2$) [13]. В Ладожское озеро воды Вуоксы поступают по северному мелководному рукаву через оз. Вуокса и полноводному южному рукаву через оз. Суходольское и р. Бурная. Привнос вод в Ладогу по северному рукаву резко снижается после весеннего половодья из-за мелководности русла. Поэтому по северному рукаву в период максимального загрязнения вод (1986–1989 гг.) в Ла-

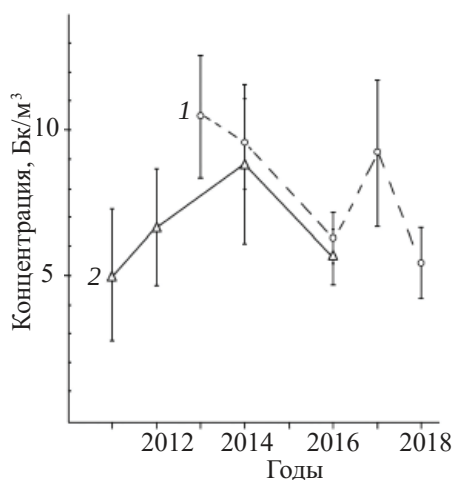


Рис. 2. ^{137}Cs в воде реки Вуокса, Бк/м³: 1 – в районе пос. Лесогорский, 2 – в районе пос. Лосево.

дожское озеро поступало меньше ^{137}Cs , чем по южному рукаву. В 1986 г. [12] концентрация ^{137}Cs в воде Вуоксы составила 150 Бк/м³, что в ~40 раз выше доаварийного уровня ^{137}Cs в воде реки. К маю, июлю 1988 г. концентрация слабо понизилась до 113 Бк/м³ из-за устойчивого загрязнения ^{137}Cs вод оз. Сайма. Кумулятивный запас ^{137}Cs в оз. Сайма и на его водосборе способствовали пролонгации загрязнения озерно-речной системы Вуоксы. По нашим данным, с 2016 по 2018 гг. концентрация ^{137}Cs в воде Вуоксы колебалась от 5 до 10 Бк/м³ (рис. 2) с тенденцией к более высоким значениям зимой, когда прекращалось поступление вод с местного водосбора. При низком содержании взвеси в р. Вуокса 0.2–6 мг/л и высокой скорости течения потери Cs в русле реки от истока у оз. Сайма до места впадения в Ладожское оз. были невысокими. В пункте Лесогорский, находящемся ближе к оз. Сайма (~24 км), чем п. Лосево, наблюдалось небольшое превышение концентрации ^{137}Cs по сравнению с пунктом Лосево. Если допустить, что воды оз. Сайма очищаются от ^{137}Cs с полупериодом времени $T = 6.5$ лет (данные по очистке озера от глобального ^{137}Cs [5]), то концентрация ^{137}Cs в воде Вуоксы (1988 г.) к 2016 г. должна снизиться до ~5.9 Бк/м³. На сопоставимое время 2017–2018 гг. в р. Вуокса ^{137}Cs было в 5 раз больше, чем в воде оз. Экостровская Имандра [14].

Ожидалось большее загрязнение ^{137}Cs грунтов оз. Суходольское, чем Вуокса, из-за различия в питании озер водами реки. В тоже время быстрая смена вод в оз. Суходольское способствовала выносу ^{137}Cs из водоема. Оз. Суходольское при длине 30 км

фактически является водохранилищем руслового типа с сильным течением и подпором вод со стороны Ладоги. В озере из-за чередования плесов с большими (до 20 м) и малыми глубинами имеются неодинаковые условия седиментации взвесей и накопления ^{137}Cs в грунтах дна. Плотность загрязнения ^{137}Cs (таблица) ДО станции 1 в оз. Суходольское в два раза больше, чем грунта станции 2 с фарватера русла (табл. 1). Донные отложения станций формировались в неодинаковых динамических условиях, что отразилось на механическом составе грунта. На станции 2 с фарватера русла слои керна 2–5, 5–8, 8–11 см характеризовались массой в 1.4–1.6 раза больше, чем на станции 1. Слои ДО 0–2 и 2–5 см со станции 2 имели большую массу, чем со станции 1.

Для глубоких озер с переменными глубинами в водоеме значительные различия в загрязнении дна ИРН закономерны [11, 15]. Плотность загрязнения ДО ^{137}Cs по данным 14 колонок из глубокого озера Великобритании Блелхам Тарн [15] изменялась от 13.5 до 2.6 при среднем 5.97 кБк/м². Влияние неодинаковых условий седиментации на загрязнения дна этого озера прослеживалось и по радионуклидам ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am . При пике концентрации глобального ^{137}Cs в профиле ДО на глубине 15 см седиментация составила 6.5 мм/год. При такой седиментации в профиле ДО наблюдалось два пика Cs, относящихся к поступлению радионуклида в ~1964 и 1986 гг. Значительные различия в загрязнении ^{137}Cs ДО больших проточных озер прослеживаются при анализе распределения радионуклида в профиле ДО. Нижние части кернов ДО оз. Вуокса и Имандра (рис. 3) характеризуются более высокой концентрацией ^{137}Cs в, чем в верхних частях. Такой тренд концентрации противоречит закономерности распределения ^{137}Cs в профиле ДО оз. Суходольского и станций с Ладоги. Здесь концентрации ^{137}Cs снижались от верхнего слоя керна к нижележащим слоям.

К объяснению наблюдаемых различий в загрязнении ДО озер ^{137}Cs приходится привлекать данные по механизмам, определяющим поступление и миграцию ^{137}Cs в ДО водоемов. Согласно теоретическим оценкам, [16] при скорости диффузии поллютанта 0.75×10^{-7} см²/с и скорости седиментации ≥ 1.0 см/год осаждение взвесей в водоеме становится ведущим механизмом очищения вод и загрязнения дна. По опытным дан-

ным [6], коэффициенты диффузии D в алевритовых илах олиготрофных озер Скандинавии составили $n \cdot (10^{-8} - 10^{-9}) \text{ см}^2/\text{с}$. При таких коэффициентах диффузии и невысокой седиментации «чернобыльский» ^{137}Cs до 1991 г. оставался в верхнем (0–2 см) слое грунта озер Скандинавского полуострова [6, 17]. В условиях низкой седиментации над загрязненным слоем грунта с «чернобыльским» ^{137}Cs медленно нарастал слой новых отложений. В выборке из 9 финских озер [18] скорость седиментации взвеси составила 0.6–17 мм/год. Используем глобальный ^{137}Cs в качестве метки седиментогенеза [8] и находим (рис. 2, профиль ^{137}Cs) для озер Вуокса и Имандра скорость осадконакопления 5.5 и 2.6 мм в год соответственно. Замедленный обмен вод в этих озерах (1.6–2.0 лет) способствовал накоплению на дне взвесей. При высокой седиментации в оз. Вуокса глобальный ^{137}Cs был захоронен на большую глубину грунта, чем в оз. Имандра. В озерах Вуокса, Блелхам Тарн [15] и Куяш [19] пик глобального ^{137}Cs находился в слое керна 14–16 см. В работах [15, 19, 20] неодинаковое содержание ^{137}Cs в кернах озер объяснялось влиянием гидрологических условий на седиментацию взвесей и на особенности рельефа дна на станциях наблюдений.

Содержание ^{137}Cs в кернах станций 1 и 2 с оз. Суходольское отражает комбинированное загрязнение радионуклидом глобальных выпадений и выброса с ЧАЭС. Скорость седиментации в районе станций была низкой. Поэтому 22-летняя разница в поступлении радионуклидов в водоем (1964–1986 гг.) четко не обозначилась в профиле ДО в виде отдельных пиков концентрации ^{137}Cs . Грубая оценка седиментации для станции 1 выполнена по допущению, что в слое 0–1 см содержится в основном ^{137}Cs «чернобыльской» аварии. По этой оценке, скорость седиментации равна $\sim 0.3 \text{ мм/год}$. Из-за низкой скорости седиментации и невысокой скорости диффузии ^{137}Cs основное количество радионуклида сохранилось в слое 0–5 см керна станций 1 и 2. Если в оз. Вуокса глубина миграции ^{137}Cs не ограничивалась слоем 29–32 см (рис. 3), то в ДО станций 1 и 2 профиль концентраций ^{137}Cs заканчивался следовыми количествами радионуклида на отметках керна менее 17 и 8 см соответственно. Для ДО станций 1 и 2 оз. Суходольское 34-летней экспозиции «чернобыльского» ^{137}Cs оказалось недостаточно для значительной миграции радионуклида в

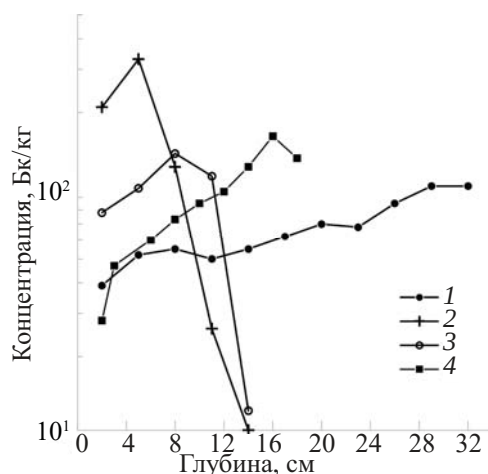


Рис. 3. ^{137}Cs в профиле ДО озер: 1 – Вуокса, 2 – Суходольское, 3 – Ладожское, 4 – Имандра.

толщу ДО. Высокая проточность озера ограничивала седиментацию взвеси, вследствие чего повысилась роль диффузионного механизма в миграции радионуклида в толщу ДО.

В [6, 15] приведены коэффициенты диффузии (D) ^{137}Cs $n \cdot (10^{-8} - 10^{-9}) \text{ см}^2/\text{с}$ в ДО озер. В ДО наблюдалась тенденция увеличения коэффициента диффузии ^{137}Cs с глубиной керна. Многолетняя экспозиция глобального ^{137}Cs в ДО озер позволяет оценить диффузию радионуклида в толще иловых отложений. Такая процедура была выполнена для ДО оз. Ладожское. Из-за присутствия в верхних слоях ДО «чернобыльского» ^{137}Cs к оценке диффузии глобального ^{137}Cs привлекали нижние слои керна, не содержащие этого радионуклида. Содержание ^{137}Cs в слоях ДО 12–14, 14–16, 16–18, 18–20 и 20–22 см составило 240, 190, 140, 78 и 15 Бк/кг сухой массы. Время экспозиции ^{137}Cs 1964–2020 гг. Коэффициент диффузии для слоёв 14–16 см и далее составил 3.0×10^{-8} , 1.75×10^{-8} и $0.68 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно. Эти значения D выше наблюдаемых $n \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ в верхних слоях ДО (0–2 см) озер Скандинавии при короткой экспозиции «чернобыльского» ^{137}Cs [6]. Полувековая диффузия глобального ^{137}Cs в илах Ладожского озера с $D \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ способствовала его миграции в толщу ДО. Коэффициенты диффузии Cs в ДО Ладожского озера согласуются со значением D [21], найденным для грунта оз. Байкал – $0.056 \text{ см}^2/\text{год}$.

Элемент Cs относится к рассеянными химическим элементам Земли. Время пребывания его ис-

кусственного радионуклида ^{137}Cs в геосфере не превышает 70 лет. Накопление ^{137}Cs в верхних слоях почв и в грунтах дна водоемов отражает лишь этап его долговременной миграции. В почвах [22] ^{137}Cs присутствует в трех химических формах: обменной, труднодоступной ионному обмену и фиксированной в кристаллитах минералов почв. В иловых отложениях белорусских озер [23] лишь часть ^{137}Cs , сорбированного илом, находилась на позициях селективной сорбции (FES), труднодоступных ионному обмену. Органические комплексы илов с минералами типа иллита наиболее прочно удерживали ^{137}Cs в поглощенном состоянии.

Доступность миграции ^{137}Cs в донных отложениях оз. Суходольское оценивали по содержанию обменной химической формы радионуклида, выделяемой в раствор 1 М NH_4Ac при соотношении фаз 1 : 10 и времени взаимодействия фаз 1 сут. Для этой процедуры выбирали слои керна, в которых содержание радионуклида позволяло корректно определить наличие обменной формы ^{137}Cs . Обменная форма ^{137}Cs в ДО оз. Суходольское определялась только в слоях грунта 11–14 и 17–20 см с повышенным содержанием ^{137}Cs 490 и 700 Бк/кг [6]. Доля обменного ^{137}Cs в упомянутых слоях керна составила 14.4 и 20.0% от вала соответственно. Большая часть ^{137}Cs находилась в фиксированной и труднодоступной ионному обмену химической форме. Низкое содержание в грунте обменного ^{137}Cs способствовало сохранению глобального ^{137}Cs в слое 29–32 см в виде пика концентрации [6]. За период 53-летнего пребывания глобального ^{137}Cs в донных отложениях станции пик его концентрации на глубине 29–32 см не был «размыт». В глубь донных отложений мигрировали подвижные химические формы ^{137}Cs . Для арктического и субарктического регионов страны отсутствуют данные, характеризующие физико-химическое состояние ^{137}Cs в ДО водоемов. Поэтому вопросы прогноза миграции ^{137}Cs при аварийных загрязнениях водоемов Севера и научного обоснования для них контрмер нуждаются в дополнительных экспериментальных исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено состояние загрязнения ^{137}Cs донных отложений глубоких проточных озер Северо-Западного региона.

РАДИОХИМИЯ том 65 № 5 2023

Объектами исследования являлись донные отложения речной системы р. Вуокса–Ладожское озеро и оз. Имандра, загрязненные преимущественно ^{137}Cs глобальных выпадений. ДО оз. Копанское с «чернобыльским» ^{137}Cs рассматривались как объекты сравнения. Плотность загрязнения ^{137}Cs ДО озер Вуокса и Суходольское составила 4.2–8.6 кБк/м², что в ~4 и ~2 раза меньше содержания ^{137}Cs в донном грунте оз. Копанское из зоны «чернобыльского» следа на Финском побережье. Содержание ^{137}Cs в водах р. Вуокса (2016–2018 гг.) составило 5.3–9.3 Бк/м³. По северному мелководному руслу Вуоксы в Ладогу поступало меньше ^{137}Cs , чем по южному рукаву через оз. Суходольское. Воды оз. Сайма – истока Вуоксы – остаются источником загрязнения ^{137}Cs реки и сопряженных с ней по стоку озер. Загрязнения ^{137}Cs дна плесов проточных озер зависят от гидрологических условий осадконакопления. В озёрах Вуокса и Имандра при седиментации более 2.5 мм/год концентрации ^{137}Cs повышались от верхнего слоя керна к более глубоким слоям; произошло захоронение ^{137}Cs в толще ДО. При седиментации менее 1.0 мм/год ^{137}Cs накапливался в верхнем слое кернов (станции оз. Суходольское, Ладожское); концентрации ^{137}Cs снижались от верхнего к нижним к слоям ДО. В илах Ладоги на глубине 14–23 см коэффициенты диффузии D глобального ^{137}Cs $n \cdot (10^{-8}) \text{ см}^2/\text{с}$ были в ~10 раз больше наблюдаемых в верхних слоях кернов озер Скандинавии при короткой экспозиции «чернобыльского» ^{137}Cs (1986–1992 гг.). Наблюдаемое распределение ^{137}Cs в ДО озер обусловлено сочетанием седиментогенеза и диффузии ^{137}Cs . На миграцию ^{137}Cs в толщу донных отложений влияет содержание в грунтах обменной химической формы радионуклида; её доля в илах оз. Суходольское составила 14–20% от общего.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00319, <https://rscf.ru/project/23-24-00319/>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смагин А.И. Экология водоемов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на Южном Урале. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. 204 с.
2. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАт, 2010. 384 с.
3. Вакуловский С.М., Газиев Я.И., Колесникова Л.В., Петренко Г.И., Тертышник Э.Г., Уваров А.Д. // Атом. энергия. 2006. Т. 100, Вып. 1. С. 68–74.
4. Стоун Д. Доклад о состоянии окружающей среды Арктики. АМАП: Программа арктического мониторинга и оценки. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 118 с.
5. Большианов Д.Ю., Бакунов Н.А., Макаров А.С. // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43, № 3. С. 328–335.
6. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Правкин С.А. // Радиохимия. 2019. Т. 61, № 1. С. 122–128.
7. Ремез В.П., Канивец В.В., Поляков В.В., Ремез Е.П. // Тр. Междунар. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». СПб: Гидрометеиздат, 2000. Т. 2. С. 673–678.
8. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю. // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 2. С. 170–172.
9. Поляков Ю.А. Радиоэкология и дезактивация почв. М.: Атомиздат. 1970. 303 с.
10. Дубасов Ю.В., Евдокимов А.В., Каменцев А.А., Саульский А.В., Чеплагина О.В. // Радиохимия. 2011. Т. 53, № 6. С. 559–564.
11. Бобров В.А., Калугин И.А., Клеркс Ж., Дучков А.Д., Щербов Б.Л., Степин А.С. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. С. 530–536.
12. Алексеенко В.А. // Радиохимия. 1997. Т. 39, № 2. С. 187–190.
13. Рахола Т., Саксен К., Костиаинен Э., Пухаккайнен М. // Радиохимия. 2006. Т. 48, № 6. С. 562–566.
14. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 гг. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева, С.М. Вакуловского, М.Н. Катковой, А.И. Крышева. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. С. 199.
15. Michel H., Barei-Funel G., Barci V., Andersson G. // Radiochim. Acta. 2002. Vol. 90. P. 747–752.
16. Сухоручкин А.К. // Метеорология и гидрология. 1985. № 7, С. 76–81.
17. Wathne B.M. AL:PE Acidification of Mountain Lakes: Palaeolimnology and Ecology: AL:PE 1 Report for Period April 1991–April 1993. EUR-OP, 1995. 292 p.
18. Ilus E., Saxen R. // J. Environ. Radioact. 2005. Vol. 82. P. 199–221.
19. Каблова К.В., Дерягин В.В., Левина С.Г., Сутягин А.А. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58, № 5. С. 517–523.
20. Страховенко А.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н., Восель Ю.С. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 11. С. 1501–1514.
21. Edgington D.N., Klump J.V., Robbins J.A., Kusner Yu.S., Pampura V.D., Sandirimov I.V. // Nature. 1991. Vol. 350. P. 601–604.
22. Cremers A., Elsen A., De Preter P., Maes A. // Nature. 1988. Vol. 335, N 6187. P. 247–249.
23. Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г. // Радиохимия. 2018. Т. 60, № 1. С. 93–96.

^{137}Cs Migration and Profile in Bottom Sediments of Deep Drainage Lakes, North-Western Russia

N. A. Bakunov, D. Yu. Bolshiyarov, A. O. Aksenov*

Arctic and Antarctic Research Institute, St Petersburg, 199397 Russia

**e-mail: aksenov2801@gmail.com*

Received March 20, 2023; revised July 05, 2023; accepted July 12, 2023

Modern contamination of global and «Chernobyl» ^{137}Cs in lake-river systems bottom sediments is estimated. Drainage lakes of North-Western Russia were investigated. Kopanskoe Lake, located south of the Gulf of Finland, is on the trail of the «Chernobyl» ^{137}Cs fallout, whereas Ladoga, Sukhodolskoe, Vuoksa, Imandra lakes are located at its periphery, in Karelia and Kola Peninsula. Following parameters are distinguished: lakes bottom ^{137}Cs pollution density (kBq/m^2), distribution of ^{137}Cs in the profile of bottom sediments, ^{137}Cs diffusion coefficients (D) in bottom sediments and content of the exchange chemical form of the radionuclide. ^{137}Cs contamination of the lakes was formed due to suspended matter sedimentation with ^{137}Cs , ^{137}Cs sorption and diffusion in bottom sediments. With sedimentation ≥ 3 mm/year, the concentration of ^{137}Cs increased from the top to the bottom of the core (lakes Vuoksa, Ekostrovskaya Imandra), reflecting the gradual process of ^{137}Cs migration into the sediments. The opposite trend of ^{137}Cs concentration was observed in the bottom sediments of lakes Ladoga and Sukhodolskoe with sedimentation ≤ 0.5 mm/year. Here ^{137}Cs diffusion with $D = (0.5\text{--}6.2) \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ caused slow radionuclide transfer in the bottom sediments. The main supply of ^{137}Cs was contained in the top layer 0–5 cm. 14.4–20 % of absorbed ^{137}Cs in lake Sukhodolskoye bottom sediments were in an exchange chemical form, extracted into solution 1 M NH_4Ac .

Keywords: ^{137}Cs , lakes, bottom sediments, ^{137}Cs supply, sorption, diffusion