

СТОК  $^{137}\text{Cs}$  ИЗ ОЗЕРА САЙМА В РЕКУ ВУОКСА И В ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО

© 2025 г. Н. А. Бакунов, Д. Ю. Большианов, С. А. Правкин\*, А. О. Аксенов

*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,  
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38**\*e-mail: s.pravkin@aari.ru*

Получена 22.10.2024, после доработки 06.02.2025, принята к публикации 06.02.2025

Изучена миграция  $^{137}\text{Cs}$  из верховья р. Вуокса — оз. Сайма — в Ладожское озеро с целью выяснения роли реки в загрязнении Ладоги цезием-137 от аварийного выброса с ЧАЭС. За время миграции  $^{137}\text{Cs}$  1988–2024 гг. его концентрация в воде реки снизилась с 113 до  $\approx 4.0$  Бк/м<sup>3</sup>. К 2015 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса приблизилось к уровню 4–5 Бк/м<sup>3</sup>, отвечающему доаварийному загрязнению речных вод глобальным  $^{137}\text{Cs}$ . Снижение содержания “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  в р. Вуокса аппроксимировано двухкомпонентной экспоненциальной зависимостью с полупериодами очищения вод  $T_1 = 5$  и  $T_2 = 25$  лет соответственно. Вынос “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  с водами Вуоксы в 1986–2023 гг. из финляндского оз. Сайма составил 22.5 ТБк — величину, грубо сопоставимую с выпадением “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  на оз. Ладожское оз. в 1986 г. (74.1 ТБк). За 1986–1988 гг. вынос “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  из оз. Сайма составил  $\approx 30\%$  от общего выноса в 1986–2024 гг. Следствием многолетнего транзита  $^{137}\text{Cs}$  из оз. Сайма стало повышенное накопление  $^{137}\text{Cs}$  ( $\approx 300$  Бк/кг) в профиле иловых отложений р. Вуокса и озер ее бассейна.

**Ключевые слова:** цезий-137, озеро, река, концентрация, сток вод, донные отложения**DOI:** 10.31857/S0033831125020096

## ВВЕДЕНИЕ

В радиоэкологии искусственных радионуклидов (ИРН) значительное внимание уделяется их миграции в сопряженных по стоку водных системах [1–9]. На Кольском полуострове работает Кольская АЭС и размещены стоянки морских судов с ядерными энергетическими установками. В соседней с Россией Финляндии при двух АЭС эксплуатируется 5 промышленных реакторов. При работе АЭС в нормируемых выбросах и сбросах ИРН в окружающую среду присутствуют  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . После распада короткоживущего  $^{134}\text{Cs}$  в экосистемах остается  $^{137}\text{Cs}$  с  $T_{\text{физ}} = 30$  лет. Размещение в Арктике плавучих АЭС и планируемое применение в регионе АЭС модульного типа повышают актуальность исследования долговременной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в водных системах арктических и субарктических территорий [7].

Озеро Сайма, река Вуокса и Ладожское озеро являются водной системой, сопряженной по стоку. Выпадение “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  на исток р. Вуокса было неравномерным. На западную часть озера и его водосбор выпало в  $\approx 2.5$  раза больше  $^{137}\text{Cs}$ , чем на восточную часть на границе с Россией, где уровень составил  $\approx 6$  кБк/м<sup>2</sup> [6]. В 2008–2009 гг. концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса была выше, чем в реках Волхов, Свирь, Нева [8]. Сток  $^{137}\text{Cs}$  с водами Вуоксы составил  $\approx 50\%$  от стока Невы. Из-за большого выпадения  $^{137}\text{Cs}$  на оз. Сайма (6–23 кБк/м<sup>2</sup>), чем на Ладожское озеро, различие в годовом стоке рек Вуоксы и Невы ( $\approx 18$  и  $\approx 54$  км<sup>3</sup>/год соответственно) привело лишь к двукратному превышению стока

$^{137}\text{Cs}$  с водами Невы. Уровень  $^{137}\text{Cs}$  в воде оз. Сайма в 1988 г. (59.5 Бк/м<sup>3</sup>) был выше такового в Ладожском озере (8–16 Бк/м<sup>3</sup>) [2, 3, 5]. На коротком расстоянии (около 24 км) от истока (оз. Сайма) в русле р. Вуокса расположено 4 ГЭС, принадлежащих Финляндии и России. Их роль в формировании загрязнения вод реки цезием-137 неясна. Для системы река–водохранилище обнаружен [9] и объяснен “приплотинный эффект” — локальная седиментация наиболее тяжелой компоненты взвеси в русле реки с искусственными и естественными радионуклидами из-за снижения скорости течения. При близком размещении 4 ГЭС их работа могла влиять на “приплотинный эффект” и транзит  $^{137}\text{Cs}$  с водами реки.

Каскад удаленных друг от друга ГЭС р. Днепр в 1986 г. работал в режиме, обеспечивающем вынос загрязненных радионуклидами вод в Черное море. Роль вод р. Вуокса как источника “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  для Ладожского озера отчетливо видна при сравнении стока  $^{137}\text{Cs}$  с водами Вуоксы и Невы в 2008–2009 гг. Из Ладожского оз. в Финский залив с водами Невы поступило 0.239 ТБк  $^{137}\text{Cs}$ , а приток  $^{137}\text{Cs}$  в озеро с водами Вуоксы составил 0.111 ТБк [8].

Задача исследования состояла в количественной оценке естественного очищения вод р. Вуокса от  $^{137}\text{Cs}$  и в определении трансграничного переноса  $^{137}\text{Cs}$  из оз. Сайма с водами Вуоксы в Ладогу. Объектом исследования стали воды р. Вуокса, загрязненные  $^{137}\text{Cs}$ . В методологии исследования принимали, что снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в воде реки обусловлено воздействием на миграцию  $^{137}\text{Cs}$  факторов

разной природы; концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воде снижалась с уменьшением поступления радионуклида с водосбора, физического распада и захоронения  $^{137}\text{Cs}$  в толще донных отложениях водоема.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения за  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса и в озерах ее бассейна в 2012–2019 гг. проводили в пунктах Каменногорск, Лосево и в оз. Суходольское и Вуокса южного и северного рукавов стока реки соответственно (рис. 1). С 2020 по 2024 г.  $^{137}\text{Cs}$  определялся в водах р. Бурная, замыкающей южный рукав р. Вуокса перед ее впадением в Ладожское озеро. Пробы воды объемом 65–115 л отбирали в первой половине гидрологического года с установлением зимнего типа стратификации вод в 2–3 м от берега (зимой со льда) в 28-литровые полиэтиленовые канистры, куда добавляли концентрированную  $\text{HCl}$  для предотвращения сорбции  $^{137}\text{Cs}$ . Воду в четырех канистрах доставляли в стационар, где она отстаивалась при комнатной температуре в течение 3 сут для отделения взвеси. Время отстаивания определяли с учетом

известного расчета седиментации частиц разного диаметра по закону Стокса из столба 1 м пресных вод и опыта выделения радионуклидов из проб больших объемов [10, 11]. Для осаждения частиц с диаметром 0.01 и 0.001 мм из столба 1 м необходимо отстаивание в течение 2 ч и  $\approx 8$  сут соответственно [10]. Для осаждения частиц диаметром  $\geq 0.001$  мм из столба воды в 35–40 см при скорости 0.0015 мм/с достаточно 3 сут. При сифонировании на горловину канистры устанавливали пластмассовый цилиндр с отверстием для шланга. Метка на шланге указывала уровень, до которого можно опускать шланг. На конце шланга находился оголовок с заборными отверстиями, закрытыми нейлоновой тонкоячеистой светлой сеткой 200 меш. После сифонирования на дне канистры оставался слой воды в 2.5 см над донным осадком; взмучивания осадка не было; светлая сетка оголовника шланга не содержала следов взвеси. Отстаивание пробы в течение 3 сут освобождало водную фазу от частиц размером  $\geq 0.001$  мм.

Присутствие в пробе вод р. Вуоксы частиц псевдоколлоидной фракции не может быть значительным по следующим причинам. Пробы отбирали

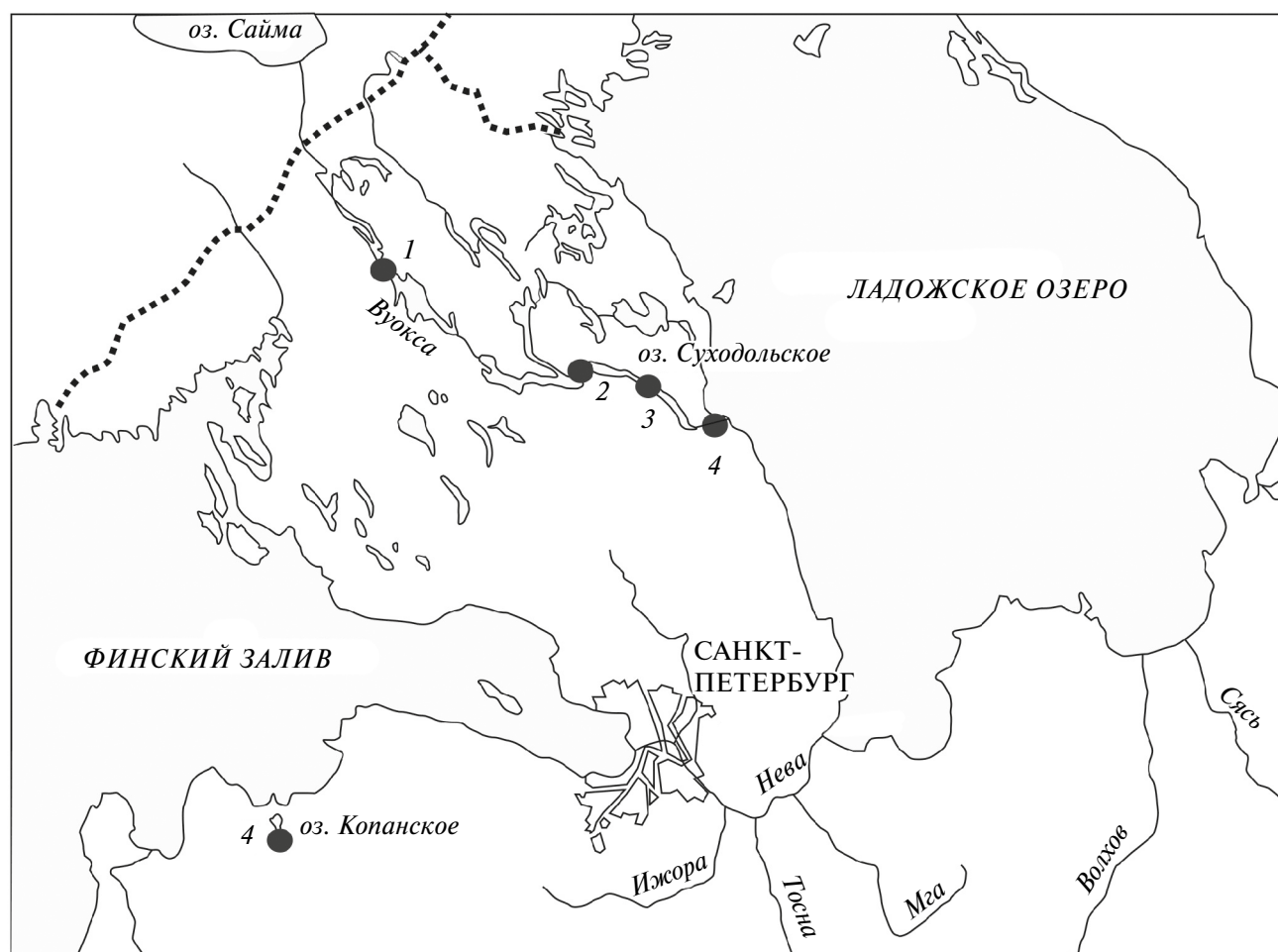


Рис. 1. Схема наблюдений за  $^{137}\text{Cs}$ . Пункты наблюдений: 1 – Лесогорский, 2 – Лосево, 3 – оз. Суходольское, 4 – р. Бурная, 5 – оз. Копанское.

в первой половине гидрологического года, когда содержание планктона в воде минимально, а поверхностный сток от малых рек и ручьев, обогащенный органическими веществами, прекращается из-за морозов. Высокая прозрачность вод, низкое содержание взвеси и органического вещества свойственны водам р. Вуоксы [12]. В приплотинном участке Лесогорской ГЭС (1985–1987) содержание взвеси изменялось от 0.2 до 5.7 мг/л для наблюдений в 5, 8 и 10 месяцах года. При массе взвеси 20 г/м<sup>3</sup> в пробах вод 60 и 80 л будет содержаться соответственно 12 и 18 г взвеси с малым количеством твердой фазы. Речная взвесь более грубая по гранулометрическому составу, чем взвесь озер, поэтому во взвеси вод р. Вуоксы можно ожидать лишь следовые количества частиц фракции диаметром меньше 0.001 мм. Высокая прозрачность и низкое содержание органических веществ в русле реки [12] относятся к факторам, ограничивающим миграцию <sup>137</sup>Cs в составе органо-минеральных комплексов [13]. Методика поглощения <sup>137</sup>Cs сорбентом АНФЕЖ и измерение сорбента по гамма-излучению не изменялись [8, 14]. Ошибка определения <sup>137</sup>Cs в пробах воды не превышала 35%.

Конспективно остановимся на характеристике р. Вуокса и выпадении “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs на ее водосбор. Около 90% водосбора Вуоксы находится в Финляндии. Русло Вуоксы на территории России не имеет значительного притока поверхностных вод от малых рек. Истоком Вуоксы является глубокое ( $H_{\text{ср.}} = 20$  м) оз. Сайма с объемом вод 36 км<sup>3</sup>. На западную часть водосбора озера “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs выпало больше, чем на границе с Россией — ≈6 кБк/м<sup>2</sup> [6]. В реках в 1984–1985 гг. [15, 16] содержалось 3.0–4.5 Бк/м<sup>3</sup> <sup>137</sup>Cs. С выпадением “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs уровень радионуклида в реках повысился в ≈30–40 раз [5].

В сводке уровней “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в реках Финляндии [5, 6, 15] данных по загрязнению вод р. Вуокса нет. Однако приводятся данные о содержании <sup>137</sup>Cs в июле 1986 г. в оз. Сайма — 250 Бк/м<sup>3</sup>. Нам известно начальное загрязнение р. Вуокса на территории России в 1986 и 1988 г. [2, 3] и конечное в 2012–2023 гг. Реконструкция уровней <sup>137</sup>Cs в р. Вуокса проведена с использованием двухкомпонентной экспоненциальной модели снижения <sup>137</sup>Cs в воде реки.

$$U_t = U_0^{-\lambda t} \{ (K_1 \exp(-0.693t/T_1) + K_2 \exp(-0.693t/T_2)) \},$$

где  $U_t$  — концентрация <sup>137</sup>Cs в воде на время  $t$ , Бк/м<sup>3</sup>;  $U_0$  — начальная концентрация <sup>137</sup>Cs в воде, Бк/м<sup>3</sup>;  $K_1$  и  $K_2$  — вклады (в долях) компонент, равные 0.80 и 0.20 соответственно;  $-\lambda$  — поправка на распад <sup>137</sup>Cs;  $T_1$  и  $T_2$  — полупериоды очищения вод 5 и 25 лет соответственно. Значения  $T_1$  и  $T_2$  выбирали с учетом накопленных знаний о миграции <sup>137</sup>Cs в озерно-речных системах северо-западного региона и роли физического распада <sup>137</sup>Cs в очищении вод [2, 6, 8, 15, 16]. В принципе очищение вод реки от <sup>137</sup>Cs

невозможно раньше почв водосбора, с которого радионуклид поступает в речную сеть. Речные воды от “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в ≈1986–2000 гг. очищались с полупериодом времени  $T = 5$ –6 лет [5, 6]. Воды большой реки с быстрым течением очищались от <sup>137</sup>Cs с  $T = 3.5$  лет [1]. Значение  $T_2$  для медленной компоненты экспоненты выбирали после анализа очищения верхнего слоя непаханных почв (0–5 см) от <sup>137</sup>Cs. По данным работы [17], содержание “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в почве снижалось с полупериодом  $T \approx 25$  лет. Значение  $U_0$  <sup>137</sup>Cs определяли после изучения загрязнения <sup>137</sup>Cs вод оз. Сайма и р. Вуокса в 1986–1988 гг. [2–6, 15]. По единичным наблюдениям 1986 и 1988 г. концентрация <sup>137</sup>Cs в воде р. Вуокса [2, 3] равнялась 150 и 113 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. В расчетах по модели уровень <sup>137</sup>Cs 113 Бк/м<sup>3</sup> принят за  $U_0$ , а время миграции  $t$  — с 1988 г. Наблюдения 1986–1988 гг. отражают быстрое изменение уровней “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в водоемах до установления псевдоравновесных концентраций <sup>137</sup>Cs в системе вода–донные отложения. Поэтому оценки содержания <sup>137</sup>Cs в водоемах (1986–1988) носят приближенный характер.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен тренд концентраций <sup>137</sup>Cs в р. Вуокса (1989–2024), рассчитанный по модели. Рисунок дополнен опытными данными о содержании <sup>137</sup>Cs в воде реки (1988 и 2012–2024). Временной ряд концентраций <sup>137</sup>Cs характеризуется замедлением очищения вод от <sup>137</sup>Cs с течением времени. Содержание <sup>137</sup>Cs (1988–2015) в водах Вуоксы уменьшилось с 113 до ≈5 Бк/м<sup>3</sup>. Фактически содержание <sup>137</sup>Cs в воде реки в 2020 г. приблизилось к уровню ≈3.5–4.5 Бк/м<sup>3</sup>, наблюдаемому в финляндских реках до аварии на ЧАЭС [5, 15]. В устье реки Бурная — южном участке стока р. Вуокса — концентрации <sup>137</sup>Cs в 2019, 2020 и 2024 г. составили 6.6, 5.3 и 4.4 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. К обозначенным датам данные опыта близки расчетным по модели (рис. 2).

Снижение содержания “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в воде озерно-речных систем северо-западного региона [2, 3, 6, 8, 15, 16] характеризовалась двумя этапами; относительно быстрым (1986–1989) и замедленным в последующие годы (1990–2024). Переход уровней “чернобыльского” <sup>137</sup>Cs в водоемах северо-западного региона России к псевдоравновесной концентрации в системе вода–дно завершился к ≈1989–1991 гг. [2, 5, 6]. Такая концентрация <sup>137</sup>Cs во временном ряду наблюдений [2, 6] характеризуется слабым трендом снижения, который в аномальные по погодным условиям годы может маскироваться флуктуацией уровней.

По экспоненциальной модели рассчитаны концентрации <sup>137</sup>Cs в воде р. Вуокса в 1989–2023 гг. (табл. 1). Сток <sup>137</sup>Cs приведен за 5-летние отрезки времени с указанием средней концентрации <sup>137</sup>Cs

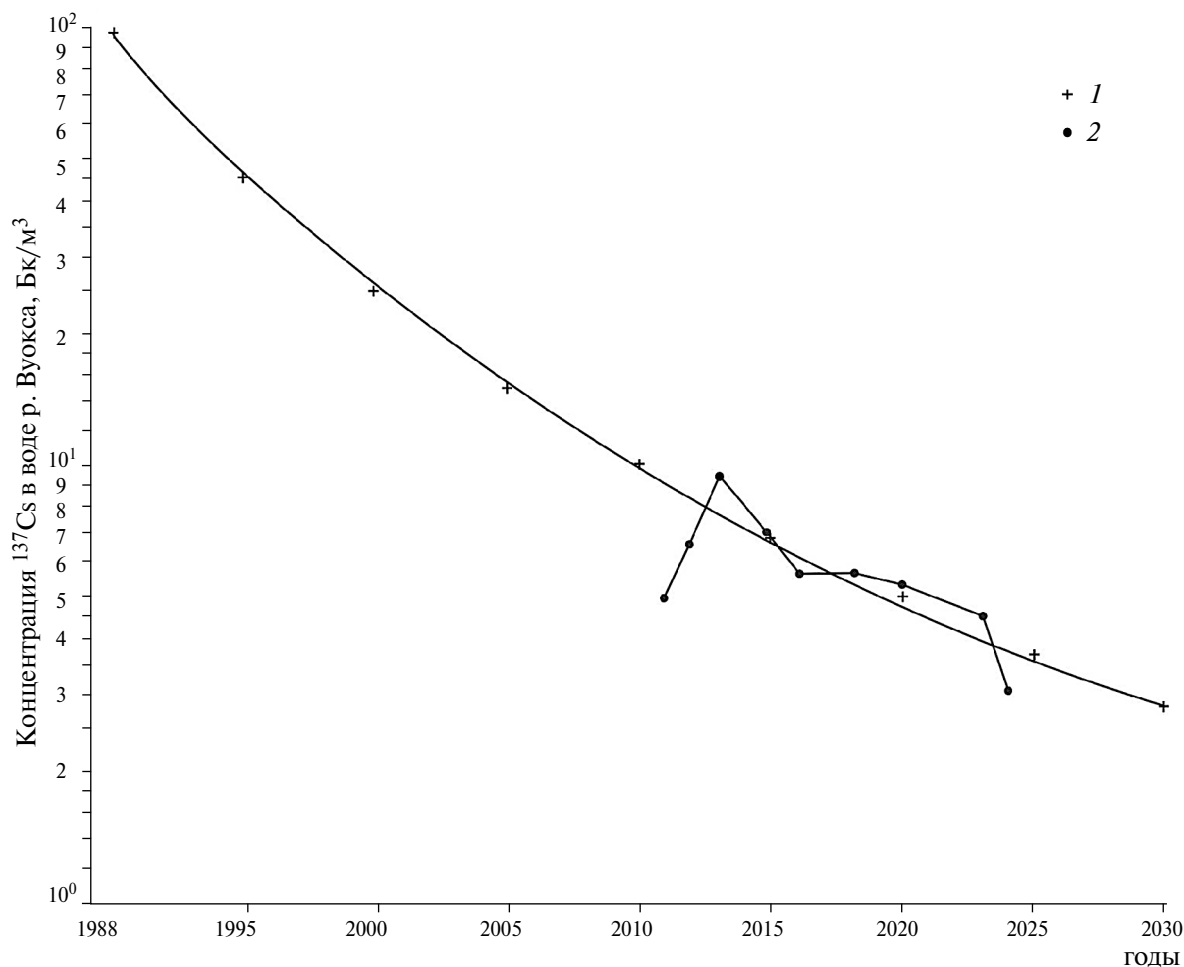


Рис. 2. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса: 1 — рассчитанная по модели, 2 — определенная опытным путем.

Таблица 1.  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса (Бк/м³) и сток радионуклида (ТБк), данные расчета

Годы	$^{137}\text{Cs}$ в воде, Бк/м³	Сток $^{137}\text{Cs}$ , ТБк
1988	113.0	2.09
1990–1994	67.1	6.21
1995–1999	35.8	3.32
2000–2004	20.8	1.92
2005–2009	12.9	1.21
2010–2014	8.68	0.81
2015–2019	6.10	0.56
2020–2023	4.5	0.34

в воде. В таблицу занесено экспериментальное определение  $^{137}\text{Cs}$  в воде реки в 1988 г., привлекаемое к обсуждению начального этапа загрязнения вод реки до установления псевдоравновесной концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в системе вода–донные отложения. Сток вод по сезонам года у Вуоксы относительно выровнен, поэтому в расчетах использовалось среднее значение  $18.5 \text{ км}^3/\text{год}$ .

За 1990–2023 гг. концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воде уменьшилась с 67.1 до 4.5 Бк/м³. К 2023 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$

в воде Вуоксы сблизилось с уровнем  $^{137}\text{Cs}$ , наблюдаемым в реках в доаварийный период [5, 6, 15]. Сток  $^{137}\text{Cs}$  за 1989 г. равен 1.81 ТБк, а суммарный сток 1989–2023 гг. — 16.18 ТБк.

Оценка стока  $^{137}\text{Cs}$  за период 1986–1988 гг. в значительной степени условна из-за быстрого снижения уровней  $^{137}\text{Cs}$  в воде. По опытным данным [2, 3], концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воде р. Вуокса в 1986 и 1988 г. равна 150 и 113 Бк/м³. За май–декабрь 1986 г. вынос  $^{137}\text{Cs}$  со стоком Вуоксы из оз. Сайма

составил 1.84 ТБк. Концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в воде реки в 1987 г. принимаем как среднее между значениями 1986 и 1988 г. — 131.5 Бк/м<sup>3</sup>. По этому уровню сток составил 2.43 ТБк. Таким образом, суммарный сток за 1986–1988 гг. определен в 6.36 ТБк, а за 1986–2023 гг. — 22.5 ТБк. Из этой величины стока по экспериментальным наблюдениям подтверждается сток  $^{137}\text{Cs}$  за 1986, 1988 и 2012–2024 гг. в 5.4 ТБк. Вынос  $^{137}\text{Cs}$  р. Вуокса из оз. Сайма (1986–1988) составил 28.6% от суммарного стока за 37 лет. Сравнение стока  $^{137}\text{Cs}$  с водами Вуоксы (22.5 ТБк) с выпадением “чернобыльского”  $^{137}\text{Cs}$  на Ладожское оз. (74.1 ТБк) [4] показывает значимую роль трансграничного переноса  $^{137}\text{Cs}$  в сопряженной по стоку системе. Часть  $^{137}\text{Cs}$  при миграции в системе оз. Сайма–р. Вуокса–Ладожское оз. сорбировалась донными отложениями русла Вуоксы и донными отложениями озер бассейна реки [8, 18, 19]. При сорбции  $^{137}\text{Cs}$  из пресных вод взвесью и донными отложениями коэффициент распределения  $K_d$  достигает  $n \cdot 10^4$  л/кг [9, 19].

Более высокий сток вод р. Вуокса по южному рукаву через оз. Суходольское, чем по северному, способствовал повышенному накоплению  $^{137}\text{Cs}$  в иловых отложениях водоема — до 300 Бк/кг сухой массы. В Ладожском озере в районе устья р. Вуокса также отмечалось устойчивое загрязнение илов  $^{137}\text{Cs}$  на уровне 1.46 кБк/м<sup>2</sup>. Многолетнее поступление  $^{137}\text{Cs}$  из оз. Сайма в р. Вуокса не прошло бесследно [8, 18, 19]; иловые отложения р. Вуоксы до бифуркации русла содержат больше  $^{137}\text{Cs}$ . Здесь содержание  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях двух станций составило 43 кБк/м<sup>2</sup> — величину, соизмеримую с загрязнением донных отложений оз. Копанское из зоны “чернобыльского” следа в Ленинградской области [18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью двухкомпонентной экспоненциальной модели реконструировано загрязнение вод р. Вуокса “чернобыльским”  $^{137}\text{Cs}$  (1989–2023) и определен его сток 16.18 ТБк в Ладожское озеро. Суммарный вынос из оз. Сайма  $^{137}\text{Cs}$  с оценкой стока в 1986–1988 гг. составил 22.5 ТБк. Показано, что в 1986–1988 гг. вынос  $^{137}\text{Cs}$  из оз. Сайма — истока Вуоксы — составил  $\approx 30\%$  от общего за 38 лет. Следствием длительной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в сопряженной по стоку системе оз. Сайма–р. Вуокса–Ладожское оз. стало повышенное накопление радионуклида в донных отложениях русла Вуоксы и озер ее бассейна.

## 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. Вакуловский С.М., Тертышник Э.Г., Кабанов А.И. // Атом. энергия. 2008. Т. 105. Вып. 5. С. 285–291.
2. Агапов А.М., Беленький М.И., Гаврилов В.М., Гритченко З.Г., Иванова Л.М., Конопаткин А.С. и др. // Радиохимия. 2003. Т. 45. № 4. С. 370–374.
3. Алексеенко В.А. // Радиохимия. 1997. Т. 39. № 2. С. 187–190.
4. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Макаров А.С. // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 5. С. 521–529.
5. Saxen R., Koskelainen U. Radioactivity of surface water and freshwater fish and Finland in 1988–1990, Supplement 6 to Annual Report STUK-A89, Helsinki, 1991.
6. Рахола Т., Саксен К., Костийайнен Э., Пухакайнен М. // Радиохимия. 2006. Т. 48. № 6. С. 562–566.
7. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Билашенко В.П., Баринов В.Н., Киселев А.Е., Маркаров В.Г. и др. // Атом. энергия. 2008. Т. 104. Вып. 3. С. 178–187.
8. Большианов Д. Ю., Бакунов Н.А., Макаров А.С. // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 328–335.
9. Христианова Л.А., Аникиев В. В., Виноградова Н.Н. Распределение радиоактивных изотопов в системе водохранилища. М.: Атомиздат, 1973. 20 с.
10. Богословский Б.Б. Озероведение. М.: МГУ, 1960. 336 с.
11. Полуэктов Н.С., Мищенко В.Т., Кононенко Л.И., Бельтюкова С.В. Аналитическая химия стронция. М.: Наука, 1978. 223 с.
12. Антонов А.Е. Ландшафты и гидрология лососевых рек Ладожского озера. СПб.: ГОСНИОРХ, 2003. 316 с.
13. Wei X., Pan D., Xu Zh., Xian D., Li X., Tan Zh. Et al. // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 768. P. 144–174.
14. Ремез В.П., Канивец В.В., Поляков В.В., Ремез Е.П. // Тр. Междунар. конф. “Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях”. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. Т. 2. С. 673–678.
15. Саксен Р., Илус Э., Синкко К., Сьелом К.-Л., Ойала Я., Лазарев Л.Н. и др. Исследование радиоактивного загрязнения Балтийского моря в 1984–1985 гг. М.: ЦНИИатоминформ, 1988. 24 с.
16. Гаврилов В.М., Гритченко З.Г., Иванова Л.М., Орлова Т.Е., Тишков В.П., Тишкова Н.А. // Радиохимия. 1990. Т. 32. № 3. С. 171–179.
17. Иванов Ю.А., Кашпаров В.А., Левчук С.Е., Зварич С.И. // Радиохимия. 1996. Т. 38. № 3. С. 264–271.
18. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Аксенов О.А. // Радиохимия. 2023. Т. 65. № 5. С. 466–473.
19. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Правкин С.А. // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 1. С. 84–88.

**Discharge of  $^{137}\text{Cs}$  from Lake Saimaa into the Vuoksa River and Lake Ladoga****N. A. Bakunov, D. Yu. Bolshiyarov, S. A. Pravkin\*, and A. O. Aksenov***Arctic and Antarctic Research Institute, ul. Beringa 28, St. Petersburg, 199397 Russia**\*e-mail: s.pravkin@aari.ru*

Received October 22, 2024; revised February 6, 2025; accepted February 6, 2025

The migration of  $^{137}\text{Cs}$  from the upper reaches of the Vuoksa River, Lake Saimaa, to Lake Ladoga was studied to determine the role of the river in the contamination of Lake Ladoga with  $^{137}\text{Cs}$  from the Chernobyl accident. During the migration period from 1988 to 2024, the concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in the river water decreased from 113 to approximately 4.0 Bq/m<sup>3</sup>. By 2015, the  $^{137}\text{Cs}$  content in the Vuoksa River had approached the pre-accident level of 4–5 Bq/m<sup>3</sup>, which was due to global  $^{137}\text{Cs}$  contamination of river waters. The decrease in “Chernobyl”  $^{137}\text{Cs}$  in the Vuoksa River was approximated by a two-component exponential dependence with the water purification half-lives of  $T_1 = 5$  and  $T_2 = 25$  years, respectively. The discharge of “Chernobyl”  $^{137}\text{Cs}$  with Vuoksa’s waters from Finnish Lake Saimaa in 1986–2023 amounted to 22.5 TBq – a value roughly comparable to the deposition of “Chernobyl”  $^{137}\text{Cs}$  (74.1 TBq) on Lake Ladoga in 1986. During 1986–1988, the discharge of “Chernobyl”  $^{137}\text{Cs}$  from Lake Saimaa amounted to approximately 30% of the total for 1986–2024. The long-term transit of  $^{137}\text{Cs}$  from Lake Saimaa has led to increased accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  ( $\approx 300$  Bq/kg) in the sediment profile of the Vuoksa River and the lakes within its basin.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , lake, river, concentration, water discharge, bottom sediments