

На правах рукописи

КУЗЬМЕНКОВА Наталья Викторовна

**ДОННЫЕ ОСАДКИ ВОДОЁМОВ КАК ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ
АРХИВ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В
ИНДУСТРИАЛЬНУЮ ЭПОХУ**

Специальность 1.6.21 — Геоэкология (географические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени доктора
географических наук**

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте географии Российской академии наук

Научный консультант: доктор географических наук, профессор [фамилия, имя, отчество]

Официальные оппоненты:

[фамилия, имя, отчество], доктор наук, [должность, организация]

[фамилия, имя, отчество], доктор наук, [должность, организация]

[фамилия, имя, отчество], доктор наук, [должность, организация]

Ведущая организация: [наименование организации]

Защита состоится [дата] в [время] на заседании диссертационного совета [шифр совета] при [организация] по адресу: [адрес].

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке [организация] и на сайте [адрес сайта].

Автореферат разослан [дата].

Учёный секретарь диссертационного совета, [учёная степень] [фамилия, инициалы]

ДОННЫЕ ОСАДКИ ВОДОЁМОВ КАК ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ АРХИВ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ИНДУСТРИАЛЬНУЮ ЭПОХУ

Специальность 1.6.21 — Геоэкология (географические науки)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Геоэкология и радиоэкология в последние десятилетия переходят от локального мониторинга отдельных водных объектов к количественному описанию потоков вещества в масштабе целых бассейнов. Такой переход требует источников непрерывной, хронологически привязанной информации о состоянии территории. Донные отложения озёр относятся к немногим природным архивам, отвечающим этому требованию: благодаря барьерным свойствам осадка в них последовательно фиксируется запись процессов, шедших на водосборе и в самом водоёме.

Рассматриваемый временной интервал — последние ~150 лет, определяется как периодом активной индустриализации, так и разрешающей способностью использованных методов: датирование по неравновесному ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ года) охватывает 5–7 периодов полураспада, т.е. около 100–150 лет [Appleby, Oldfield, 1978], а маркерные горизонты ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ фиксируют события 1954–1963 гг. и 1986 г. Способность ряда нуклидов прочно закрепляться на твёрдых частицах превратила их в удобные трассеры процессов, идущих на земной поверхности: выпавшие на акваторию и водосбор, они быстро фиксируются донными отложениями, что позволяет восстановить историю воздействия естественных и техногенных источников радиоактивности и оценить темпы осадконакопления за отдельные интервалы времени.

Одновременно та же эпоха отмечена беспрецедентной трансформацией ландшафтов. Распашка, сведение лесов, промышленное и инфраструктурное строительство ускорили плоскостную эрозию, активизировали русловые процессы и вызвали повсеместное перераспределение вещества, включая связанные с частицами радионуклиды. Реконструкция динамики этих изменений по высокоразрешающим природным архивам представляет собой самостоятельную научную проблему.

Несмотря на очевидные достижения озероведения и радиоэкологии, ряд задач остаётся нерешённым. В частности, отсутствуют общепринятые физически обоснованные модели осадконакопления с использованием радиоактивных маркеров в пресных озёрах, которые учитывали бы географические

характеристики самого объекта и могли бы служить универсальным средством решения прикладных задач — например, оценки изменения стока наносов с водосборов как индикатора климатических сдвигов последних 150 лет.

Особую остроту проблеме придаёт методологический разрыв, существующий в лимнорадиоэкологии. Классические геохронологические модели — постоянной скорости поступления (CRS) и постоянной начальной концентрации (CIC) — трактуют атмосферный поток радионуклидов как изолированный вектор и оставляют без внимания морфометрический фактор: отношение площади водосбора к площади зеркала водоёма ($S_{\text{вдсб}}/S_{\text{оз}}$), известное как показатель улавливания, или коэффициент озёрности. Между тем в системах с высоким значением этого показателя вторичное эрозионное поступление нуклидов с твёрдым стоком суши нередко превосходит прямые атмосферные выпадения. Результат — искажение вертикальных профилей активности и систематические ошибки при расчёте скоростей линейного и массового осадконакопления.

К моменту начала настоящего исследования в Российской Федерации не существовало теоретически обоснованных подходов к сквозному учёту ландшафтных характеристик водосборов при радиоизотопном датировании осадков; имеющиеся данные оставались разрозненными и не были обобщены в рамках единой методологической концепции, а отечественная информация практически не входила в международные базы данных по осадконакоплению.

Степень разработанности темы

Диссертация продолжает линию исследований, заложенную работами, в которых радионуклиды впервые были применены для изучения осадконакопления в пресных водоёмах. Основы изотопных математических моделей датирования озёрных кернов и оценки баланса наносов созданы P.G. Appleby, F. Oldfield, J.A. Robbins и G.J. Brunskill; в отечественной радиохимической школе и школе радиоактивности окружающей среды это направление развивали С.Н. Калмыков, Б.Ф. Мясоедов, Ю.А. Сапожников и Р.А. Алиев.

Применение ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ для количественной параметризации эрозии и плоскостного смыва на водосборах, а также для оценки вторичного терригенного притока наносов в замыкающие озёрные котловины связано с трудами D.E. Walling, P.J. Owens, W.H. Blake, O. Evrard, L. Mabit и P. Porto. Исследования систем «водосбор — водоём» получили глубокое развитие в работах В.Н. Голосова, Н.С. Касимова, А.В. Коноплева, М.Ю. Лычагина, Ю.А. Израэля, С.В.

Мамихина, А.И. Щеглова, В.Р. Беляева, М.В. Маркелова, А.Ю. Сидорчука, В.Г. Линника и М.М. Иванова.

Представления о том, что вынос наносов не определяется одной лишь площадью бассейна, развиты в работах D.E. Walling, J. de Vente, J. Poesen, G. Verstraeten и M. Vanmaercke, показавших неоднозначность связи удельного стока наносов с площадью водосбора; количественный аппарат оценки склоново-русловых связей создан L. Borselli, M. Cavalli и T. Heckmann (индекс связности наносов), а роль орографического контроля эрозии раскрыта G.H. Roe, D.W. Burbank и B. Bookhagen. В отечественной традиции различия горных и равнинных бассейнов по стоку наносов обобщены А.П. Дедковым и В.И. Можжериним, оценка коэффициента доставки наносов через анализ строения рельефа развита В.Н. Голосовым, В.Р. Беляевым и М.М. Ивановым, а факторы, контролирующие современный сток наносов Кавказа, установлены В.Н. Голосовым и А.С. Цыпленковым. Сопоставимость скоростей аккумуляции для озёр разных типов охарактеризована N.L. Rose с соавторами.

Палеолимнологические подходы к расшифровке высокоразрешающих озёрных архивов и к отклику озёрных систем на изменения климата и антропогенную нагрузку разработаны J.P. Smol, R.W. Battarbee, H.J.B. Birks, A.S. Cohen, W.M. Last, F.S. Anselmetti, D. Verschuren и M. Sturm, а в отечественной лимнологической и палеогеографической традиции — Г.Г. Мартинсоном, А.А. Величко, Д.А. Субетто, Т.В. Сапелко, Н.Н. Давыдовой, О.Н. Соломиной, Е.А. Константиновым, Е.Ю. Новенко и М.Ю. Александриним. Методы оценки внутриводоёмных процессов, миграции нуклидов на границе «вода — осадок» и эффекта фокусирования вещества развиты M.W. Binford, J. Crusius, R.F. Anderson, C.L. Schelske, S.A. Norton и S.S. Dixit; на региональном уровне существенный вклад внесли В.Д. Страховенко, Л.П. Рихванов, З.И. Слуковский, В.Н. Удачин, Е.А. Пряхин, А.В. Трапезников, А.Я. Болсуновский, Н.А. Бакунов и С.Г. Левина.

При всём объёме накопленных сведений морфометрический фактор водосбора учитывался в практике радиоизотопного датирования лишь эпизодически, а российские материалы оставались слабо интегрированными в мировые базы данных. Это и определило постановку цели и задач настоящей работы.

Цель и задачи исследования

Цель работы — разработка теоретико-методологических основ и определение количественных параметров отклика пространственно-временного

распределения радионуклидов в донных осадках озёр на изменения. Происходящие в пределах их водосборных бассейнов под влиянием климатических и антропогенных факторов за последние 150 лет.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Установить уровни содержания и региональные закономерности распределения искусственных (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$) и естественных (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) радионуклидов в донных отложениях озёрных экосистем при различной антропогенной нагрузке на их водосборы — от условно-фоновых территорий — удалённых от локальных техногенных источников, где поступление искусственных радионуклидов ограничено глобальными атмосферными выпадениями, а прямая хозяйственная нагрузка на водосбор отсутствует, — до интенсивно освоенных урбанизированных и сельскохозяйственных. Оговорим, что полностью фоновых территорий в строгом смысле не существует: глобальные выпадения и современные изменения климата затрагивают всю поверхность суши, и различие между объектами носит количественный характер, выражаемый коэффициентом антропогенной нагрузки водосбора.
2. Выявить особенности вертикального и латерального распределения радионуклидов в осадках различного минералогического и гранулометрического состава; оценить роль органического вещества (по потерям при прокаливании, LOI) и литологического типа осадка в сорбции нуклидов и в сохранности исходной геохронологической записи.
3. Выявить и верифицировать отклик пространственного и вертикального распределения радионуклидов на макрорегиональные изменения климата (колебания температуры, объёмов атмосферных осадков, внутриводоёмного гидродинамического режима); разработать критерии отделения глобального климатического сигнала от локальных геоэкологических флуктуаций.
4. Дать количественную оценку отклику скоростей осадконакопления и массовой аккумуляции вещества ($\text{г/см}^2\cdot\text{год}$) на различные виды антропогенного воздействия на водосборах (распашка, сведение лесов, промышленное и инфраструктурное строительство).
5. На основе моделей датирования CRS и RPlum (по избыточному ^{210}Pb) с валидацией по техногенным реперам [28] 1963 и 1986 гг. [11, 13] рассчитать возрастные шкалы осадков малоизученных озёр и оценить

динамику и тренды скоростей седиментации в различные хронологические периоды индустриальной эпохи.

6. Развить применительно к крупным мелководным и транзитным озёрным системам методику поликернового опробования, необходимость которого для надёжных реконструкций отмечалась начиная с классических работ британской палеолимнологической школы, и определить количественные критерии достаточности сети колонок: установить на примере оз. Ханка, какая доля пространственной изменчивости скоростей осадконакопления и запасов радионуклидов остаётся невыявленной при опробовании единичным керном.
7. Построить прогнозные модели изменений скоростей осадконакопления и «времени жизни» озёр при различных сценариях климатического и антропогенного воздействия; систематизировать полученные результаты в единой веб-ориентированной базе данных озёр Российской Федерации.

Здесь и далее под условно фоновыми понимаются территории, на водосборах которых отсутствует прямая хозяйственная нагрузка — распашка, сведение лесов, застройка, — вследствие чего коэффициент антропогенной нагрузки K_a близок к нулю. Полностью фоновых в строгом смысле территорий не существует: глобальные атмосферные выпадения техногенных радионуклидов и современные изменения климата затрагивают всю поверхность суши, и различие между объектами носит количественный, а не качественный характер.

Объект исследования — донные отложения водных объектов Российской Федерации, расположенных в разных природных зонах и высотных поясах: озёр, водохранилищ и прудов, а также торфяных залежей как органогенных аналогов озёрных архивов, — и их водосборные бассейны. Преобладающую часть выборки составляют озёра (101 объект из 122), в неё включены также 7 водохранилищ и прудов и 14 торфяных массивов.

Предмет исследования — пространственно-временные закономерности вертикального распределения радионуклидов в толще донных отложений и их латерального перераспределения в системе «водосбор — водоём», а также постдепозиционной миграции радионуклидов (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np) в донных осадках и их связь с характеристиками водосборов, климатическими и антропогенными факторами.

Научная новизна работы

Научная новизна определяется впервые полученными результатами.

- при непосредственном участии автора исследованы донные отложения водных объектов восьми регионов России — от высокогорных озёр Кавказа и импактных водоёмов Южного Урала до водоёмов Дальнего Востока и торфяных залежей Средней Сибири; результаты этих работ вместе с систематизированными и переинтерпретированными опубликованными данными других исследователей впервые сведены в единую базу данных по осадконакоплению и радиоэкологическому состоянию водных объектов Российской Федерации, реализованную в виде открытой интерактивной ГИС-платформы, которая объединяет морфометрические параметры водоёмов, характеристики их водосборных бассейнов и послойные радиоизотопные профили колонок и позволяет выявлять межрегиональные закономерности формирования седиментационного архива;
- впервые показано, что морфометрический фактор в его общепринятой форме — отношение площади водосбора к площади зеркала — не контролирует уровень техногенного сигнала в донных осадках; установлено, что определяющей величиной является эффективный показатель улавливания $K_{\text{эфф}}^{\text{ул}}$, объединяющий геометрию системы с проводимостью склоново-руслowych связей, и разработан воспроизводимый протокол определения коэффициента связности по документируемым признакам строения водосбора;
- впервые количественно определён климатический отклик осадконакопления в единицах скорости на градус потепления и показано, что коэффициент климатической чувствительности меняет величину по высотному профилю — от $+0,85 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в альпийском прогляциальном поясе до статистически неотличимых от нуля значений в среднегорном залесённом; оценка выполнена на объектах с независимо подтверждённым нулевым коэффициентом антропогенной нагрузки;
- впервые установлено, что уровень атмосферных выпадений в горных озёрах определяется экспозицией водосбора относительно главного водораздельного хребта в поле западного переноса, а не абсолютной высотой объекта: различие наветренного и подветренного макросклонов достигает порядка величины при полном разделении групп, тогда как внутри выборки связь активности с высотой отсутствует;
- впервые выполнена численная калибровка коэффициента чувствительности осадконакопления к хозяйственной нагрузке водосбора

($\beta = 1,8 \pm 0,3$) независимо по двум частям трансграничного бассейна с различающейся интенсивностью освоения;

- получены новые высокоразрешающие вертикальные профили распределения ^{210}Pb и ^{137}Cs для ряда слабоизученных озёрных систем труднодоступных регионов Российской Федерации; на их основе математически реконструированы тренды изменения скоростей линейного и массового осадконакопления за последние 150 лет, выступающие прямым индикатором интенсификации эрозионных процессов на водосборах в индустриальную эпоху;
- предложена модификация диффузионно-адвективных моделей миграции радионуклидов и геохронологических моделей датирования путём введения коэффициента, учитывающего площадь и антропогенную нагрузку водосбора, что повышает адекватность реконструкций для водоёмов с выраженной пространственной неоднородностью воздействия;
- построено замкнутое прогностическое соотношение, объединяющее геометрию и связность системы, хозяйственную нагрузку и климатический отклик, и на его основе предложена седиментационно-геохимическая типизация водных объектов с выделением пяти типов седиментационных архивов, определяющая пригодность водоёма для решения конкретных задач до постановки полевых работ.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость состоит в развитии методологии радиоизотопного датирования донных осадков за счёт включения морфометрического фактора водосбора (показателя улавливания $S_{\text{вдсб}}/S_{\text{оз}}$) в систему геохронологических и миграционных моделей. Предложенный подход устраняет разрыв между атмосферной и эрозионной составляющими поступления радионуклидов и формирует теоретическую основу для корректной интерпретации седиментационных архивов систем «водосбор — водоём».

Практическая значимость определяется прежде всего созданной интерактивной геоинформационной базой данных озёр РФ по осадконакоплению (water-nuclides-russia.tilda.ws). Это готовый научно-прикладной инструмент для природоохранных ведомств (Росгидромет, Минприроды России, МЧС России), позволяющий оперативно оценивать фоновую радиоэкологическую ёмкость озёрных систем и прогнозировать их уязвимость к техногенному загрязнению. Разработанный подход, учитывающий показатель улавливания, даёт возможность использовать данные по

радиоактивности донных отложений как количественный индикатор темпов эрозии почв и деградации земель на водосборах — что существенно для долгосрочного планирования гидротехнических мероприятий, оценки рисков заиления малых водоёмов и проектирования зон экологического мониторинга.

Картографические материалы и пространственно-распределённые модели, интегрированные в ГИС-платформу, применимы при экспертной оценке экологических рисков проектирования промышленных объектов в бассейнах крупных и малых озёр, а также для верификации моделей регионального переноса и осаждения загрязняющих веществ.

Оригинальная конструкция гравитационного пробоотборника открытого (ленточного) типа с герметизацией керна и методика послойной экспрессии с шагом 0,5–1,0 см обеспечивают датирование самых молодых (последних 1–2 лет) слоёв донных отложений, что критически важно для оценки современной эрозии и загрязнения.

Теоретические положения работы, методология комплексного радиоизотопного анализа систем «водосбор — озеро» и материалы базы данных внедрены в учебный процесс и используются при подготовке лекционных курсов, лабораторных практикумов и методических пособий по радиоэкологии, геохимии окружающей среды, лимнологии и геоинформационному картографированию.

Методология и методы исследования

Методологической основой послужил системный подход к анализу систем «водосбор — водоём», объединяющий методы радиоэкологии, палеолимнологии, геохимии ландшафтов и геоинформатики.

Фактический материал получен в ходе полевых работ на ключевых полигонах от Арктики до бассейна оз. Ханка; колонки донных отложений отбирались оригинальным гравитационным пробоотборником, обеспечивающим сохранность границы «вода — осадок».

Аналитическую основу составили инструментальные ядерно-физические методы: полупроводниковая гамма-спектрометрия (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{241}Am), альфа-спектрометрия и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (изотопы Pu , Np , U) с предварительным радиохимическим выделением актиноидов и технеция. Литолого-геохимическая характеристика осадков выполнялась методами определения потерь при прокаливании, гранулометрического и минералогического анализа.

Возрастные шкалы рассчитывались по моделям CRS и RPlum (по избыточному ^{210}Pb) с валидацией по техногенным реперам 1963 и 1986 гг.; миграция радионуклидов описывалась диффузионно-адвективными моделями, атрибуция источников наносов — байесовскими моделями смешения (MixSIAR, BMM).

Основной объём оригинальных аналитических данных получен автором на кафедре радиохимии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; для расширения территориального охвата привлечены также опубликованные данные других исследователей. Обработка, систематизация и пространственный анализ выполнены средствами геоинформационных систем с интеграцией результатов в веб-ориентированную базу данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Длительность входной функции радионуклида в донный осадок определяется физико-химической формой его поступления: при выпадении в составе стекловидных топливных частиц высвобождение ^{137}Cs растягивается на десятилетия, вследствие чего реперный горизонт аварийных выпадений отражает не дату аварии, а протяжённый процесс поступления. Независимое установление источника обеспечивается изотопными отношениями актиноидов ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} \approx 0,18$ — глобальные выпадения; $^{238}\text{Pu}/(^{239}+^{240}\text{Pu}) \approx 0,27$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 1,40$ — производственный источник) и трассерами с независимой химией — ^{237}Np , ^{99}Tc и ^{129}I .
2. Уровень техногенного сигнала контролируется не морфометрией системы «водосбор-водоём», а её сочетанием со связностью склоново-руслowych связей: связь удельной активности ^{137}Cs с показателем улавливания отсутствует ($\rho = +0,03$; $p = 0,96$). Введён эффективный показатель улавливания $K^{\text{эф}}_{\text{ул}} = (S_{\text{водосб}}/S_{\text{озера}}) \cdot \text{IC}$ и разработан воспроизводимый протокол определения коэффициента связности IC по трём документируемым признакам строения водосбора.
3. Уровень атмосферных выпадений в горных водоемах определяется экспозицией водосбора относительно главного водораздельного хребта в векторе западного переноса, а не абсолютной высотой объекта. Удельная активность радионуклидов на наветренных и подветренных макросклонах различаются более чем на порядок, тогда как связь активности с высотой внутри выборки отсутствует.
4. Климатический отклик осадконакопления выражается коэффициентом чувствительности $S_{\text{отн}} = (\Delta w/w_0)/\Delta T$, меняющим величину по высотному

профилю: $+0,85\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в альпийском прогляциальном поясе и статистически неотличимый от нуля ($0 \pm 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) в среднегорном залесённом. Оценка правомерна, поскольку выполнена на объектах с независимо подтверждённым нулевым коэффициентом антропогенной нагрузки.

5. Хозяйственное освоение водосбора описывается коэффициентом $K_a = K^{\text{эфф}}_{\text{ул}} \cdot I$, определяющим эффективную скорость осадконакопления $w_{\text{эфф}} = w_0 \cdot (1 + \beta \cdot K_a)$ и время жизни водоёма $T = H/w_{\text{эфф}}$. По двум частям трансграничного бассейна оз. Ханка независимо определено $\beta = 1,8 \pm 0,3$; сокращение времени жизни водоёма относительно природного фона составляет от 1,9 до 5,6 раза.
6. Установленные зависимости объединяются в прогностическое соотношение $w = 0,29 \cdot (K_{\text{эффул}})^{0,54} \cdot (1 + \beta \cdot K_a) \cdot (1 + S_{\text{отн}} \cdot \Delta T)$ с базовой составляющей, калиброванной на водоемах с нулевой хозяйственной нагрузкой ($R^2 = 0,98$). Все входные величины определяются дистанционно. Это позволяет оценивать ожидаемую скорость осадконакопления и пригодность водоема для палеореконструкции до постановки полевых работ.
7. Систематизация радиоизотопных данных по 122 водным объектам восьми регионов России в единой открытой базе позволила впервые установить референсные уровни радионуклидов для территории страны и предложить седиментационно-геохимическую типизацию объектов по трём дистанционно определяемым параметрам ($K^{\text{эфф}}_{\text{ул}}$, K_a , $S_{\text{отн}}$) с выделением пяти типов седиментационных архивов.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 — Геоэкология (географические науки). Полученные результаты отвечают следующим направлениям исследований паспорта: п. 1.3 «Исторические реконструкции и прогноз современных изменений природы и климата. Палеогеоэкология» (реконструкция скоростей осадконакопления и климатического сигнала за индустриальную эпоху); п. 1.8 «Природная среда и геоиндикаторы её изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод» (радионуклиды как геоиндикаторы антропогенной нагрузки и эрозии); п. 1.12 «Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля» (оценка радиоэкологического состояния озёр и инструменты мониторинга); п. 1.14

«Моделирование геоэкологических процессов» (модели датирования, миграции и прогноза эволюции озёрных систем); п. 1.17 «Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии» (интерактивная ГИС-база данных озёр РФ).

Степень достоверности результатов

Достоверность обеспечивается значительным объёмом фактического материала, полученного на современном сертифицированном аналитическом оборудовании по стандартизированным методикам; использованием взаимодополняющих ядерно-физических методов (гамма-, альфа- и масс-спектрометрии); валидацией возрастных моделей по независимым техногенным реперам (1963 и 1986 гг.) и сопоставлением с литолого-геохимическими и палеоклиматическими данными. Полученные результаты согласуются с опубликованными данными отечественных и зарубежных исследователей и не противоречат современным представлениям лимнорадиоэкологии и палеолимнологии.

Личный вклад автора

Личный вклад состоит в постановке цели и задач исследования, методологическом обосновании путей их реализации, обобщении полученных результатов и формулировании выводов. Большая часть использованных аналитических данных получена автором лично либо при его непосредственном участии — на основе кернов, отобранных лично, или материала, предоставленного коллегами. Наряду с этим в работе использованы опубликованные данные других исследователей, которые были систематизированы, переинтерпретированы и интегрированы автором в единую базу данных в рамках общей методологии. Планирование и выполнение полевых работ и экспериментальных исследований, их интерпретация и подготовка публикаций осуществлялись автором лично, а также совместно с коллективом соавторов при ведущей роли автора. Основной объём оригинальных аналитических данных получен на кафедре радиохимии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы опубликованы в 60 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 38 — в изданиях, индексируемых в международных

базах данных Web of Science и Scopus, и 22 — в журналах из перечня ВАК и базы RSCI. Более 150 работ опубликованы в сборниках материалов международных и российских научных конференций. Результаты докладывались и обсуждались на профильных международных и всероссийских конференциях по радиоэкологии, лимнологии и геоэкологии.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Работа изложена на _____ страницах, содержит _____ рисунков и _____ таблиц. Список литературы включает _____ наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному консультанту доктору географических наук, профессору В.Н. Голосову за всестороннюю поддержку, а также коллегам по кафедре радиохимии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (И.Э. Власова, А. Ю. Романчук, А. С. Семенова, В. Г. Петров, Б. В. Егорова) за помощь в проведении исследований. Отдельную благодарность автор выражает заведующему кафедрой Радиохимия, академику РАН, Степану Николаевичу Калмыкову. Работа была бы невозможна без помощи близких коллег – всесторонней поддержки Александры Федотовой и Надежды Николаевны Ивановой, помощи в полевых исследованиях М.М. Иванова, Т. А. Парамоновой, О.А. Ширабова. Особую благодарность автор выражает коллегам института Географии РАН – О.Н. Соломиной, Е.А. Константинову, Е. Ю. Новенко. Большую помощь оказали друзья и семья автора (Т. А. Воробьева, Е.А. Еременко, М.М. Елкина, А.А. Кузьменков, М.Е. Кузьменкова).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Донные осадки водоёмов как высокоразрешающий архив изменений окружающей среды: состояние вопроса

Глава содержит историко-методологический анализ становления радиометрического датирования донных отложений. Рассмотрена концепция донных осадков как природного архива, общие закономерности их формирования с определяющей ролью водосборного бассейна, развитие представлений об использовании естественных и искусственных радионуклидов для датирования и трассирования процессов, современное состояние геохронологических моделей и обобщающих баз данных.

Показано, что классические модели датирования — постоянной скорости поступления (CRS) и постоянной начальной концентрации (CIC), предложенные и развитые P.G. Appleby и F. Oldfield [6–8], — трактуют поток радионуклидов к осадку как исключительно атмосферный. Между тем значительная часть вещества поступает в водоём вторично, с эродированным материалом водосбора. Механизм включения радионуклидов в осадочную запись различен для двух путей: выпавшие на акваторию нуклиды сорбируются взвесью и осаждаются вместе с ней, тогда как выпавшие на водосбор закрепляются в твердофазном веществе почв, перемещаются с почвенными частицами при смыве и поступают в водоём в составе наносов, где часть их остаётся связанной с исходными частицами, а часть переходит в раствор и фиксируется уже на веществе донных отложений.

Центральное место в главе отведено ключевой для работы проблеме — недоучёту характеристик водосбора при радиоизотопном датировании. Простейшей такой характеристикой служит отношение площади водосбора к площади зеркала (показатель улавливания). Подчёркнуто, что эта величина является морфометрической и сама по себе не отражает ландшафтных свойств водосбора — рельефа, растительного покрова, характера землепользования, — что и определило дальнейшую логику исследования.

Глава 2. Физико-химические основы поведения радионуклидов и методы их определения в донных осадках

Изложены физико-химические основы удержания радионуклидов донными осадками: роль вещественного состава, химии элемента, коэффициента распределения и его непостоянства, окислительно-восстановительной зональности толщи, форм нахождения и изотопных отношений как индикаторов источников.

Ключевым методическим условием работы является сохранность верхней, наиболее молодой части керна: именно она несёт запись последних десятилетий и определяет возможность разрешить оба техногенных репера в одном разрезе. Для её обеспечения разработана оригинальная конструкция гравитационного пробоотборника открытого (ленточного) типа с герметизацией керна, сохраняющая границу «вода — осадок», и методика послойной экспрессии с шагом 0,5–1,0 см (рисунок 1). Это позволяет датировать слои последних одного-двух лет — интервал, недоступный при отборе стандартными дночерпателями, — и тем самым получать современные скорости осадконакопления,

используемые далее при расчёте коэффициентов климатической и антропогенной чувствительности.

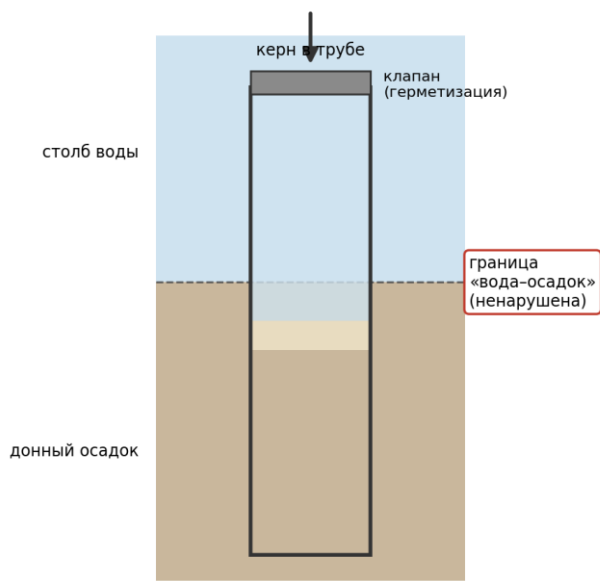


Рисунок 1 — Схема модернизированного пробоотборника, обеспечивающего сохранность границы «вода — осадок» и ненарушенной верхней части керна

Аналитический комплекс включает полупроводниковую гамма-спектрометрию (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{241}Am), альфа-спектрометрию и масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой для изотопов Pu , Np , U с предварительным радиохимическим выделением актиноидов и технеция (рисунок 2). Принципиальной особенностью комплекса является получение всех величин из одной пробы: сначала неразрушающим методом определяются γ -излучающие радионуклиды, затем та же навеска поступает на радиохимическое выделение. Это исключает погрешность, связанную с неоднородностью материала при раздельном опробовании, и обеспечивает сопоставимость активностей разных нуклидов в пределах одного слоя.

Аналитические характеристики применённых методик приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Аналитические характеристики применённых методик

Радионуклид	Метод	Предел обнаружения	Погрешность
^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K	γ -спектрометрия, ОЧГ-детектор	0,3–1 Бк/кг	5–15 %
^{210}Pb (46,5 кэВ)	γ -спектрометрия, Ве-окно	3–5 Бк/кг	10–20 %
^{241}Am (59,5 кэВ)	γ -спектрометрия	0,5–1 Бк/кг	10–25 %
^{239}Pu , ^{240}Pu	ИСП-МС/МС после выделения на TEVA	0,5–0,9 фг/мл	5–10 %
^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$	α -спектрометрия	0,1–0,5 мБк/проба	10–20 %
^{237}Np , ^{99}Tc , ^{129}I	ИСП-МС после выделения	10^{-3} – 10^{-2} мБк/кг	10–20 %

Формы нахождения радионуклидов определялись последовательным выщелачиванием по схеме Tessier [35], изотопные отношения актиноидов — масс-спектрометрически; обе группы величин используются далее как индикаторы источника поступления, независимые от геохронологической модели.

Контроль качества выполнялся на двух уровнях: внутрилабораторный контроль отдельного определения по изотопным меткам (^{236}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{232}U) и холостым пробам, а также валидация возрастных моделей по независимым реперам — сопоставление датировки по $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ с положением пиков ^{137}Cs и ^{241}Am 1963 и 1986 гг.

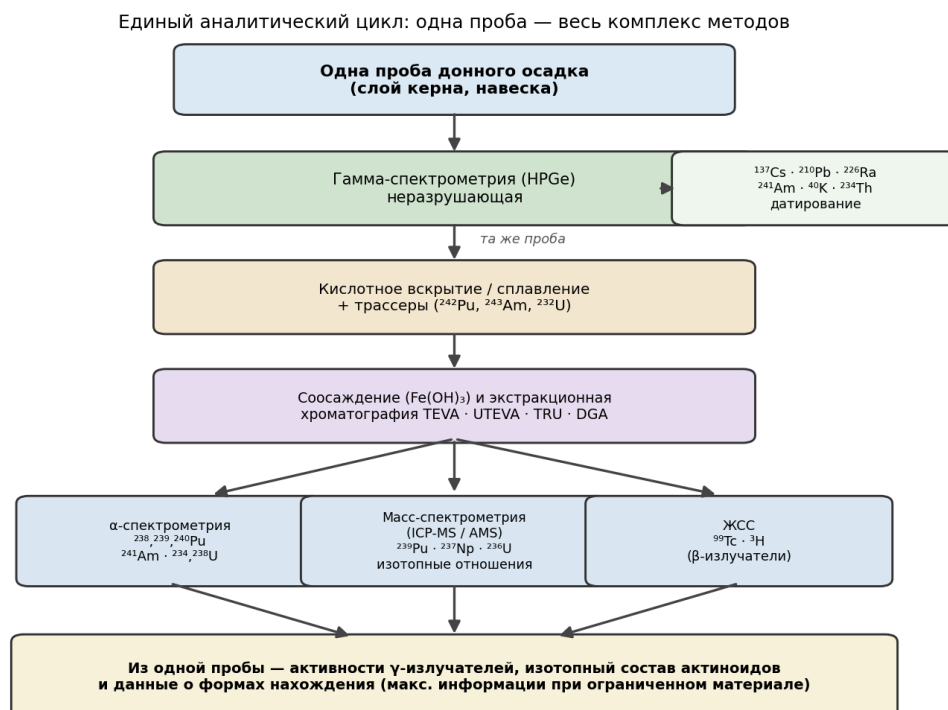


Рисунок 2 — Единый аналитический цикл: из одной пробы донного осадка последовательно получают активности γ-излучающих радионуклидов (неразрушающе), а затем изотопный состав актиноидов и технеция после радиохимического выделения

Глава 3. Объекты исследования

Сеть объектов охватывает восемь регионов и 122 водных объекта — от высокогорных озёр Кавказа и равнинных озёр Европейской территории России до трансграничного озера Ханка, импактных промышленных водоёмов Урала, мерзлотных торфяников Средней Сибири и фоновых объектов Дальнего Востока и Арктики (рисунок 3). Высотный диапазон составляет от 531 до 3184 м над

уровнем моря, уровень радиоактивного загрязнения — от импактного (водоёмы ПО «Маяк») до фонового.

Морские акватории в состав объектов не включены: механизм формирования осадочной записи в открытых морских системах принципиально иной, а отношение «водосбор — водоём» для них не определено.

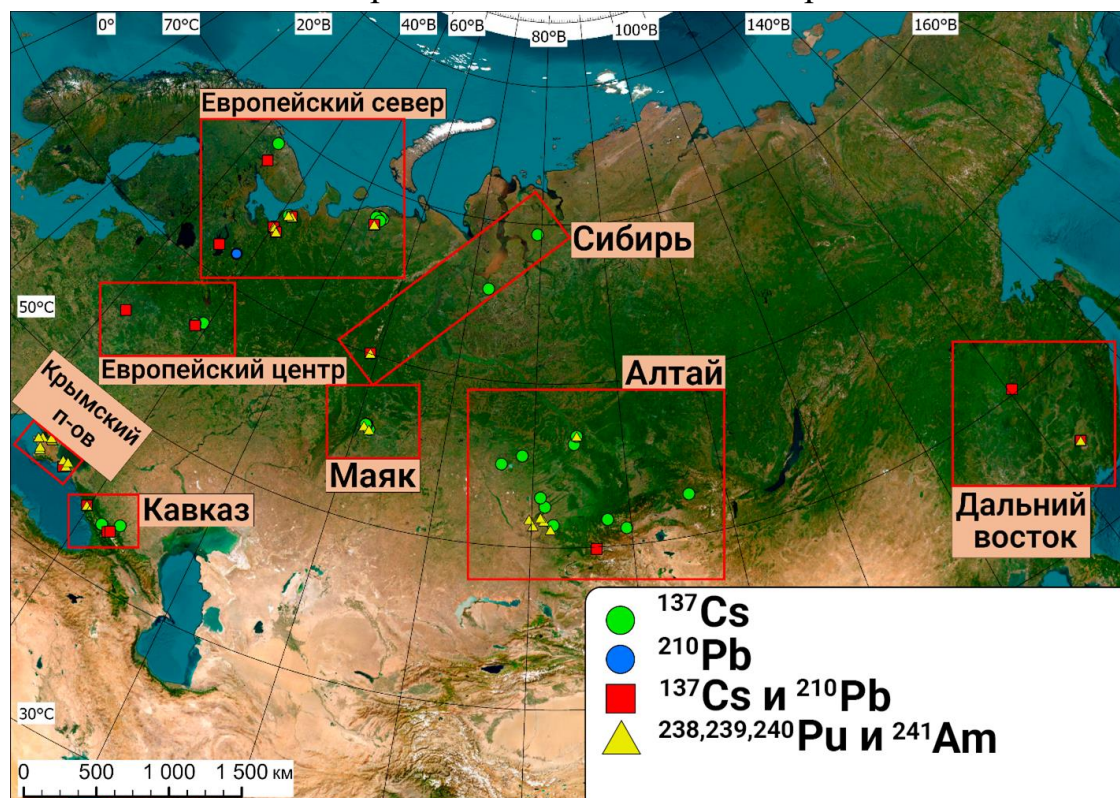


Рисунок 3 — Размещение объектов исследования и обеспеченность территории России данными о содержании радионуклидов в донных отложениях

Объекты подбирались по принципу варьирования одного ведущего фактора при относительной неизменности остальных. Для каждой группы этот фактор определён явно: для кавказского ряда — высотно-климатический градиент при фактически нулевой хозяйственной нагрузке; для оз. Ханка — интенсивность землепользования при сходстве природных условий двух частей бассейна; для равнинных озёр и водохранилищ — тип осадка и связность водосбора; для торфяных залежей — тепловое и водное состояние деятельного слоя; для импактных и чернобыльских объектов — уровень и механизм поступления радионуклидов.

Для всех объектов введена единая система описания: положение и абсолютная высота, площади зеркала и водосбора с производным показателем улавливания, генезис котловины, литология водосбора и характер поверхностных отложений, структура угодий, преобладающие экзогенные процессы, характер донных отложений.

Озёра Кавказа образуют высотный ряд из девяти объектов [4, 5]: Сылтранкель (3184 м), Гарабаши (2880 м), Донгуз-Орун (2545 м), Хорлакель (2040 м), Большое Хмелевское (1752 м), Хуко (1744 м), Кара-Кель (1335 м), Тамбукан (548 м) и Сухой Лиман (531 м); шесть из них изучены детально. Водосборы верхних объектов сложены моренными и флювиогляциальными отложениями зоны современного оледенения, нижних — залесены; котловины имеют ледниковый, тектонический и карстово-тектонический генезис. Озёра Большое Хмелевское и Хуко образуют локальный радиоактивный максимум [5] (запас ^{137}Cs до 33,6 кБк/м²), обусловленный наложением черномыльских выпадений [15] на глобальные при обильных осадках начала мая 1986 г. (рисунк 4).

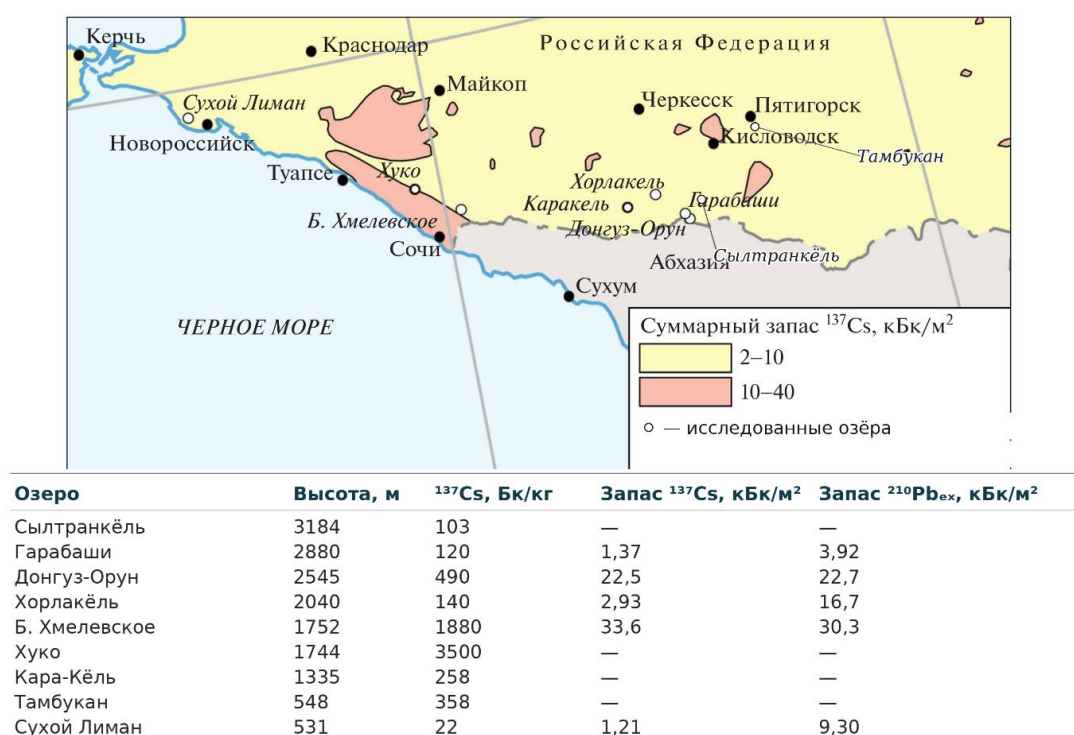


Рисунок 4 — Положение исследованных озёр Кавказа на карте черномыльских выпадений 1998 г.; в таблице — абсолютная высота, максимальная удельная активность и запасы ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

Сравнительная характеристика детально изученных озёр ряда приведена в таблице 2.

Таблица 2 — Характеристики озёр кавказского высотного ряда

Озеро	Высота, м	Экспозиция	$S_{\text{водосб}}/S_{\text{оз}}$	Осадки, мм/год	^{137}Cs , Бк/кг	Запас ^{137}Cs , кБк/м ²
Сылтранкель	3184	подветр.	18,7	н. д.	103	—
Гарабаши	2880	подветр.	26,0	1215	120	1,37
Донгуз-Орун	2545	подветр.	126,7	1114	490	22,5
Хорлакель	2040	подветр.	1,4	632	140	2,93
Б. Хмелевское	1752	наветр.	102,2	2529	1880	33,6
Хуко	1744	наветр.	4,4	2128	3500	—
Кара-Кель	1335	подветр.	41,1	н. д.	258	—
Тамбукан	548	подветр.	11,3	н. д.	358	—

Озеро	Высота, м	Экспозиция	$S_{\text{водосб}}/S_{\text{оз}}$	Осадки, мм/год	^{137}Cs , Бк/кг	Запас ^{137}Cs , кБк/м ²
Сухой Лиман	531	наветр. без барьера	64,3	622	22	1,21

Представительность ряда подтверждается положением объектов на гипсографической кривой Западного и Центрального Кавказа: он покрывает интервал от отметки, ниже которой лежит около 28 % площади, до привершинной зоны (рисунок 5).

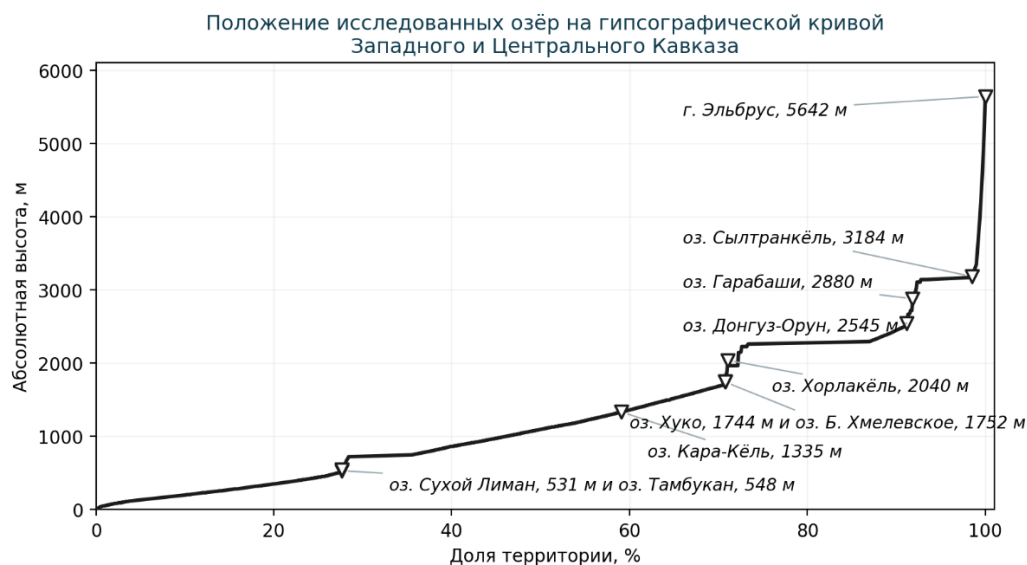


Рисунок 5 — Положение исследованных озёр на гипсографической кривой Западного и Центрального Кавказа

Озеро Ханка — ключевой трансграничный гидродинамически активный объект. При площади зеркала около 4500 км², средней глубине 4,5 м и площади водосбора 21 770 км² показатель улавливания составляет 4,8. Государственная граница разделяет единый в природном отношении бассейн на части, различающиеся характером хозяйственного освоения: на российскую приходится более 90 % площади при доле трансформированных экосистем около 28 %, на китайскую — менее 10 % площади при доле около 47 % и преобладании рисосеяния и пашни. Мелководность и интенсивное взмучивание требуют отбора нескольких колонок с обоснованным размещением [24, 38].

Систематические исследования озёр Сибири и Карелии [34] подтверждают, что повышенные скорости накопления приурочены к водосборам с интенсивным хозяйственным освоением [1, 3, 23].

Равнинные озёра и водохранилища расширяют диапазон типов осадков и значений морфометрического фактора в сторону сильносвязанных водосборов: Чухломское озеро характеризует равнинный водоём с практически отсутствующей нагрузкой, Плещеево — равнинный архив с прослеживаемым антропогенным вмешательством, Щёкинское водохранилище — приёмный

водоём загрязнённой флювиальной системы, оз. Малый Вудъявр — субарктический горный объект.

Торфяные залежи образуют самостоятельный ряд от урбанизированной болотной системы Москвы до мерзлотных торфяников Эвенкии. Ключевое значение имеет контраст мерзлотных условий: торфяник Ванавара-1 подстилается сквозным таликом, что позволяет исключить деградацию мерзлоты как объяснение высоких темпов накопления ($4,1 \pm 0,2$ мм/год), тогда как мёрзлые массивы Туры с кровлей мерзлоты около 40 см демонстрируют подавленную вертикальную миграцию нуклидов.

Промышленные водоёмы ПО «Маяк» (В-3, В-4, В-10, В-11, В-17), в которые радионуклиды поступали прямым сбросом жидких радиоактивных отходов, служат для отработки изотопно-геохимических индикаторов источника. **Объекты чернобыльского следа** (Тульская, Тверская, Брянская области, Западная Абхазия) выступают независимыми временными реперами. **Фоновым эталоном** служит оз. Большое Вавайское на юге о. Сахалин — водоём того же типа, что и Ханка, но с неосвоенным водосбором.

Глава 4. Отклик осадконакопления на свойства системы «водосбор — водоём» и выделение климатического сигнала

Горные озёра Кавказа как ключевые объекты. Выбор этой группы определяется тремя обстоятельствами. Горное сооружение работает как орографический барьер, многократно усиливая влажное осаждение аэрозольных радионуклидов; высокий уровень активности обеспечивает надёжную статистику счёта и позволяет определять нуклиды, недоступные при фоновых уровнях, прежде всего ^{241}Am ; водосборы не используются в сельском хозяйстве, часть их расположена в пределах особо охраняемых природных территорий, вследствие чего хозяйственная составляющая отклика равна нулю не по допущению, а фактически.

Проверка роли морфометрии дала отрицательный результат. Показатель улавливания в выборке изменяется почти на два порядка — от 1,4 до 127. Тем не менее связь удельной активности ^{137}Cs с ним отсутствует ($\rho = +0,03$; $p = 0,96$; $n = 6$), а связь интегрального запаса, имея физически ожидаемое направление, статистически незначима ($\rho = +0,50$; $p = 0,39$; $n = 5$). Расширение выборки до девяти объектов результата не меняет ($\rho = +0,03$; $p = 0,93$). Крайние точки нарушают ожидаемую картину наиболее наглядно: оз. Хуко при одном из наименьших показателей улавливания имеет максимальную удельную

активность (3500 Бк/кг), оз. Сухой Лиман при показателе 64 — минимальную (22 Бк/кг).

Экспозиция водосбора относительно главного водораздельного хребта. Уровень выпадений определяется не высотой объекта, а его положением в поле западного переноса влажных воздушных масс. Наветренный черноморский макросклон при высоте барьера более 3000 м работает как область концентрирования влажных выпадений, за гребнем формируется «дождевая тень». Разделение групп полное: озёра наветренного макросклона (Хуко, Большое Хмелевское) отличаются от озёр подветренного более чем на порядок ($U = 12$; $p = 0,036$; отношение медиан $\approx 13,5$). Отдельную группу образует оз. Сухой Лиман — наветренное по положению, но лишённое орографического барьера. Внутри кавказской выборки связь удельной активности с абсолютной высотой отсутствует ($\rho = -0,10$; $p = 0,80$; $n = 9$): экспозиция полностью перекрывает высотный эффект (рисунок 6).

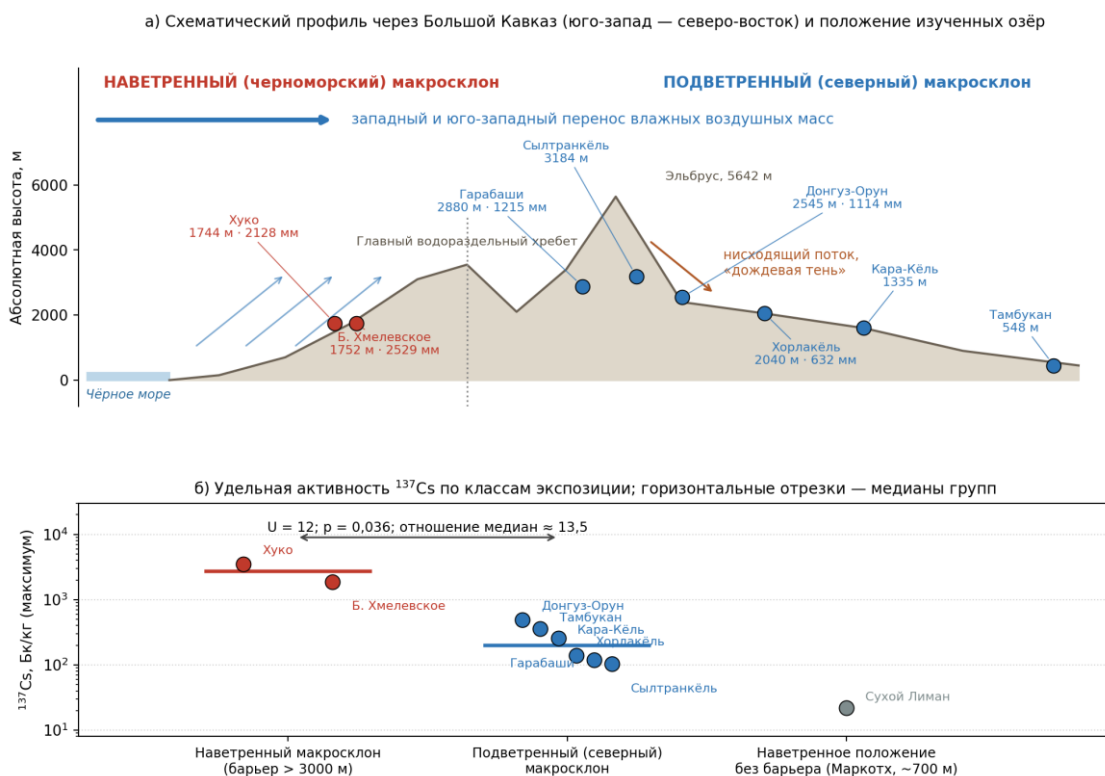


Рисунок 6 — Западный перенос влажных воздушных масс и экспозиция водосборов изученных озёр: а) схематический профиль через Большой Кавказ с положением объектов; б) удельная активность ^{137}Cs по классам экспозиции

Эффективный показатель улавливания. Причина отсутствия морфометрического контроля состоит в том, что площадь водосбора и его связность с водоёмом — разные вещи. Формально учитываемая площадь работает лишь в той мере, в какой между склонами и урезом воды существуют непрерывные пути транспорта наносов; количественный аппарат оценки

склоново-русловых связей развит в работах [12, 14, 21]. Это приводит к необходимости нормировать морфометрический параметр на проводимость связей:

$$K^{\text{эфф}}_{\text{ул}} = (S_{\text{водосб}}/S_{\text{озера}}) \cdot IC.$$

Для определения коэффициента связности IC разработан воспроизводимый протокол: $IC = f_T \cdot f_L \cdot f_{\Pi}$, где сомножители отвечают наличию путей транспорта наносов, перехвату материала внутрибассейновыми ловушками и защищённости поверхности растительным покровом, а каждая градация устанавливается по документируемому признаку, читаемому с топографической основы и космического снимка. Градации протокола приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Протокол определения коэффициента связности IC

Сомножитель	Градация	Диагностический критерий	Значение
f_T — пути транспорта наносов	постоянные водотоки	водоток показан на топокарте 1:25 000, имеется русловой врез	1,0
	временные водотоки, ложбины	ложбины дешифрируются на снимке, сток эпизодический	0,6
	только плоскостной смыв	линейные эрозионные формы не выделяются	0,3
f_L — внутрибассейновые ловушки	отсутствуют	форм аккумуляции между склонами и урезом нет	1,0
	частичный перехват	заболоченные понижения, террасы, шлейфы	0,6
	предозёрная дельта, конус выноса	площадь формы соизмерима с площадью зеркала	0,5
f_{Π} — защищённость поверхности	покров менее 30 %	нивальный и гляциальный пояса, морены, осыпи	1,0
	покров 30–70 %	горно-луговой пояс, послелесные луга	0,5
	покров более 70 %	лесной пояс, ООПТ без хозяйственного использования	0,2
	покров нарушен	документированные рубки, распашка, выпас	×2

По кавказскому кластеру значения IC изменяются от 0,06 до 0,60, а $K^{\text{эфф}}_{\text{ул}}$ — от 0,2 до 63,3. Существенно, что упорядочение объектов по эффективному показателю не совпадает с упорядочением по морфометрическому: оз. Большое Хмелевское, второе по величине $S_{\text{водосб}}/S_{\text{оз.}}$, оказывается в нижней трети ряда, а оз. Сылтранкель, восьмое по морфометрии, — в верхней. Это и есть содержательное следствие введения коэффициента связности, объясняющее отсутствие связи, зафиксированное выше (рисунок 7).

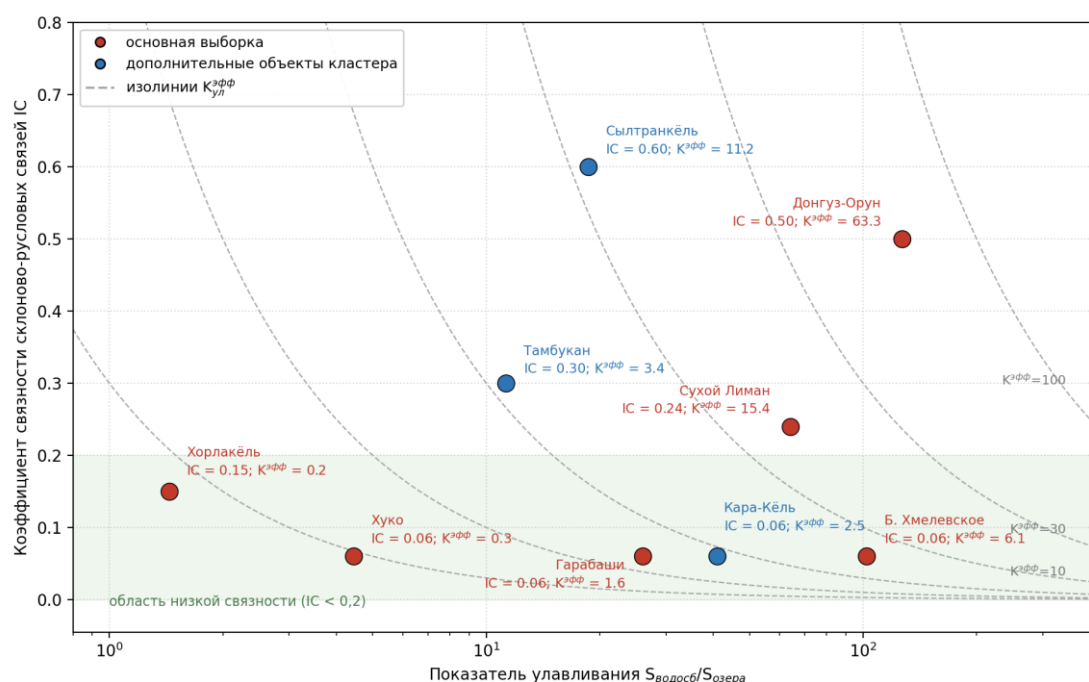


Рисунок 7 — Положение изученных озёр в поле «показатель улавливания — связность склоново-руслowych связей»; штриховые линии — изолинии эффективного показателя улавливания

Климатический сигнал в чистом виде. Коэффициент антропогенной нагрузки записывается как $K_a = K^{эфф}_{ул} \cdot I$. Для кавказских озёр малы оба сомножителя одновременно: связность низка, освоение отсутствует. Следовательно, $K_a \approx 0$, и изменения скорости осадконакопления в этой выборке не могут быть отнесены к хозяйственному воздействию. Инструментальная проверка показала, что из двух климатических переменных изменилась только одна: годовая сумма осадков, суммы тёплого периода и частота стокоформирующих ливней трендов не имеют ($R^2 = 0,002-0,02$), тогда как температура воздуха возросла примерно на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1966–2020 гг.

Количественная оценка климатического отклика. Это позволяет ввести коэффициент климатической чувствительности осадконакопления $S_{отн} = (\Delta w/w_0)/\Delta T$. Расчёт по датированным интервалам 1963–1986 и 1986–2014 гг., выполненный по возрастным моделям [7, 9, 31], (потепление между интервалами $\Delta T = 0,71\text{ }^{\circ}\text{C}$) даёт для альпийского прогляциального пояса (оз. Донгуз-Орун) $S_{отн} = +0,85\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$: потепление на градус увеличивает скорость осадконакопления на $1,7\text{ мм/год}$, или на 85% от фонового уровня. Полученная величина сопоставима с независимыми оценками современной денудации высокогорной зоны Альп [22] и современного стока наносов Кавказа [18]. В среднегорном залесённом поясе (озёра Большое Хмелевское, Хуко) коэффициент статистически неотличим от нуля ($0 \pm 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), поскольку прямой эффект потепления компенсируется

усилением защитной роли растительного покрова, а изменение проявляется не в скорости, а в составе осадка (рисунок 8).

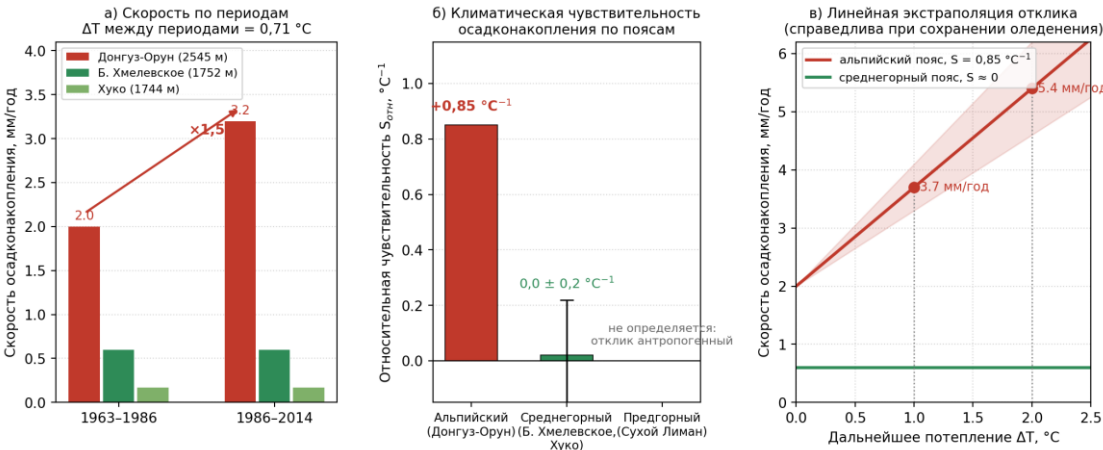


Рисунок 8 — Количественная оценка климатического отклика: а) скорость осадконакопления по датированным интервалам; б) коэффициент климатической чувствительности по высотным поясам; в) линейная экстраполяция отклика приледникового озера

Таблица 4 — Климатическая чувствительность осадконакопления по высотным поясам

Объект	Пояс	w0 (1963–1986), мм/год	w (1986–2014), мм/год	Sабс, мм/(год·°C)	Sотн, °C ⁻¹
Донгуз-Орун, 2545 м	альпийский, прогляциальный	2,0	3,2	+1,7	+0,85
Б. Хмелевское, 1752 м	среднегорный, залесённый	0,5–0,7	0,5–0,7	0 ± 0,14	0 ± 0,20
Хуко, 1744 м	среднегорный, залесённый	≤ 0,17	≤ 0,17	≈ 0	≈ 0

Разнонаправленность отклика — рост в верхнем поясе за счёт дегляциации и его отсутствие в среднем — не воспроизводится ни одним сценарием хозяйственного воздействия, дающим однонаправленный рост во всех поясах, и служит самостоятельным аргументом в пользу климатической природы сигнала.

Прогностическая модель. Объединение установленных зависимостей даёт замкнутое соотношение

$$w = 0,29 \cdot (K^{\text{эфф}}_{\text{ул}})^{0,54} \cdot (1 + \beta \cdot K_a) \cdot (1 + S_{\text{отн}} \cdot \Delta T), T = H/w,$$

базовая составляющая которого калибрована на водоёмах с нулевой хозяйственной нагрузкой ($R^2 = 0,98$; $p = 0,011$; отклонения не более 30 %). Показатель степени $0,54 \pm 0,06$ статистически неотличим от 0,5 и отвечает классической сублинейной зависимости удельного стока наносов от площади бассейна [2, 16, 37], то есть форма соотношения предсказана теорией доставки наносов [37], а калибровка определяет лишь численные коэффициенты. Все входные величины устанавливаются дистанционно, без бурения и датирования (рисунок 9).

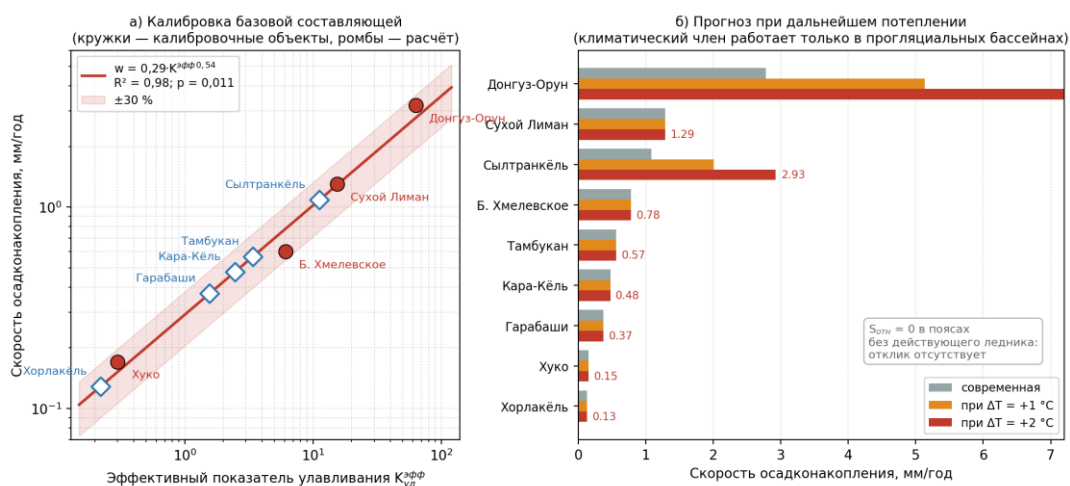
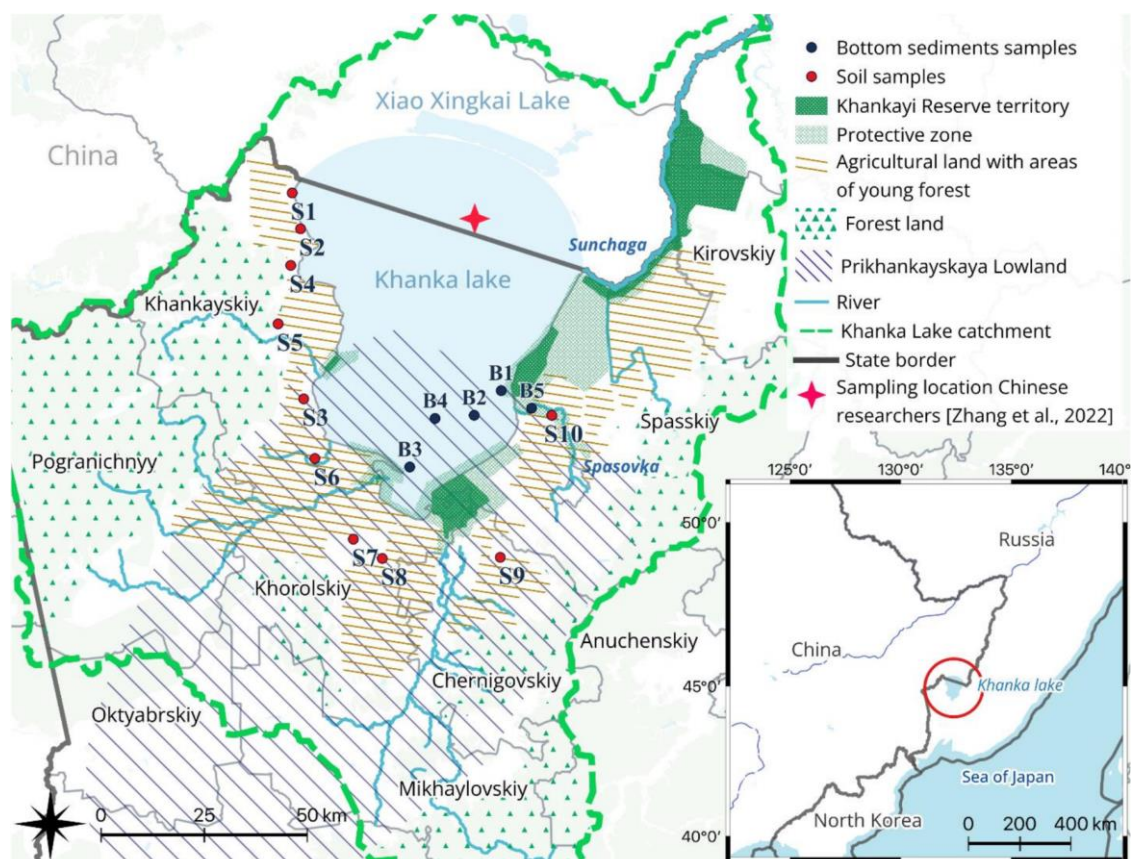


Рисунок 9 — Прогностическая модель: а) калибровка базовой составляющей по эффективному показателю улавливания; б) расчёт при дальнейшем потеплении на 1 и 2 °С

Ограничение схемы оговорено прямо: коэффициент связности описывает транспорт материала от склонов к урезу воды, но не учитывает абразию берегов. Для горных озёр с крутыми берегами этот источник пренебрежимо мал, для мелководных равнинных водоёмов с рыхлыми берегами соотношение даёт нижнюю оценку.

Глава 5. Отклик осадконакопления на антропогенную нагрузку водосбора (на примере оз. Ханка)

Скорость осадконакопления распределена по акватории неравномерно: от 0,02 см/год в удалённых от устьев точках до 0,16 см/год у впадения р. Спасовки; на интенсивно осваиваемой китайской стороне она достигает 0,35 см/год. Изотопное отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} = 0,16\text{--}0,24$ (в среднем 0,18) однозначно указывает на глобальные выпадения [36] как единственный источник и исключает чернобыльский и фукусимский вклады (рисунок 10).



Колонка	Скорость, см/год	Запас ^{137}Cs , Бк/м ²	Макс. $^{137}\text{Cs} \leq 10$ Бк/кг
B-1	0,16	3434	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} = 0,16-0,24$ (в среднем 0,18) — глобальные выпадения следов Чернобыля и Фукусимы нет
B-2	0,05	1319	
B-3	0,05	1512	
B-4	0,02	1001	
север озера (КНР)	0,35	4592	

Рисунок 10 — Оз. Ханка: бассейн, структура землепользования, точки отбора донных осадков (B-1...B-5) и почв (S-1...S-10); в таблице — скорости осадконакопления и запасы ^{137}Cs по колонкам

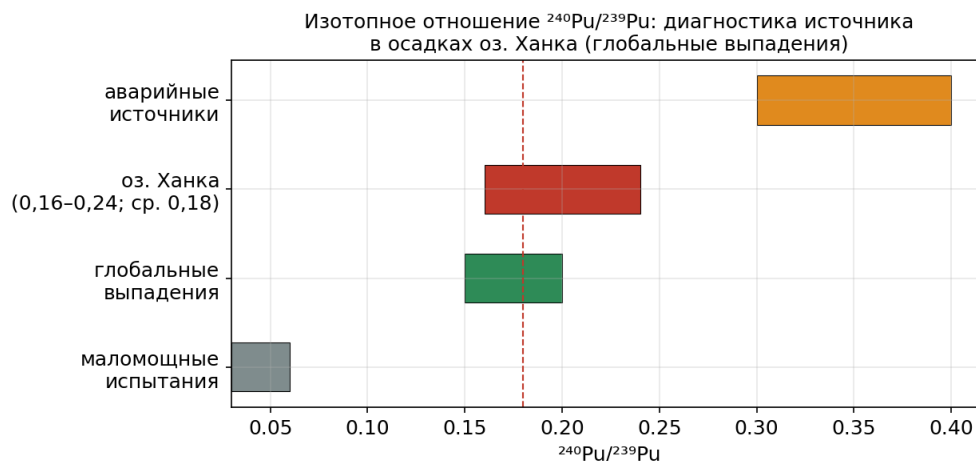


Рисунок 11 — Изотопное отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ в осадках оз. Ханка в сопоставлении с диапазонами известных источников

Численное замыкание модели. Индекс интенсивности освоения по долям трансформированных экосистем даёт коэффициенты нагрузки $K_a = 1,35$ для российской и $2,27$ для китайской части бассейна. Природная скорость

осадконакопления, отвечающая той же геометрии и связности при неосвоенном водосборе, рассчитана по зависимости, калиброванной на объектах с нулевой нагрузкой, и составляет $w_0 = 0,52$ мм/год. Наблюдаемые скорости превышают её в 3,1 и 5,6 раза соответственно, что даёт две независимые оценки коэффициента чувствительности: $\beta = 1,53$ и $\beta = 2,01$. Их согласие в пределах 30 % при различающейся в 1,7 раза нагрузке служит внутренней проверкой модели; принимается $\beta = 1,8 \pm 0,3$ (рисунок 11).

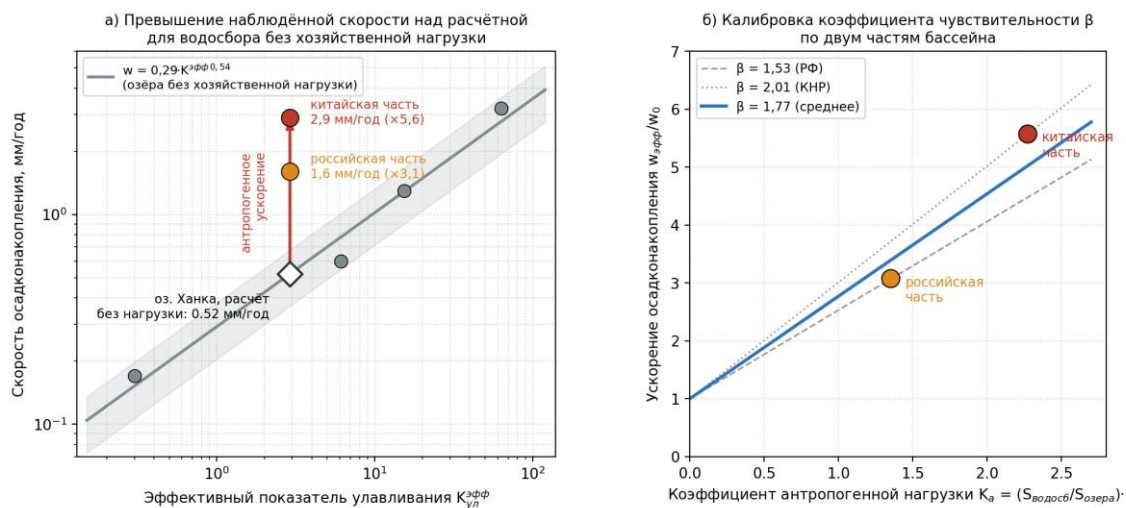


Рисунок 12 — Калибровка модели антропогенного отклика: а) превышение наблюденных скоростей над расчётной величиной для водосбора без хозяйственной нагрузки; б) определение коэффициента чувствительности β по двум частям бассейна

Проверка по природному аналогу. Оз. Большое Вавайское (Сахалин) сопоставимо с Ханкой [38] по типу, средней глубине (4,2 против 4,5 м), показателю улавливания (3,8 против 4,8) и климату, но имеет неосвоенный водосбор ($K_a \approx 0,08$). Измеренные для него скорости 0,8–2,3 мм/год превышают расчётную величину 0,52 мм/год. Расхождение объясняется вторым, внутриводоёмным источником материала — абразией торфяных берегов, не описываемой коэффициентом связности. Следовательно, величина $w_0 = 0,52$ мм/год характеризует только водосборную составляющую, а коэффициенты ускорения $\times 3,1$ и $\times 5,6$ являются верхними оценками; консервативная оценка, принимающая за фон скорость слабоосвоенной российской части, даёт нижнюю границу. **Сокращение времени жизни оз. Ханка относительно природного фона заключено в интервале от 1,9 до 5,6 раза.**

Глава 6. Моделирование миграции радионуклидов и прогноз эволюции озёрных систем

Миграция ^{137}Cs в осадках оз. Ханка описана уравнением адвекции–диффузии–распада; подгонка к наблюдаённому профилю дала коэффициент эффективной диффузии $D \approx 0,141 \text{ см}^2/\text{год}$ при скорости захоронения $0,198 \text{ см/год}$, а погребённый пик идентифицирован как репер глобальных выпадений 1963 г. Полученное значение характерно для прочно сорбируемого на глинистых минералах цезия и свидетельствует о слабой постдепозиционной миграции, не разрушающей реперный сигнал [25, 27]. Коэффициент диффузии является ключевым параметром, определяющим пригодность осадка для датирования: в кислых обводнённых органогенных осадках он выше на один-два порядка, что превращает реперный пик в размытый шлейф.

Коэффициент антропогенной нагрузки введён непосредственно в конвективный член миграционной модели: $w_{\text{эфф}} = w_0 \cdot (1 + \beta \cdot K_a)$. Существенно, что рост эффективной скорости увеличивает число Пекле и снижает относительную роль диффузионного размывания: переход от природной скорости $0,52 \text{ мм/год}$ к современной $1,9 \text{ мм/год}$ повышает его в 3,6 раза. Антропогенное ускорение осадконакопления, ухудшая экологическое состояние водоёма, парадоксальным образом улучшает его датруемость.

Прогноз эволюции. Для оз. Ханка климатический множитель обращается в единицу: бассейн лишён оледенения, тренды сумм осадков незначимы. Следовательно, всё наблюдаемое ускорение имеет антропогенную природу — вывод, получаемый не как допущение, а как результат обнуления одного из множителей. При средневзвешенной доле трансформированных экосистем $0,30$ расчётная современная скорость составляет $1,88 \text{ мм/год}$ при природной $0,52 \text{ мм/год}$, а остаточное время жизни водоёма — 2400 лет против 8640 лет при неосвоенном водосборе (рисунок 12).

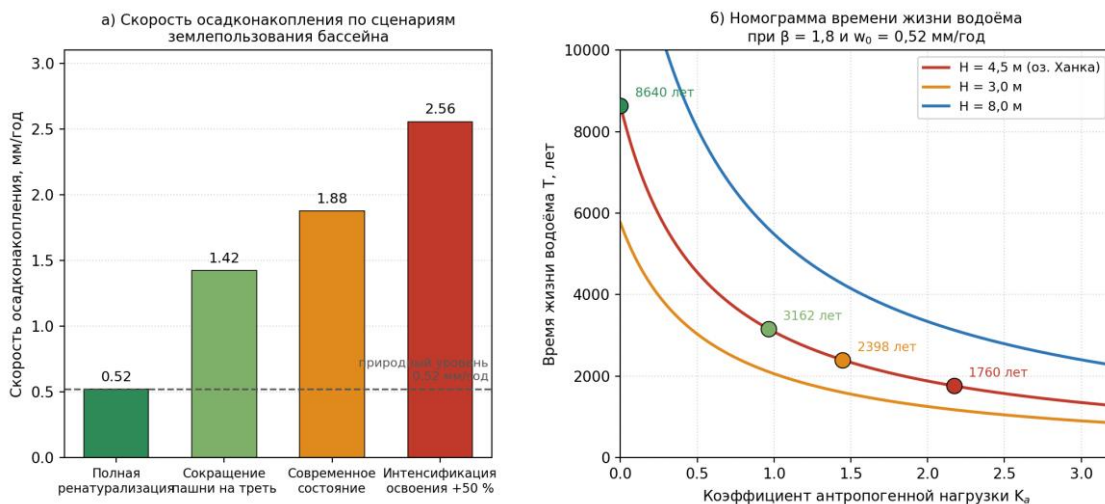


Рисунок 13 — Прогноз эволюции оз. Ханка: а) скорость осадконакопления по сценариям землепользования бассейна; б) номограмма времени жизни водоёма при $\beta = 1,8$

Таблица 5 — Прогноз эволюции оз. Ханка по сценариям землепользования бассейна

Сценарий	I	K _a	w, мм/год	Ускорение	T, лет
Полная ренатурализация водосбора	0	0	0,52	×1,0	8640
Сокращение пашни на треть	0,20	0,96	1,42	×2,7	3160
Современное состояние	0,30	1,45	1,88	×3,6	2400
Интенсификация освоения на 50 %	0,45	2,17	2,56	×4,9	1760

Прогноз обнаруживает асимметрию отклика: интенсификация освоения на 50 % сокращает время жизни водоёма на 640 лет, тогда как равное по величине снижение нагрузки продлевает его на 760 лет, а полная ренатурализация водосбора увеличила бы остаточное время жизни в 3,6 раза. Асимметрия следует из гиперболической формы зависимости и означает, что противоэрозионные мероприятия наиболее эффективны на водосборах с умеренной, а не с предельно высокой нагрузкой.

Глава 7. Радионуклиды в донных осадках водных объектов России: сводная база данных и закономерности их распределения

Впервые для территории России в единой открытой базе систематизированы опубликованные и оригинальные данные о содержании искусственных (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) и природных ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{226}Ra) радионуклидов в донных отложениях 122 объектов из 64 источников (1993–2025 гг.), включающих более 5300 измерений. Открытая версия ресурса с интерактивной картой объектов и формой обратной связи размещена по адресу <https://water-nuclides-russia.tilda.ws/map-and-feedback>.

Размах удельных активностей ^{137}Cs охватывает около шести порядков — от единиц Бк/кг в фоновых озёрах до значений порядка $3,2 \cdot 10^6$ Бк/кг в пойме реки Теча — и не имеет аналогов в обзорах по другим регионам мира. Распределение подчиняется двухфакторной модели: локальные аварийные выпадения и геохимические барьеры на путях глобального переноса (рисунок 13).

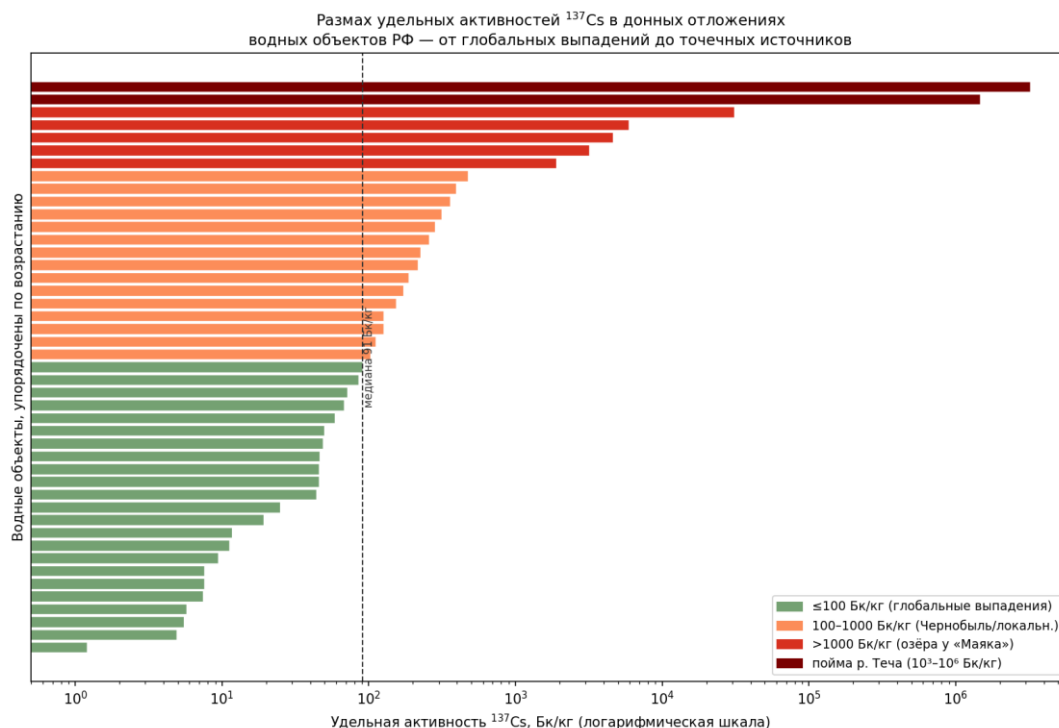


Рисунок 14 — Размах удельных активностей ^{137}Cs в донных отложениях водных объектов России (логарифмическая шкала)

Количественный анализ выявил принципиально разное поведение трассеров. Значимая отрицательная связь ^{137}Cs с широтой ($\rho = -0,66$) является артефактом географии точечных техногенных источников, тогда как $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ по широте однороден ($\rho = -0,09$) [8, 10], но закономерно возрастает с увлажнением [32] — от ~ 167 Бк/кг в тундре до ~ 1031 Бк/кг в муссонных зонах, что обосновывает его как универсальный трассер датирования [26, 27, 29] на всей территории страны (рисунок 14).

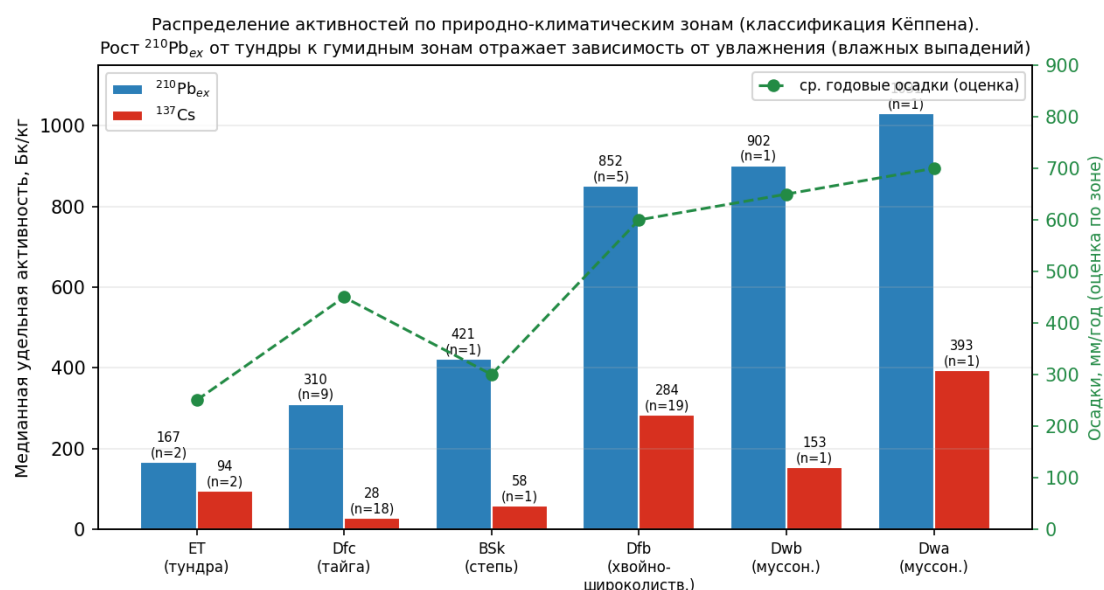


Рисунок 15 — Медианные удельные активности $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs по природно-климатическим зонам (классификация Кёппена)

Впервые установлены опорные уровни радионуклидов для водных объектов России: медианы 91 Бк/кг для ^{137}Cs и 338 Бк/кг для $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, зональный фоновый ряд $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и три референсных уровня ^{137}Cs — фон глобальных выпадений, чернобыльский и техногенный.

Положение в мировом контексте определено сопоставлением с тремя независимыми обобщениями: глобальным мета-анализом датирования (1351 керн) [17], европейской сводкой скоростей осадконакопления [30] и мета-анализом по Южному полушарию [19]. Медианная удельная активность близка к северополушарной и на порядок выше южнополушарной; по размаху активностей (шесть порядков против двух) и числу независимых источников (три против одного) российская выборка не имеет аналогов. При этом обеспеченность данными об объёмной плотности осадка в России ниже (около 7 % объектов против ~23 %) — именно по той величине, которая необходима для международного сопоставления (рисунок 15).

Положение России в мировом контексте: сопоставление с глобальным мета-анализом и медианами Северного и Южного полушарий

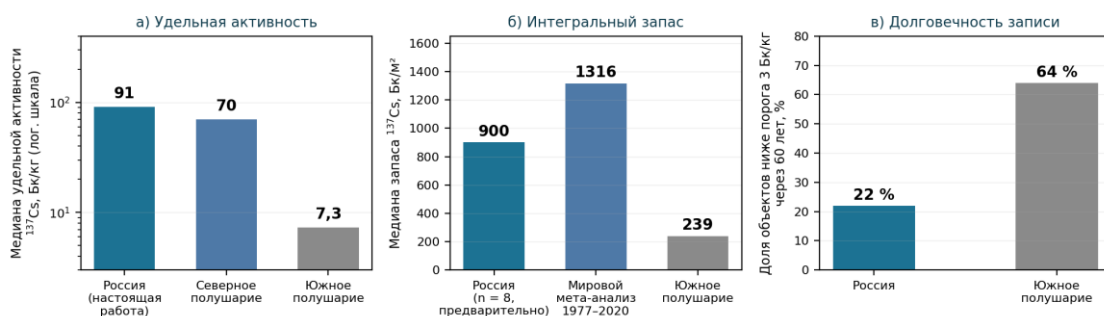


Рисунок 16 — Положение России в мировом контексте: медианные удельные активности (а) и запасы ^{137}Cs (б) в сопоставлении с медианами Северного и Южного полушарий; (в) долговечность цезиевой записи

Обобщённое представление о диапазоне загрязнения, охватываемого сетью объектов, даёт сопоставление удельной активности ^{137}Cs в донных осадках изученных водоёмов (рисунок 17): она закономерно убывает почти на девять порядков — от 10^8 – 10^9 Бк/кг в импактном водоёме В-17 ПО «Маяк» до первых единиц Бк/кг в равнинных и субарктических озёрах, близких к уровню глобальных выпадений.

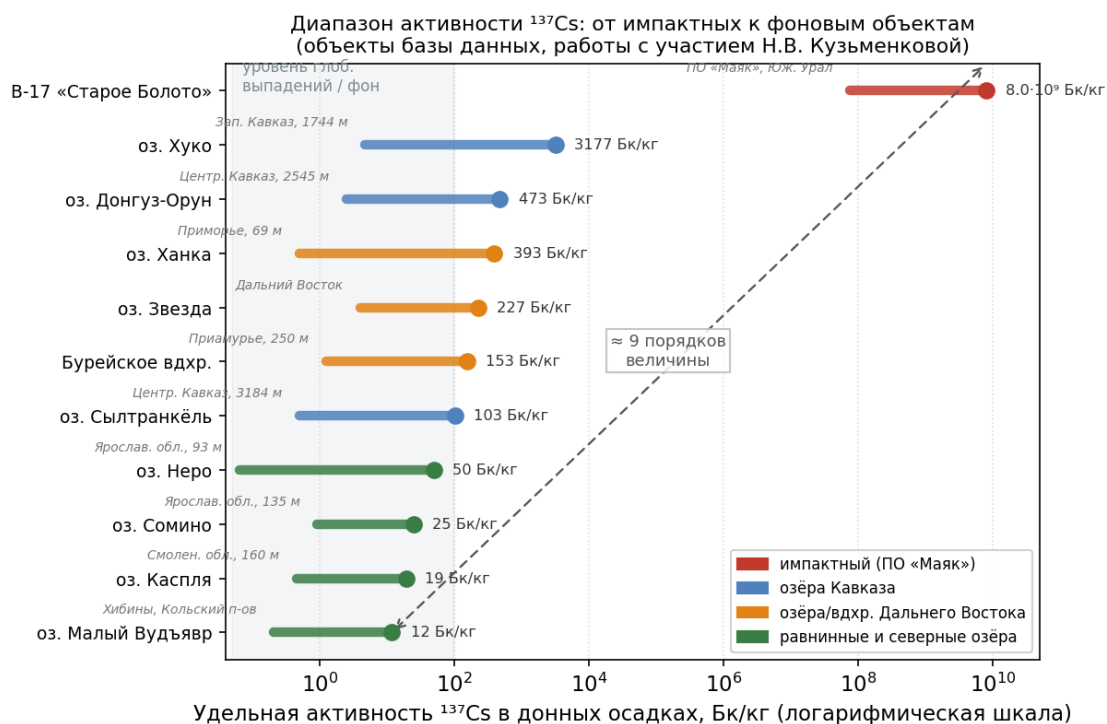


Рисунок 17 — Диапазон удельной активности ^{137}Cs в донных осадках изученных объектов: от импактных водоёмов ПО «Маяк» до фоновых озёр

Седиментационно-геохимическая типизация. Предложена типизация водных объектов по трём независимо определяемым параметрам — $K_{\text{эфф.ул}}$, K_a и $S_{\text{отн}}$, — каждый из которых устанавливается дистанционно. Выделены пять типов: атмосферные приёмники (Хорлакель, Хуко, Большое Вавайское), прогляциальные климатические архивы (Донгуз-Орун, Сылтранкель), стабилизированные объекты (Гарабаши, Большое Хмелевское, Кара-Кель, Тамбукан), антропогенные архивы (Ханка, Сухой Лиман, Щёкинское водохранилище) и импактные водоёмы (ПО «Маяк»). Типизация предсказательна — тип устанавливается до полевых работ — и динамична: он характеризует не объект как таковой, а стадию его развития. Оз. Гарабаши перешло из прогляциального типа в стабилизированный после отступления ледника, оз. Ханка — в антропогенный в ходе освоения бассейна (рисунок 16).

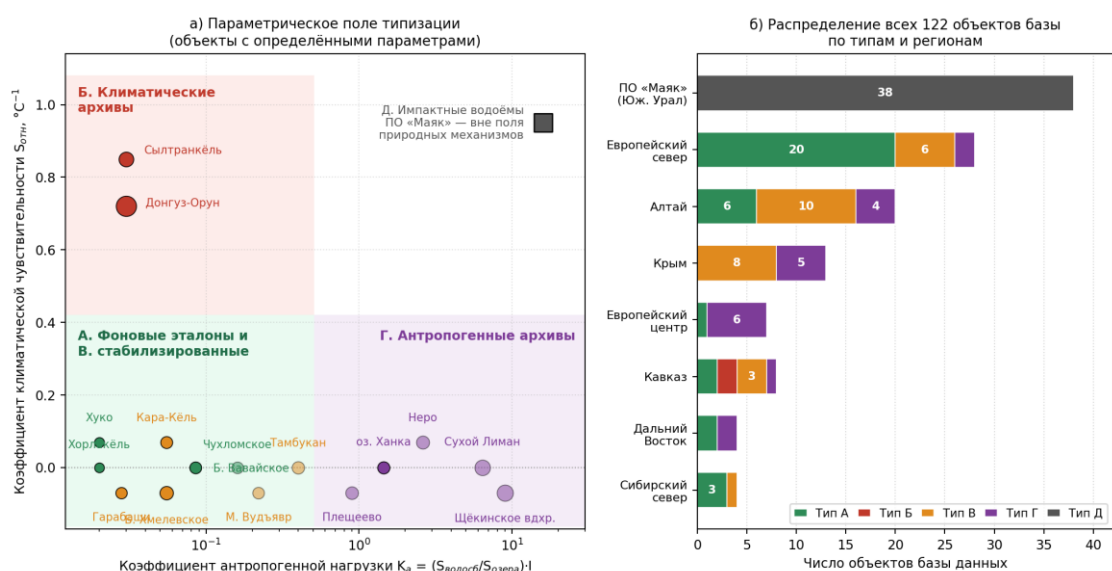


Рисунок 18 — Седиментационно-геохимическая типизация водных объектов: а) параметрическое поле; б) распределение всех 122 объектов базы по типам и регионам

Таблица 6 — Седиментационно-геохимическая типизация водных объектов

Тип	$K_{\text{эфф}}^{\text{ул}}$	K_a	$S_{\text{отн}}$	Что записано в осадке	Представители
А. Атмосферные приёмники	< 1	≈ 0	≈ 0	история выпадений, референсные уровни	Хорлакель, Хуко, Б. Вавайское
Б. Прогляциальные архивы	10–65	≈ 0	$\approx 0,85$	динамика оледенения, климатический сигнал	Донгуз-Орун, Сылтранкель
В. Стабилизированные	1–6	≈ 0	≈ 0	состав осадка, биогенные процессы	Гарабаши, Б. Хмелевское, Кара-Кель
Г. Антропогенные архивы	3–16	> 1	≈ 0	история освоения, время жизни водоёма	Ханка, Сухой Лиман, Щёкинское вдхр.
Д. Импактные водоёмы	—	—	—	сигнатура источника, формы нахождения	В-17, В-4 (ПО «Маяк»)

Распределение выборки по типам обнаруживает существенное смещение: 38 объектов относятся к импактному типу, 34 — к атмосферным приёмникам, 28 — к стабилизированным, 20 — к антропогенным архивам и лишь 2 — к прогляциальному типу. Малочисленность последнего при его наивысшей ценности для палеоклиматических реконструкций определяет приоритет поиска и опробования таких объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что физико-химическая форма поступления радионуклида определяет длительность его входной функции в донный осадок. Разрушение

стекловидных топливных частиц растягивает высвобождение ^{137}Cs на десятилетия [25] и вызывает снижение его кажущегося коэффициента распределения во времени, вследствие чего реперный горизонт аварийных выпадений отражает не дату аварии, а протяжённый процесс поступления. Устранение этой неопределённости достигнуто введением в практику лимнорадиоэкологии трассеров с независимой химией — ^{237}Np , ^{99}Tc и ^{129}I — и изотопных отношений актиноидов, устанавливающих источник поступления независимо от геохронологической модели [15, 26].

2. Показано, что уровень техногенного сигнала в донных осадках контролируется не морфометрией системы «водосбор — водоём» как таковой, а её сочетанием с проводимостью склоново-руслowych связей. Связь удельной активности ^{137}Cs с показателем улавливания отсутствует ($\rho = +0,03$; $p = 0,96$), и это отсутствие не является следствием малого объёма выборки. Введён эффективный показатель улавливания $K^{\text{эф}}_{\text{ул}} = (S_{\text{водосб}}/S_{\text{озера}}) \cdot \text{IC}$ и разработан воспроизводимый протокол определения коэффициента связности по трём документируемым признакам строения водосбора. Упорядочение объектов по эффективному показателю не совпадает с упорядочением по морфометрическому, вследствие чего модели CRS и CIC дают направленно, а не случайно смещённые оценки скоростей седиментации.

3. Установлено, что уровень атмосферных выпадений в горных озёрах определяется экспозицией водосбора относительно главного водораздельного хребта в поле западного переноса, а не абсолютной высотой объекта. Разделение наветренного и подветренного макросклонов полное ($U = 12$; $p = 0,036$; отношение медиан $\approx 13,5$), тогда как внутри кавказской выборки связь активности с высотой отсутствует ($\rho = -0,10$; $p = 0,80$).

4. Впервые количественно определён климатический отклик осадконакопления в единицах скорости на градус потепления. Коэффициент климатической чувствительности меняет величину по высотному профилю: $+0,85\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в альпийском прогляциальном поясе и статистически неотличимый от нуля ($0 \pm 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) в среднегорном залесённом. Расчёт правомерен, поскольку выполнен на объектах с независимо подтверждённым нулевым коэффициентом антропогенной нагрузки и при отсутствии значимых трендов эрозионного потенциала осадков. Линейность отклика сохраняется, пока ледник остаётся источником материала; после его исчезновения чувствительность обращается в нуль, что документировано водосбором оз. Гарабаши.

5. Показано, что хозяйственное освоение водосбора описывается коэффициентом $K_a = K^{\text{эф}}_{\text{ул}} \cdot I$, определяющим эффективную скорость

осадконакопления и время жизни водоёма. По данным трансграничного бассейна оз. Ханка коэффициент чувствительности определён независимо по двум частям с различающейся в 1,7 раза нагрузкой и составляет $\beta = 1,8 \pm 0,3$. Сокращение времени жизни водоёма относительно природного фона заключено в интервале от 1,9 до 5,6 раза; величина этого сокращения предложена как количественный геоэкологический индикатор накопленного воздействия на бассейн.

6. Установленные зависимости объединены в замкнутое прогностическое соотношение $w = 0,29 \cdot (K^{\text{эфф}}_{\text{ул}})^{0,54} \cdot (1 + \beta \cdot K_a) \cdot (1 + S_{\text{отн}} \cdot \Delta T)$, базовая составляющая которого калибрована на водоёмах с нулевой хозяйственной нагрузкой ($R^2 = 0,98$), а показатель степени отвечает классической сублинейной зависимости удельного стока наносов от площади бассейна. Все входные величины определяются дистанционно, что позволяет оценивать ожидаемую скорость осадконакопления и пригодность водоёма для палеореконструкции до постановки полевых работ.

7. Систематизация радиоизотопных данных по 122 водным объектам восьми регионов России позволила установить закономерности, невыявляемые на отдельных объектах, определить референсные уровни радионуклидов для территории страны, поместить российские данные в мировой контекст и предложить седиментационно-геохимическую типизацию объектов с выделением пяти типов седиментационных архивов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Приоритетными направлениями являются расчёт индекса связности наносов по цифровым моделям рельефа для всех объектов и региональная калибровка коэффициента β на расширенной выборке датированных разрезов; целенаправленный поиск и опробование прогляциальных объектов, представленных в стране единичными изученными озёрами; восполнение географических пробелов изученности (Сибирь, юг Дальнего Востока); отдельная количественная оценка водосборного и абразионного источников осадочного материала; систематическая публикация объёмной плотности осадков для перехода к запасам и гармонизация протоколов для интеграции российского сегмента в мировые базы данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В списке приведены работы других исследователей, на которые даны ссылки в тексте автореферата. Публикации автора по теме диссертации приведены в следующем разделе.

1. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. — М.: ГЕОС, 2006. — 296 с.

2. Дедков А.П., Можжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. — 264 с.
3. Субетто Д.А. Донные отложения озёр: палеолимнологические реконструкции. — СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. — 343 с.
4. Alexandrin M.Y., Darin A.V., Kalugin I.A. [et al.] Annual sedimentary record from Lake Donguz-Orun (Central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions // *Frontiers in Earth Science*. — 2018. — Vol. 6. — Art. 158. — DOI: 10.3389/feart.2018.00158.
5. Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. [et al.] Variations of heat availability in the Western Caucasus over the past millennium // *Quaternary International*. — 2023. — Vol. 664. — P. 20–32. — DOI: 10.1016/j.quaint.2023.05.020.
6. Appleby P.G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments // *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques*. — Dordrecht: Kluwer, 2001. — P. 171–203.
7. Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment // *Catena*. 1978. Vol. 5, № 1. P. 1–8. DOI: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2
8. Appleby P.G. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review // *The Holocene*. — 2008. — Vol. 18, № 1. — P. 83–93. — DOI: 10.1177/0959683607085598.
9. Aquino-López M.A., Blaauw M., Christen J.A., Sanderson N.K. Bayesian analysis of ^{210}Pb dating // *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*. — 2018. — Vol. 23, № 3. — P. 317–333. — DOI: 10.1007/s13253-018-0328-7.
10. Aquino-López M.A., Ruiz-Fernández A.C., Blaauw M., Sanchez-Cabeza J.-A. Comparing classical and Bayesian ^{210}Pb dating models in human-impacted aquatic environments // *Quaternary Geochronology*. — 2020. — Vol. 60. — Art. 101106.
11. Barsanti M., Garcia-Tenorio R., Schirone A. [et al.] Challenges and limitations of the ^{210}Pb sediment dating method: results from an IAEA modelling interlaboratory comparison exercise // *Quaternary Geochronology*. — 2020. — Vol. 59. — Art. 101093. — DOI: 10.1016/j.quageo.2020.101093.
12. Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment // *Catena*. — 2008. — Vol. 75, № 3. — P. 268–277. — DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
13. Brenner M., Schelske C.L., Kenney W.F. Inputs of dissolved and particulate ^{226}Ra to lakes and implications for ^{210}Pb dating // *Journal of Paleolimnology*. — 2004. — Vol. 32, № 1. — P. 53–66. — DOI: 10.1023/B:JOPL.0000025280.94670.05.
14. Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small alpine catchments // *Geomorphology*. — 2013. — Vol. 188. — P. 31–41. — DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
15. De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D. [et al.] Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. — Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. — 63 p.
16. de Vente J., Poesen J., Arabkhedri M., Verstraeten G. The sediment delivery problem revisited // *Progress in Physical Geography*. — 2007. — Vol. 31, № 2. — P. 155–178. — DOI: 10.1177/0309133307076485.
17. Foucher A., Chaboche P.-A., Sabatier P., Evrard O. A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ // *Earth System Science Data*. — 2021. — Vol. 13, № 10. — P. 4951–4966. — DOI: 10.5194/essd-13-4951-2021.
18. Golosov V., Tsyplenkov A. Factors controlling contemporary suspended sediment yield in the Caucasus region // *Water*. — 2021. — Vol. 13, № 22. — Art. 3173. — DOI: 10.3390/w13223173.
19. Guillevic F., Sabatier P., Dicen G. [et al.] Assessing the artificial radionuclide caesium-137 spatial distribution in the Southern Hemisphere from lake sediment records // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2026. — Vol. 293. — Art. 107906.

20. Hasholt B., Walling D.E., Owens P.N. Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland // *Hydrological Processes*. — 2000. — Vol. 14, № 4. — P. 679–699.
21. Heckmann T., Cavalli M., Cerdan O. [et al.] Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations // *Earth-Science Reviews*. — 2018. — Vol. 187. — P. 77–108. — DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.08.004.
22. Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A. [et al.] River loads and modern denudation of the Alps — a review // *Earth-Science Reviews*. — 2013. — Vol. 118. — P. 11–44. — DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.01.001.
23. Jenny J.-P., Koirala S., Gregory-Eaves I. [et al.] Human and climate global-scale imprint on sediment transfer during the Holocene // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2019. — Vol. 116, № 46. — P. 22972–22976. — DOI: 10.1073/pnas.1908179116.
24. Jiaojie C., Yanguang L., Shulan G. [et al.] Paleoenvironment evolution of Lake Khanka since the Last Glacial Maximum: age model reconstructed by secular variation of geomagnetic field // *Quaternary Sciences*. — 2014. — Vol. 34, № 3. — P. 528–539.
25. Konoplev A.V., Bulgakov A.A., Popov V.E., Bobovnikova Ts.I. Behaviour of long-lived Chernobyl radionuclides in a soil–water system // *Analyst*. — 1992. — Vol. 117, № 6. — P. 1041–1047. — DOI: 10.1039/AN9921701041.
26. Mabit L., Benmansour M., Abril J.M. [et al.] Fallout ^{210}Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: a review // *Earth-Science Reviews*. — 2014. — Vol. 138. — P. 335–351. — DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.007.
27. Matisoff G. ^{210}Pb as a tracer of soil erosion, sediment source area identification and particle transport in the terrestrial environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2014. — Vol. 138. — P. 343–354. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.03.008.
28. Meusburger K., Mabit L., Ketterer M. [et al.] A multi-radionuclide approach to evaluate the suitability of $^{239+240}\text{Pu}$ as soil erosion tracer // *Science of the Total Environment*. — 2016. — Vol. 566–567. — P. 1489–1499. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.035.
29. Meusburger K., Porto P., Mabit L. [et al.] Excess lead-210 and plutonium-239+240: two suitable radiogenic soil erosion tracers for mountain grassland sites // *Environmental Research*. — 2018. — Vol. 160. — P. 195–202. — DOI: 10.1016/j.envres.2017.09.020.
30. Rose N.L., Morley D., Appleby P.G. [et al.] Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedence // *Journal of Paleolimnology*. — 2011. — Vol. 45, № 4. — P. 447–468. — DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
31. Sanchez-Cabeza J.A., Ruiz-Fernández A.C. ^{210}Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2012. — Vol. 82. — P. 183–200. — DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.024.
32. Sedighi F., Khaledi Darvishan A., Golosov V., Zare M.R. Relationship between mean annual precipitation and inventories of fallout radionuclides (^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$) in undisturbed soils // *Eurasian Soil Science*. — 2020. — Vol. 53, № 9. — P. 1332–1341. — DOI: 10.1134/S1064229320090148.
33. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E. [et al.] Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // *Global and Planetary Change*. — 2016. — Vol. 140. — P. 28–58. — DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.02.008.
34. Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Efremenko N.A. [et al.] Basic features of distribution of trace elements and phosphorus in the bottom sediments of lakes of different regions // *Water-Rock Interaction*. — 2020.
35. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analytical Chemistry*. — 1979. — Vol. 51, № 7. — P. 844–851. — DOI: 10.1021/ac50043a017.
36. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Vol. I: Sources. — New York: United Nations, 2000. — 654 p.

37. Walling D.E. The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology*. — 1983. — Vol. 65, № 1–3. — P. 209–237. — DOI: 10.1016/0022-1694(83)90217-2.
38. Zhu Y., Shen J., Lei G. [et al.] Environmental evolution of Xingkai (Khanka) Lake since 200 ka by OSL dating of sand hills // *Chinese Science Bulletin*. — 2011. — Vol. 56, № 24. — P. 2604–2612. — DOI: 10.1007/s11434-011-4602-0.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

1. Kuzmenkova N.V., Petrov V.G., Savelieva K.V., Fedotova A.K., Tokar E.A., Sun J., Huang Z., Xing S., Shi K., Hou X., Kalmykov S.N. High-resolution industrial history archived by artificial radionuclides in Lake Khanka's (Xingkai) sediments and catchment // *Catena*. — 2025. — Vol. 260. — Art. 109478. — DOI: 10.1016/j.catena.2025.109478.
2. Kuzmenkova N.V., Golosov V.N., Fomina A.K., Markelov M.V., Zaiskiy N.P., Zaretskaya N.E., Eremenko E.A. The Chernobyl signature in Western Abkhazia: assessing ^{137}Cs deposition variability and applicability for evaluation of sediment redistribution rates // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2025. — Vol. 18, № 4. — P. 127–138. — DOI: 10.24057/2071-9388-2025-4097.
3. Slukovskii Z., Kuzmenkova N., Guzeva A. Lake Kitezh (Antarctica): the first data on the sedimentation rate for the last 150 years // *Journal of Sedimentary Environments*. — 2026. — Vol. 11, № 2. — DOI: 10.1007/s43217-025-00270-5.
4. Kuzmenkova N.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., Alexandrin M.Yu., Korneva I.A., Grabenko E.A., Rozhkova A.K., Bykhalova O.N. Bottom sediment radioactivity of the six Caucasus lakes located in different altitude zones // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2023. — DOI: 10.1007/s11356-023-25838-4.
5. Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A., Tokar E., Grabenko E.A., Shi K., Petrov V.G., Kalmykov S.N., Hou X. Analysis of sedimentation processes in Lake Khanka (Xingkaihu) and Amur Bay using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracers // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2023. — Vol. 332, № 4. — P. 959–971. — DOI: 10.1007/s10967-023-08813-8.
6. Kuzmenkova N.V., Golosov V.N., Grabenko E.A., Aleksandrin M.Yu. Sedimentation rates in lakes of the Caucasus and their changes in the Late Holocene // *Doklady Earth Sciences*. — 2022. — Vol. 507, № S1. — P. S158–S166. — DOI: 10.1134/S1028334X22601353.
7. Kuzmenkova N.V., Ivanov M.M., Alexandrin M.Yu., Grachev A.M., Rozhkova A.K., Zhizhin K.D., Grabenko E.A., Golosov V.N. Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes // *Environmental Pollution*. — 2020. — Vol. 262. — Art. 114269. — DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114269.
8. Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Grabenko E.A., Grachev A.M., Golosov V.N. The anthropogenic fallout radionuclides in soils of Mount Khuko (the Western Caucasus) and their application for determination of sediment redistribution // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2022. — Vol. 248. — Art. 106880. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106880.
9. Kuzmenkova N.V., Petrov V.G., Rozhkova A.K., Tokar E.A., Shi K., Kalmykov S.N., Hou X. Distribution of Np, Pu, and Am in water, suspended matter, and bottom sediments of Peter the Great Bay // *Radiochemistry*. — 2024. — Vol. 66, № 1. — P. 1–9. — DOI: 10.1134/S1066362224010010.
10. Rozhkova A.K., Kuzmenkova N.V., Sibirtsev A.M., Petrov V.G., Shi K.L., Hou X.L., Kalmykov S.N. Simultaneous separation of actinides and technetium from large volumes of natural water for their determination // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2022. — Vol. 331. — P. 2037–2044. — DOI: 10.1007/s10967-022-08274-5.
11. Zheleznova A.O., Sun J., Zhu S.D., Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Petrov V.G., Xing S., Shi K., Hou X., Kalmykov S.N. Sorption behaviour of neptunium in marine and fresh water bottom sediments in Far East area of Russia (Lake Khanka and Amur Bay) // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2024. — Vol. 272. — Art. 107334. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107334.
12. Sun J., Zhu S., Xing S., Kuzmenkova N.V., Peng C., Lu Y., Rozhkova A.K., Petrov V.G., Shi K., Kalmykov S.N., Hou X. Level, distribution and sources of Np, Pu and Am isotopes in Peter the Great Bay of the Japan Sea // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2024. — Vol. 274. — Art. 107400. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107400.

13. Rozhkova A.K., Logutenkova E.A., Dodonova K.A., Kuzmenkova N.V., Petrov V.G. Sorption behavior of fission products (Tc, I) in marine and freshwater bottom sediments // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2024. — DOI: 10.1007/s10967-024-09400-1.
14. Kuzmenkova N.V., Liu J.L., Xing S., Petrov V.G., Rozhkova A.K., Filatova D.G., Egorin A., Tokar E., Liu Q., Shi K.L., Kalmykov S.N. Iodine isotopes in surface water in Northeast Asia // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2023. — DOI: 10.1007/s10967-022-08726-y.
15. Tokar E., Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A., Shlyk D., Shi K., Hou X., Kalmykov S.N. Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and Lake Khanka) // *Water*. — 2023. — Vol. 15, № 12. — Art. 2267. — DOI: 10.3390/w15122267.
16. Mazei Yu.A., Tsyganov A.N., Ershova E.G., Mazei N.G., Pimenov V.E., Kotlyarova E.V., Kuzmenkova N.V. [et al.] Multi-proxy paleoecological reconstruction of peatland initiation, development and restoration in an urban area (Moscow, Russia) // *Diversity*. — 2023. — Vol. 15, № 3. — Art. 448. — DOI: 10.3390/d15030448.
17. Grachev A.M., Novenko E.Yu., Grabenko E.A., Alexandrin M.Yu., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurnaya A.A., Kuderina T.M., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Darin A.V., Solomina O.N. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko // *The Holocene*. — 2021. — Vol. 31, № 3. — P. 368–379. — DOI: 10.1177/0959683620972782.
18. Filippova K.G., Konstantinov E.A., Borisova O.K., Kuzmenkova N.V., Zakharov A.L., Medvedev A.A. Lake Chukhlomskoe in the Late Pleistocene and Holocene (Kostroma region, Russia) // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2022. — № 4. — P. 1417–1420. — DOI: 10.31951/2658-3518-2022-a-4-1417.
19. Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L., Kuzmenkova N.V. Late Pleistocene and Holocene sediments of Lake Chukhlomskoye // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2024. — № 4. — P. 334–339. — DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-334.
20. Rudinskaya A.I., Konstantinov E.A., Shukhovostov R.S., Kuzmenkova N.V. Sedimentation rate in Lake Plescheevo in the Late Holocene // *Limnology and Freshwater Biology*. — 2024. — № 4. — P. 625–629. — DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-624.
21. Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E., Konstantinov E.A., Gurinov A.L., Ivanova N.N., Kuzmenkova N.V., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Golosov V.N. Using reservoir sediment deposits to determine the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system // *Environmental Pollution*. — 2021. — Vol. 274. — Art. 116588. — DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116588.
22. Rozhkova A.K., Kuzmenkova N.V., Pryakhin E.A., Mokrov Yu.G., Kalmykov S.N. Artificial radionuclides association with bottom sediment components from Mayak Production Association industrial reservoirs // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2021. — Vol. 232. — Art. 106569. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106569.
23. Kangina O.A., Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Pryakhin E.A. Speciation of uranium in bottom sediments of Reservoir V-17, Mayak Production Association // *Moscow University Chemistry Bulletin*. — 2021. — Vol. 76, № 6. — P. 380–387. — DOI: 10.3103/S002713142106002X.
24. Rozhkova A.K., Kangina O.A., Kuzmenkova N.V., Pryakhin E.A., Mokrov Yu.G. Sequential extraction of plutonium from the bottom sediments of PA Mayak's R-4 and R-17 reservoirs // *Moscow University Chemistry Bulletin*. — 2020. — Vol. 75. — P. 125–129. — DOI: 10.3103/S0027131420020121.
25. Rozhkova A.K., Kuzmenkova N.V., Kangina O.A., Pryakhin E.A., Mokrov Yu.G., Kalmykov S.N. Radionuclide sequential extraction from Reservoir R-17 bottom sediments of the Mayak Production Association // *Radiochemistry*. — 2019. — Vol. 61, № 6. — P. 763–770. — DOI: 10.1134/S1066362219060213.
26. Kuzmenkova N.V., Krupskaya V.V., Duriagina E.V., Semenov I.N., Vinokurov S.E. Radionuclides distribution and its sorption behavior in the surface layer of the Kara Sea bottom sediments // *Geochemistry International*. — 2019. — Vol. 57, № 11. — P. 1213–1220. — DOI: 10.1134/S0016702919110041.
27. Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Garankina E.V., Tulyakov E.D. The ^{232}Th distribution in modern sediments near radioactive Lovchorrite mine, the Khibiny Mountains, Kola Peninsula // *Journal of Geochemical Exploration*. — 2019. — № 200. — P. 77–83. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.01.005.

28. Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Vorobyova T.A. Aerosol activity measurements associated with the burning of peat materials (evacuation zone of the Bryansk Region) // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2020. — Vol. 216. — Art. 106184. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106184.
29. Zelenina D., Kuzmenkova N.V., Sobolev D., Boldyrev K., Namsaraev Z., Artemiev G., Samylina O., Popova N., Safonov A. Biogeochemical factors of Cs, Sr, U, Pu immobilization in bottom sediments of the Upa River, located in the zone of the Chernobyl accident // *Biology*. — 2023. — Vol. 12, № 1. — Art. 10. — DOI: 10.3390/biology12010010.
30. Garankina E.V., Belyaev V.R., Romanenko F.A., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Gurinov A.L., Tulyakov E.D. Magnitude and frequency of debris and slush flows in the Khibiny mountain valleys, Kola Peninsula, NW Russia // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. — 2019. — № 381. — P. 37–47. — DOI: 10.5194/piahs-381-37-2019.
31. Konoplev A.V., Wakiyama Y., Igarashi Y., Kuzmenkova N.V., Golosov V.N., Nanba K. Long-term decline of ^{137}Cs apparent distribution coefficient in the soil–water system as a result of decomposition of glassy hot particles in the Fukushima Daiichi NPP fallout // *Radiochemistry*. — 2026. — Vol. 68, № 2. — P. 181–188. — DOI: 10.1134/S1066362226020098.
32. Poliakova T., Vlasova I., Shiryaev A., Kuzmenkova N.V. [et al.] Structural and isotopic peculiarities of a Chernobyl fuel “hot” particle // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2026. — Vol. 294. — Art. 107926. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2026.107926.
33. Zheltonozhskaya M.V., Zheltonozhsky V.A., Vlasova I.E., Kuzmenkova N.V., Kalmykov S.N. The plutonium isotopes and strontium-90 determination in hot particles by characteristic X-rays // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2020. — Vol. 225. — Art. 106448. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106448.
34. Eremenko E.A., Kuzmenkova N.V., Lavrushin V.Yu., Fuzeina Yu.N., Zhiba R., Aidarkozhina A., Ermakov A.V., Dbar R. Hydrogeochemical characteristics and radionuclide dynamics in the Kyndygsky-1 thermal spring system, Western Transcaucasia // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2025. — DOI: 10.1007/s11356-025-36475-4.
35. Bezhin N.A., Tokar E.A., Kremenchutskii D.A., Kuzmenkova N.V., Shibetskaia I.G., Razina V.A., Kozlovskaya O.N., Turyanskiy V.A., Tananaev I.G. Sorption concentration of ^{234}Th from seawater using various sorbent types // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2025. — Vol. 334, № 7. — P. 4835–4845. — DOI: 10.1007/s10967-025-10220-0.
36. Bezhin N.A., Milyutin V.V., Kuzmenkova N.V., Shibetskaia I.G., Kozlovskaya O.N., Slizchenko E.V., Razina V.A., Tananaev I.G. Radionuclides’ recovery from seawater using FIC and FIC A sorbents // *Materials*. — 2023. — Vol. 16, № 11. — Art. 4181. — DOI: 10.3390/ma16114181.
37. Peretykin A.A., Andreeva S.I., Atamanyuk N.I., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Levina S.G., Kuzmenkova N.V., Fedotova A.K., Mokrov Yu.G., Semyonov M.A., Shishkina E.A., Pryakhin E.A. Bivalves and gastropods are the most vulnerable among hydrobionts in radioactively contaminated reservoirs // *Ruthenica*. — 2026. — Vol. 36, № 1. — DOI: 10.35885/ruthenica.2026.36(1).2.
38. Kuzmenkova N.V., Vorobyova T.A. Landscape-geochemical mapping of territory in the north-west of Kola Peninsula // *Journal of Geochemical Exploration*. — 2015. — № 154. — P. 194–199. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.12.016.

Статьи в журналах из перечня ВАК и базы RSCI

39. Кузьменкова Н.В., Голосов В.Н., Грабенко Е.А., Александрин М.Ю., Шишков В.А., Быхалова О.Н. Скорости осадконакопления в горных озёрах Кавказа как индикаторы темпов денудации на их водосборах // *Известия РАН. Серия географическая*. — 2023. — Т. 87, № 1. — С. 42–59. — DOI: 10.31857/S2587556623010107.
40. Савельева К.В., Дженг Д., Рожкова А.К., Шлык Д.Х., Токарь Э.А., Воробьева Т.А., Кузьменкова Н.В. Природные радионуклиды и цезий-137 в почвах и донных осадках озера Ханка // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. — 2024. — Т. 79, № 2. — С. 54–65. — DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.5.
41. Иванов М.М., Гуринов А.Л., Голосов В.Н., Кузьменкова Н.В., Александрин М.Ю., Успенский М.И., Шоркунов И.Г., Гаранкина Е.В. Донные осадки как природная летопись дегляциации в бассейне озера Сылтранкель, Приэльбрусье // *Криосфера Земли*. — 2024. — Т. 28, № 2. — С. 33–46. — DOI: 10.15372/KZ20240204.

42. Грабенко Е.А., Кузьменкова Н.В., Букин И.О. Модернизация озёрного бура для отбора ненарушенных морских и озёрных отложений различного состава // Геология, география и глобальная энергия. — 2022. — Т. 4, № 87. — С. 122–130. — DOI: 10.54398/20776322_2022_4_122.
43. Коноплев А.В., Иванов М.М., Комиссаров М.А., Голосов В.Н., Кузьменкова Н.В. Реконструкция долговременной динамики радиоцезия в водных объектах, загрязнённых в результате ядерных аварий (Чернобыль и Фукусима) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2024. — Т. 79, № 6. — С. 3–14. — DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.1.
44. Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Кузьменкова Н.В., Захаров А.Л., Медведев А.А., Мельников М.Г. Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область) // Геоморфология и палеогеография. — 2023. — Т. 54, № 4. — С. 145–162. — DOI: 10.31857/S2949178923040047.
45. Иванов М.М., Гуринов А.Л., Иванова Н.Н., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Кузьменкова Н.В., Терская Е.В., Голосов В.Н. Динамика накопления ^{137}Cs в донных осадках Щёкинского водохранилища за постчернобыльский период // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2019. — Т. 59, № 6. — С. 651–663. — DOI: 10.1134/S0869803119060055.
46. Кузьменкова Н.В., Ефимова Л.Е., Иванов М.М., Рожкова А.К., Вада Т., Нанба К., Голосов В.Н. Оценка накопления ^{137}Cs рыбой пресноводного водоёма: результаты исследований в Щёкинском водохранилище // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2020. — Т. 60, № 4. — С. 418–425. — DOI: 10.31857/S0869803120030054.
47. Кузьменкова Н.В., Крупская В.В., Дурягина Е.В., Семенов И.Н., Винокуров С.Е. Распределение радионуклидов и их сорбционное поведение в поверхностном слое донных осадков Карского моря // Геохимия. — 2019. — Т. 64, № 11. — С. 1187–1195.
48. Иванов М.М., Беляев В.Р., Гаранкина Е.В., Гуринов А.Л., Добрыднева Л.В., Кузьменкова Н.В., Романенко Ф.А., Туляков Е.Д. Использование радионуклидов ряда ^{232}Th для изучения экзогенных процессов // Известия РАН. Серия географическая. — 2018. — № 6. — С. 81–92.
49. Рожкова А.К., Кузьменкова Н.В., Сибирцев А.М., Петров В.Г. Метод совместного выделения актиноидов и технеция из водных растворов для целей радиологического мониторинга // Радиоактивные отходы. — 2021. — Т. 17, № 4. — С. 94–103. — DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-94-103.
50. Кангина О.А., Кузьменкова Н.В., Рожкова А.К., Пряхин Е.А. Формы нахождения урана в донных осадках В-17 Производственного объединения «Маяк» // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. — 2021. — Т. 62, № 6. — С. 494–502.
51. Рожкова А.К., Кангина О.А., Кузьменкова Н.В., Пряхин Е.А., Мокров Ю.Г. Последовательное выщелачивание плутония из донных осадков водоёмов В-17 и В-4 Производственного объединения «Маяк» // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. — 2020. — Т. 61, № 2. — С. 153–159.
52. Рожкова А.К., Кузьменкова Н.В., Кангина О.А., Пряхин Е.А., Мокров Ю.Г., Калмыков С.Н. Выщелачивание радионуклидов из донных осадков водоёма В-17 ПО «Маяк» // Радиохимия. — 2019. — Т. 61, № 6. — С. 533–539. — DOI: 10.1134/S0033831119060169.
53. Кузьменкова Н.В., Власова И.Э., Рожкова А.К., Петров В.Г., Романчук А.Ю., Осипов Д.И., Калмыков С.Н., Пряхин Е.А., Плямина О.В., Грачев В.А., Мокров Ю.Г. Распределение радионуклидов между биотическими и абиотическими компонентами радиоактивно загрязнённых водоёмов В-17 и В-4 // Вопросы радиационной безопасности. — 2017. — № 1. — С. 54–66.
54. Желтоножская М.В., Кузьменкова Н.В., Власова И.Э., Полякова Т.Р., Розанов В.В., Черняев А.П. Исследование поведения аварийных топливных выпадений в окружающей среде // Научно-технические технологии. — 2023. — Т. 24, № 1. — С. 13–23. — DOI: 10.18127/j19998465-202301-02.
55. Желтоножская М.В., Желтоножский В.А., Кузьменкова Н.В., Никитин А.Н., Розанов В.В., Черняев А.П. Исследование топливных выпадений пруда-охладителя Чернобыльской АЭС // Научно-технические технологии. — 2021. — Т. 22, № 7. — С. 60–67. — DOI: 10.18127/j19998465-202107-08.
56. Воробьева Т.А., Евсеев А.В., Кузьменкова Н.В. Радиогеохимические исследования состояния ландшафтов Кольского полуострова // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2. — С. 17–26.

57. Кузьменкова Н.В., Кошелева Н.Е., Асадулин Э.Э. Тяжёлые металлы в почвах и лишайниках тундровой и лесотундровой зон на северо-западе Кольского полуострова // Почвоведение. — 2015. — № 2. — С. 244–256. — DOI: 10.7868/S0032180X14100062.
58. Величкин В.И., Кузьменкова Н.В., Кошелева Н.Е., Мирошников А.Ю., Асадулин Э.Э., Воробьева Т.А. Оценка эколого-геохимического состояния почв на северо-западе Кольского полуострова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2012. — № 1. — С. 38–47.
59. Кузьменкова Н.В., Власова И.Э., Калмыков С.Н. Формы нахождения ^{137}Cs в почвах северо-западной части Кольского полуострова // Вопросы радиационной безопасности. — 2011. — № 4. — С. 3–10.
60. Тимофеев И.В., Кузьменкова Н.В. Пространственное распределение ^{137}Cs в почвах г. Озёрск (Челябинская область) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2013. — № 6. — С. 23–30.

Иные публикации по теме диссертации

61. Кузьменкова Н.В. База данных по осадконакоплению и радиоэкологическому состоянию озёр Российской Федерации [Электронный ресурс]. — URL: <https://water-nuclides-russia.tilda.ws>.