На правах рукописи

Колотушкина Лилия Вячеславовна

ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ РТУТИ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ НА ВОДОСБОРЫ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ОБИ

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Барнаул – 2026

Работа выполнена в химико-аналитическом центре (ХАЦ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН), г. Барнаул

Научный руководитель:	**Эйрих Стелла Сергеевна**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул
Официальные оппоненты:	**Ходжер Тамара Викторовна**, доктор географических наук, заведующая лабораторией гидрохимии и химии атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск
	Таций Юрий Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории эволюционной биогеохимии и геоэкологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «04» июня 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте www.iwep.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, Диссертационный совет, e-mail: iwep@iwep.ru.

Автореферат разослан «___» _____2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук И.Д. Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ртуть, а также ее соединения являются токсичными веществами и относятся к 1-му классу опасности. В окружающей среде ртуть может находиться в нескольких формах, различающихся как по физико-химическим свойствам, так и по токсичному воздействию на живые организмы. Особенностью ртутьсодержащих соединений является их поступление и распределение в компонентах окружающей среды с последующим бионакоплением и биомагнификацией в тканях живых организмов (Selin, 2009). В окружающую среду ртуть может поступать как от природных источников (пожары, вулканическая активность, выветривание горных пород и др.), так и от антропогенной деятельности (сжигание угля, кустарная добыча золота, промышленные выбросы, пожары антропогенного происхождения и прочее).

Атомарная ртуть (Hg^0) является доминирующей формой атмосферной ртути (>90%), устойчивой в атмосфере долгое время (год и более). Благодаря низкой растворимости и высокому давлению паров, Hg способна к переносу воздушными массами на тысячи километров, тем самым являясь глобальным загрязнителем (Schroeder et al., 1998; Travnikov, 2012; Zhang et al., 2019). При выведении из атмосферы путем влажного или сухого осаждения ртуть поступает в наземные и водные системы, трансформируясь в более биодоступные токсичные формы (Gworek et al., 2020). Ртуть является глобальным экотоксикантом, способным накапливаться в компонентах окружающей среды, она подлежит ограничению в использовании и обязательному контролю (Минаматская конвенция, 2013; Протокол к Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха (UNECE, 2024)). Ртуть входит в список определяемых показателей международных сетей мониторинга по программам UNEP, EMEP и др. (Bencardino et al., 2024).

Основными источниками поступления ртути в поверхностные воды водных объектов умеренного климата являются ливневый и талый снеговой стоки с водосбора и атмосферный воздух. На водосборе Оби располагаются многочисленные источники эмиссии ртути (ТЭЦ, промпредприятия, факела нефтеперерабатывающих заводов, транспорт, пожары, таяние многолетней мерзлоты), однако данные о содержании ртути в компонентах водных и наземных экосистем, расположенных в бассейне Оби, весьма ограничены и разрознены. Поэтому оценка поступления ртути от источников ее эмиссии в составе атмосферных выпадений на подстилающую поверхность изучаемой территории, а также научное обоснование сети мониторинга, включающей контроль уровней содержания ртути не только в водных экосистемах, но и в составляющих водного стока является крайне важной и актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. ООН (в рамках программы UNEP) регулярно представляет доклады по глобальной оценке ртути в компонентах окружающей среды (воздух, вода, почва, биота и человек), формам нахождения и механизмам ее трансформации в различных средах, атмосферному переносу и негативным последствиям для человека и

окружающей среды (UNEP. Global Mercury Assessment, 2013; AMAP/UN Environment, 2019). Исследования ртути в Арктике проводятся в рамках международной программы контроля стойких загрязняющих веществ (AMAP, 2021), которая привлекает особое внимание, в том числе из-за возможного высвобождения ртути из многолетней мерзлоты в условиях изменяющегося климата (Smith et al., 2024).

Большинство исследований потоков ртути, поступающих на поверхность Земли, выполнены в Северной Америке (55,6%), Азии (25,1%) и Европе (12,8%), в то время как большие территории, включая Россию, остаются менее изученными (Agnan et al., 2016). Единственная станция постоянного мониторинга атмосферной ртути в рамках GMOS на территории РФ находится в пос. Листвянка Иркутской области (Машьянов и др., 2015; Mashyanov et al., 2021); в Российской Арктике – Амдерма (Pankratov et al., 2025); в сети наблюдений Росгидромета - 4 станции УГМС (в ЕЧР и на Дальнем Востоке) (Ежегодник, 2022) и фоновое содержание - в Приокско-Террасном БЗ (Парамонов и Иванов, 2025). Большое внимание в РФ уделяется изучению донных отложений морей, озер и рек (Фёдоров и др., 2019; Захарченко и др., 2020; Ivanov, 2022; Таций и Баранов, 2022; Аксентов и др., 2023; Новиков и др., 2025). Изучение снежного покрова, определяющего химический сток в реки умеренного климата, в основном, проводится в зоне влияния промышленных предприятий и ТЭЦ для оценки уровня загрязнения этих территорий (Андрухова и др., 2007; Темерев и Индюшкин, 2010; Таловская, 2022; Луцкин и др., 2024). При этом данные по анализу ртути в атмосферных осадках, выпадающих на территорию изучаемого региона, и снежном покрове фоновых территорий ограничены коротким временным периодом и не позволяют оценить динамику ее годовых и сезонных потоков.

Комплексные исследования тяжелых металлов, в том числе ртути, в бассейне Оби проводились в 1987-2000 гг. в рамках экологической экспертизы проектов строительства Катунской ГЭС (р. Катунь, бассейн Верхней Оби) и Крапивинского гидроузла (р. Томь, бассейн Средней Оби) (Эйрих, 1999; Папина, 2004). В последующие годы в ИВЭП СО РАН проводился анализ ртути в природных водах Оби и ее притоков, изучалось содержание ртути в рыбе и других гидробионтах (Попов и Андросова, 2014; Яныгина и Эйрих, 2016). Однако эти исследования ограничивались изучением ртути в отдельных компонентах экосистем, а для оценки общего ртутного загрязнения необходимы комплексные исследования, изучающие поступление и распределение ртути во всех природных средах водосбора.

Объектами исследования являются поверхностная природная вода р. Оби, атмосферные осадки, атмосферный воздух и снежный покров на водосборах Верхней и Нижней Оби. **Предмет исследования** – уровни содержания ртути в исследуемых объектах и закономерности ее пространственно-временного распределения.

Цель работы - изучение динамики поступления ртути с атмосферными выпадениями на водосбор р. Оби (на примере урбанизированных и фоновых территорий Верхней и Нижней Оби) для обоснования схемы экологического

мониторинга содержания ртути в природных объектах на водосборах рек с длительным периодом ледостава.

Задачи исследования:

1. Определить уровни содержания ртути в объектах окружающей среды на водосборах Верхней и Нижней Оби.

2. Провести анализ сезонной, межсезонной и межгодовой изменчивости потоков поступления ртути на подстилающую поверхность в пределах водосборов Верхней и Нижней Оби.

3. Выявить источники поступления ртути с атмосферными осадками с использованием обратных траекторий.

4. Провести сравнительную характеристику содержания ртути в природных объектах водосборов Верхней и Нижней Оби.

5. На примере Верхней Оби предложить и обосновать структурную схему регионального мониторинга содержания ртути в объектах окружающей среды для водосборов рек умеренного климата с длительным периодом ледостава.

Научная новизна:

1. Впервые получены данные о содержании ртути в сопряженных компонентах окружающей среды (атмосферном воздухе, осадках, снежном покрове, природных водах) урбанизированных и фоновых участков водосборов Верхней и Нижней Оби. Проведена оценка сезонной и межгодовой динамики содержания ртути в исследуемых объектах.

2. Показано, что на водосборе Нижней Оби в теплый период года наблюдается значительное повышение потока осаждения ртути, что обусловлено не только ее эмиссией от региональных источников, но и возможной ре-эмиссией ртути из почв, в том числе сезонно-талых.

3. Для Нижней Оби вклад ртути в составе атмосферных осадков, выпадавших во время «события истощения атмосферной ртути» (AMDE), в годовой поток ртути составил 16,7% в 2016-2017 гг. и 9,8% в 2017-2018 гг.

4. Предложен способ идентификации глобально-региональных источников поступления ртути на территорию ключевых участков бассейна Оби на основе ее содержания в атмосферных осадках с использованием метода построения обратных траекторий движения воздушных масс (модель HYSPLIT).

5. На примере Верхней Оби обоснована и реализована многофункциональная схема мониторинга ртути в сопряженных средах на водосборах рек умеренного климата, включающая обязательную экологическую оценку водных объектов по уровню ее содержания в рыбе.

Практическая значимость работы. Результаты многолетних исследований содержания ртути в сопряженных природных средах в бассейне Оби являются актуальными для построения и верификации моделей оценки глобальной и региональной эмиссии ртути. Рассчитанные оценки сезонных и годовых потоков осаждения ртути в составе атмосферных выпадений можно использовать при изучении процессов на водосборах рек с длительным периодом ледостава. В качестве важного прикладного значения следует

отметить регистрацию базы данных по пространственно-временной динамике ртути в снежном покрове и атмосферном воздухе.

Обоснованная на примере бассейна Верхней Оби структурная схема мониторинга ртути в составляющих водного стока (осадках, снежном покрове, речном стоке) была включена в практику работы Верхне-Обского бассейнового управления (справка о внедрении) и может быть успешно использована для прогноза уровня содержания ртути в период открытого русла для других рек. Предложение включить методику US EPA 1631e, позволяющую определять ультранизкие концентрации Hg (менее 1 нг/л) в природных водах, в список допущенных для государственного контроля позволит мониторинговым службам РФ достоверно определять концентрации ртути в воде на фоновом уровне.

Методы исследования. В работе использован комплекс современных методов отбора и инструментального химического анализа. Так, определение ртути в жидких исследуемых образцах выполнено с помощью атомно-флуоресцентного анализатора Mercur DUO Plus, анализ проб воздуха – на анализаторе ртути РА-915М, основанном на дифференциальной атомно-абсорбционной спектрометрии с зеемановской коррекцией неселективного поглощения. Систематизацию и статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Office Excel. Траекторное моделирование реализовывали с использованием HYSPLIT (https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php). Для определения необходимых климатических и гидрологических параметров использовали данные метеостанции ХАЦ ИВЭП СО РАН, архивные данные с сайта прогноза погоды (https://rp5.ru), специализированные массивы данных для климатических исследований (http://aisori-m.meteo.ru), а также данные автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) (https://gmvo.skniivh.ru).

Положения, выносимые на защиту

1. Наиболее высокое содержание ртути в компонентах окружающей среды для бассейна Верхней Оби отмечается в зимний отопительный сезон за счет интенсивного сжигания угля на ТЭЦ, а также в весенний период вследствие десорбции ртути из снежного покрова под воздействием солнечной радиации.
2. Для бассейна Нижней Оби увеличение содержания ртути в компонентах окружающей среды происходит в теплый период при таянии многолетней мерзлоты и весной в период AMDE («события истощения атмосферной ртути»).
3. Способ идентификации глобально-региональных источников поступления ртути на территорию ключевых участков бассейна Оби на основе результатов ее определения в атмосферных осадках.
4. Для экологической оценки загрязнения водосборов рек умеренного климата ртутью и прогноза ее поступления в речную воду необходимо организовать мониторинг состояния качества объектов окружающей среды, формирующих речной сток (атмосферный воздух и осадки, снежный покров), а общую экологическую оценку водных объектов проводить по уровню ее содержания в рыбе.

Степень достоверности и апробация результатов исследований. Достоверность результатов и доказательность научных положений обоснована значительным массивом данных и их статистической обработкой. Достоверность определений ртути в объектах окружающей среды подтверждена контролем качества, а также межлабораторными сличительными испытаниями. Представленная в диссертационной работе схема мониторинга ртути прошла апробацию при проведении независимой экспертной оценки содержания ртути в Новосибирском водохранилище. Материалы диссертации докладывались на 4 международных, 8 всероссийских и 12 региональных конференциях, в том числе профильных по изучению ртути. Результаты исследований вошли в ГБ отчеты о НИР ИВЭП СО РАН FUFZ № 0306-2021-0004 (2021-2025 гг.), отчеты по проекту РФФИ № 19-05-50057 (2020-2022 гг.), отчеты по гос. контракту на выполнение НИР от 11.05.2022 № 017310001132000004 (2022-2023 гг.), а также по гос. заданию АлтГУ FZMW-2024-0003 (2025 г.).

Фактический материал и личный вклад автора в работу. В основу работы положен фактический материал, полученный при выполнении научно-исследовательских работ в период обучения автора в бакалавриате и магистратуре АлтГУ, а затем в аспирантуре ИВЭП СО РАН. Исследования проводились в период 2016-2024 гг. в ХАЦ ИВЭП СО РАН, а также в сотрудничестве со специалистами ГКУ ЯНАО НЦИА. Отбор проб проводили в период 2016-2024 гг. в выбранных точках наблюдения. Было отобрано и проанализировано: 594 пробы влажных атмосферных осадков, 103 пробы снежного покрова, 294 пробы атмосферного воздуха и 111 проб природной поверхностной воды. Автор принимала непосредственное участие в организации и проведении экспедиций; выполняла отбор, подготовку и анализ проб на содержание в них ртути, а также проводила обработку результатов исследований.

Публикации. Научные результаты по теме диссертации опубликованы в 21 работе, среди них 2 статьи в журналах Web of Science и Scopus, 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, а также зарегистрирована 1 база данных.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 149 страницах машинного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка литературы и приложения. В список литературы включены 234 наименований литературных источников, в том числе 117 на иностранном языке. Работа иллюстрирована 45 рисунками и содержит 23 таблицы. Приложение представлено на 8 страницах.

Благодарности: Автор выражает особую благодарность за постоянную поддержку, ценные советы, рекомендации и значительный вклад в осуществление данной работы научному руководителю к.х.н. Эйрих Стелле Сергеевне и начальнику Химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН д.х.н. Папиной Татьяне Савельевне; за помощь в отборе проб и обсуждении результатов, редактирования текста работы всему коллективу ХАЦ ИВЭП СО РАН; за ценные консультации и советы к.г.н. Курепиной Н.Ю. и Ловцкой О.В. Также автор выражает благодарности сотрудникам Лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН к.б.н. Котовщикову А.В. и Парадосских В.Л. за помощь при отборе проб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы; рассмотрена степень разработанности темы; определены цель и задачи исследования; сформулированы положения, выносимые на защиту; представлена научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов; даны сведения об апробации работы и личном вкладе автора в исследование.

В **главе 1 «Ртуть в объектах окружающей среды»** выполнен обзор литературы, представляющий ртуть как глобальный загрязнитель и экотоксикант, приведены ее физические и химические свойства, формы нахождения в природе и нормативы ее содержания в объектах окружающей среды. Рассмотрены оценки эмиссии ртути из различных источников в окружающую среду, представлены исследования круговорота ртути и уровней ее содержания и трансформации в различных экосистемах: в атмосфере (атмосферном воздухе и осадках), гидросфере (природной воде), наземных экосистемах и криосфере (снежном покрове). Приведены особенности отбора проб, их пробоподготовки и методики определения ртути в зависимости от объекта исследования. Рассмотрены проблемы определения ртути в различных средах, инструментальные возможности и методические ограничения, а также пути решения возникающих проблем. Представлена сравнительная информация об используемых в РФ и других странах методиках определения ртути в различных объектах окружающей среды.

В **главе 2 «Объекты и материалы исследования»** приведены основные физико-географические и гидрологические характеристики бассейна р. Обь, представлена информация о разделении бассейна на три основных участка: Верхнюю, Среднюю и Нижнюю Обь (рис. 1). В главе подробно представлены физико-географические, гидрологические и метеорологические характеристики водосборов Верхней и Нижней Оби. Для Верхней Оби рассматривается участок водосбора, расположенный на территории Алтайского края – от г. Бийска до Новосибирского водохранилища. Климат изучаемой территории умеренно-континентальный с преобладанием юго-западных, западных и южных ветров. Лето наступает во второй половине мая и длится до середины сентября. Зима длится с ноября по апрель. Среднегодовое количество осадков составляет 433 мм (около 65 % выпадает в тёплый период года).

Водосбор Нижней Оби располагается на территории Уральского федерального округа в районах Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов. Дельта и устье р. Обь находятся на территории ЯНАО, на севере Западно-Сибирской равнины, за Полярным кругом. В нижнем течении р. Обь пересекает три климатические зоны: умеренно-континентальную, субарктическую и арктическую. Климат характеризуется коротким прохладным летом и продолжительной суровой зимой, температура воздуха может опускаться до -60°С. Зима длится до восьми месяцев, начинаясь в октябре-ноябре и заканчиваясь в конце мая. Для холодного периода года характерны низкая облачность, небольшое количество солнечных дней и глубокое промерзание почвы.

Годовое количество осадков колеблется от 400 до 500 мм, летние осадки преобладают над зимними. Для обеих изучаемых территорий разделение на теплый и холодный периоды проводили по типу выпадающих осадков (теплый период – дождь, холодный период – снег) и по температурному режиму, где за начало теплого периода принимали устойчивый переход выше 0°С, а холодного – ниже 0°С.

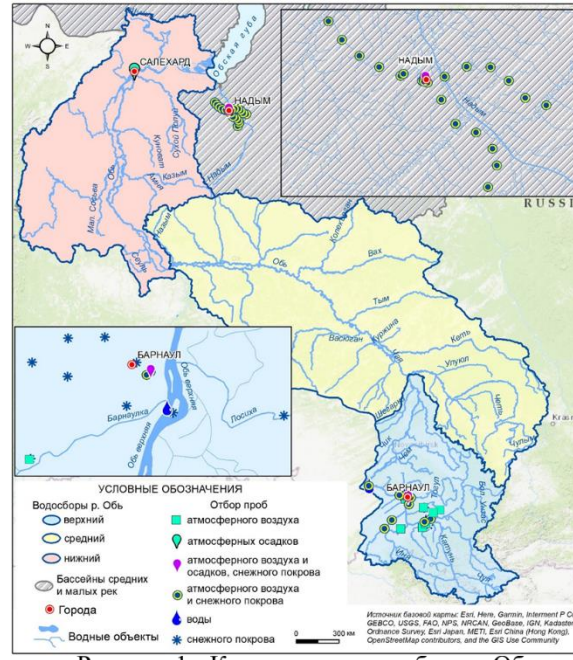

Рисунок 1 - Карта-схема водосбора р.Обь

Отбор и анализ проб **атмосферного воздуха** проводили на фоновых и урбанизированных территориях в различные сезоны года в период с марта 2021 по март 2023 гг. Пробы отбирали в соответствии с РД 52.04.186-89. Перед началом измерений фиксировали погодные условия. Концентрации газообразной ртути определяли в пробах атмосферного воздуха с использованием анализатора ртути «РА-915М» по методике ПУ 61-2017. Отбор проб **атмосферных осадков** проводили после каждого случая их выпадения на экспериментальной площадке ИВЭП СО РАН (~25 м от поверхности земли для устранения влияния локальных приземных источников загрязнения) (РД 52.04.186-89, РД 52.04.878-2019). **Снежный покров** отбирали на всю глубину его залегания в период максимального снегонакопления (конец февраля-начало марта) с использованием снегоотборника, изготовленного в ХАЦ ИВЭП СО РАН. В каждой точке отбора фиксировали высоту снежного покрова и массу отобранной пробы. Отбор проб **поверхностной воды** проводили в соответствии с (ГОСТ Р 59024-2020, Р 52.24.353-2012), выбирая наиболее представительный участок реки в соответствии с поставленной задачей. Пробы воды отбирали на глубине 0,2h в трех точках створа: левый берег – стрежень – правый берег. На месте отбора фиксировали физико-химические показатели воды и проводили фильтрование отобранных проб через мембранный фильтр (0,45 мкм) для раздельного определения растворенной ртути и ее общего содержания. Подготовку дождевых проб, талого снега, природной воды проводили в соответствии с методом US EPA 1631e, анализ проб выполняли методом атомно-флуоресцентной спектроскопии с использованием анализатора ртути «Mercur DUO Plus». Образцы **рыбы** были предоставлены для анализа сотрудниками Верхне-Обского

БВУ. Пробы мышечной ткани отбирали в количестве 2-5 г., микроволновое кислотное разложение проб проводили в установке MARS-5. Анализ проводили в соответствии с US EPA 1631e, приложение EPA-821-R-01-013.

В главе подробно описаны особенности отбора и подготовки проб исследуемых объектов к анализу; характеристики используемых в работе анализаторов ртути, соответствие используемых методик критериям контроля качества, приведены формулы расчетов средневзвешенных концентраций, потоков ртути и статистической обработки результатов.

В главе 3 «Особенности поступления и пространственно-временного распределения ртути на равнинном участке водосбора Верхней Оби» приводятся результаты исследования пространственно-временного распределения ртути: в атмосферном воздухе Алтайского края и г. Барнаула; ее концентрации и потоки в составе атмосферных осадков**;** содержание в снежном покрове и в природной поверхностной воде р. Обь, а также сравнение уровней содержания Hg в исследуемых объектах с данными для других регионов Северного полушария. На территории Алтайского края и г. Барнаула (рис.1) исследования проводили в период 2018-2023 гг. Для оценки поступления ртути на водосбор было отобрано и проанализировано 210 проб атмосферного воздуха и 416 проб осадков, 85 проб снежного покрова и 111 проб природной поверхностной воды.

Результаты определения **атмосферной ртути в воздухе** урбанизированных и фоновых районов Алтайского края показали, что в холодный период наблюдалось увеличение концентрации атмосферной ртути во всех точках наблюдения (рис.2). Прежде всего, это связано с эмиссией ртути в атмосферу при сжигании угля. Изучение внутригодовой динамики содержания ртути в атмосферном воздухе фоновой территории (с. Гоньба) показало, что максимальное влияние антропогенной нагрузки от города проявлялось в декабре и марте (рис.3), что связано с увеличением поступления Hg в отопительный период, а также интенсивным сжиганием топлива автомобильным транспортом. В весенний период (март-апрель) дополнительно добавляется активная ее ре-эмиссия из снега, что наблюдалось как для урбанизированных, так и фоновых территорий. Минимальными концентрациями Hg характеризовался летний период, особенно период дождей, когда ртуть интенсивно вымывается из атмосферы.

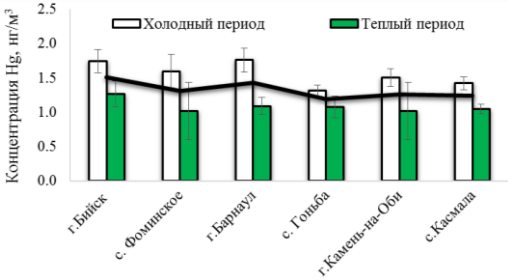

Рисунок 2 – Пространственное распределение ртути в атмосферном воздухе урбанизированных и фоновых территорий за период 2021-2024 гг.

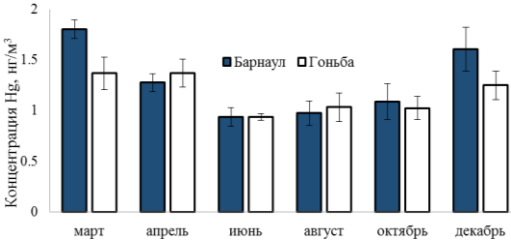

Рисунок 3 – Сезонное распределение ртути в воздухе урбанизированных (г. Барнаул) и фоновых территорий (с. Гоньба) за период 2021–2024 гг.

По результатам пятилетних наблюдений 2018-2023 гг. концентрация ртути **в атмосферных осадках (АО)** изменялись в широком диапазоне: от <1 нг/л до 130 нг/л. Данные таблицы 1 свидетельствуют, что среднесезонная концентрация Hg в холодный период была выше, чем в теплый. Исключение составлял теплый период 2019 г., что обусловлено большим количеством максимальных единичных концентраций. Похожая ситуация наблюдалась и в холодный период 2020-2021 гг. В теплые периоды АО более обильные, чем в холодные, что приводит не только к вымыванию ртути из атмосферы, но и к последующему снижению ее концентраций за счет разбавления.

Таблица 1. Размах варьирования, средние концентрации ртути и ее аномально высокие значения во влажных атмосферных осадках г. Барнаула в теплые и холодные периоды 2018 – 2023 гг.

Год	Снег, Hg (нг/л)				Год	Дождь, Hg (нг/л)				Hg > $C_{ср}$±2σ	
	сред	мин	макс	SD		сред	мин	макс	SD	дата	Hg, нг/л
2018-2019	15,8	6,7	49,3	11,0	2019	24,8	5,7	129,5	21,8	15.05.19	130,0
										31.05.19	75,1
										08.08.19	55,8
2019-2020	12,7	4,1	38,5	7,4	2020	13,1	2,3	60,1	12,6	09.12.19	38,5
										17.02.20	29,1
										10.07.20	60,1
2020-2021	24,9	3,1	115,4	24,6	2021	16,1	1,6	95,3	16,3	13.07.20	59,3
										24.12.20	115,0
2021-2022	15,5	2,7	66,2	13,4	2022	13,1	1,2	85,1	14,0	16.02.21	97,0
										03.03.21	82,3
										15.07.21	95,3
2022-2023	17,1	2,2	55,4	13,4	2023	16,2	< 1	45,5	9,7	08.03.22	66,2
										23.05.22	85,1
										07.12.22	55,4
										13.02.23	47,5

Для выявления глобально-региональных источников поступления ртути на территорию ключевых участков бассейна Оби был предложен способ группировки массива данных на основе концентраций и потоков ртути в составе АО по следующей схеме: I - высокая концентрация ртути и большой поток ее поступления; II - высокая концентрация, но малый поток; III - низкая концентрация, но большой поток; IV - высокая концентрация Hg во время AMDE. Для идентификации возможных источников ртутного загрязнения были сгенерированы модели обратных траекторий движения воздушных масс HYSPLIT на даты выпадения осадков на изучаемую территорию, как в теплый, так и в холодный периоды (рис. 4).

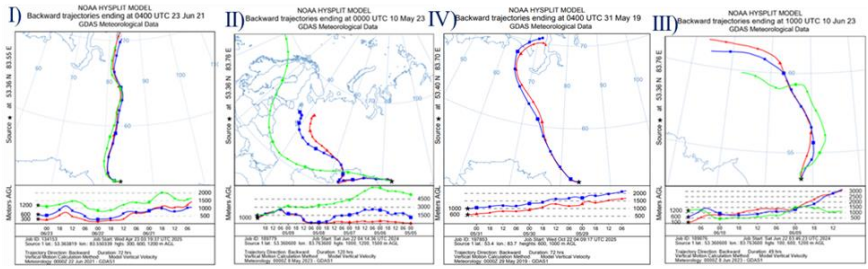

Рисунок 4 – Обратные траектории движения воздушных масс, построенные с помощью моделей HYSPLIT для атмосферных выпадений на водосбор Верхней Оби

Вклад дальнего переноса с территорий Центральной Азии, Европы и Северных морей был выше в холодный период, чем в теплый. Дополнительно в холодный период - поступление ртути от региональных источников сжигания угля и

топлива. В теплый период возрастает вклад Западной Сибири, концентрации ртути в осадках формируются, в первую очередь, локально-региональными источниками.

Анализ сезонных средневзвешенных концентраций ртути (Cvwc) в АО, рассчитанных для теплых и холодных периодов за пять лет, показал (рис.5), что с 2018 г. наблюдалась тенденция к снижению концентраций ртути в теплый период с ее некоторым повышением в последний год. Повышенные концентрации ртути в летние периоды 2019 и 2023 гг. обусловлены значительной пылевой нагрузкой. По нашему мнению, снижение концентраций ртути в зимние периоды последних двух лет связаны с переводом частных котельных на газ и с совершенствованием системы очистки на ТЭЦ. Средневзвешенная концентрация ртути в осадках холодного периода за 5 лет составила 13,2 ± 2,7 нг/л, а в осадках теплого 13,3 ± 4,0 нг/л.

Расчет потоков выпадения ртути в составе АО сезонных и межгодовых трендов не выявил из-за существенного различия в годовых количествах осадков (рис.6). Среднегодовой поток осаждения ртути составил 4,8 мкг/м^2 в год.

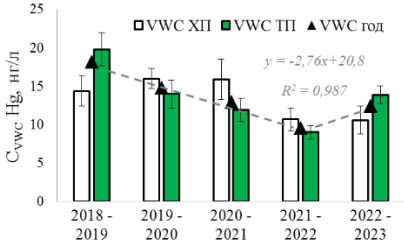

Рисунок 5 – Средневзвешенные концентрации ртути в атмосферных осадках, выпавших в период 2018-2023 гг.

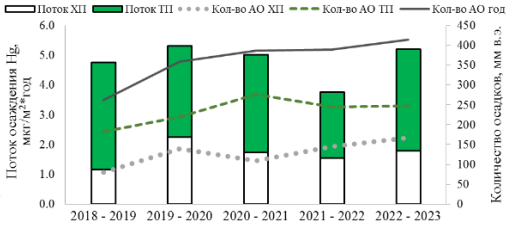

Рисунок 6 – Количество атмосферных осадков и сезонные потоки ртути в теплый и холодный периоды 2018-2023 гг.

Достоверная средняя положительная корреляция потоков осаждения с количеством выпавших осадков наблюдалась для холодного и теплого периодов (r=0,63 и r=0,68, соответственно). Это свидетельствует о наличии постоянных источников загрязнения, как глобальных, так и региональных.

Результаты анализа проб **снежного покрова** на территории г. Барнаула показали (рис.7), что наиболее загрязненные ртутью точки отбора в основном относятся к городской транспортно-нагруженной территории и промышленной зоне (4,1-32,0 нг/л). Уровень загрязнения в частном секторе немного ниже (5,0-13,0 нг/л) вследствие полной или частичной газификации. Наименьшие концентрации наблюдались в фоновых районах (1,9-5,3 нг/л). Отличие концентраций для

Точка отбора	Концентрация ртути, нг/л			
	Мин.	Макс.	Сред.	SD
Городские транспортно-нагруженные территории				
1	8,3	13,8	11,1	3,1
4	6,5	14,3	10,1	3,1
5	8,5	23,1	12,9	5,3
7	8,2	32,0	16,7	9,4
Городская промышленная зона				
2	9,8	15,7	12,0	2,1
3	4,1	21,3	11,0	5,8
Частный сектор				
6	7,6	10,1	9,3	1,0
8	5,0	13,0	8,8	3,1
Фоновые точки				
9	1,9	5,3	3,6	1,4
10	3,1	4,5	3,8	0,6

Наиболее загрязненные

Ниже городского

Наименее загрязненные

Рисунок 7 – Содержание Hg в снежном покрове г. Барнаул и его фоновых территорий за 2018 – 2023 гг.

фоновых и городских территорий – более трех раз. В снеге ртуть претерпевает ряд разнонаправленных процессов, приводящих к ее накоплению или потери из снежного покрова. Невозможно оценить влияние каждого процесса в отдельности, однако, можно рассчитать результирующую ее трансформации. Для этого было проведено сравнение средних концентраций ртути в городском снежном покрове (от его залегания до максимального снегонакопления) относительно средневзвешенной концентрации осадков за аналогичный период. Изменения концентраций указывают на преобладание потери ртути из снежного покрова, отличаясь для разных лет (28,2-50,6%) в зависимости от погодных условий (количество выпавших осадков, температура, солнечная радиация и пр.). Результирующая изменения концентрации ртути в снежном покрове, рассчитанная за 5-летний период, составила 37,6%.

Анализ динамики **содержания ртути в поверхностных водах** выполнен за период 2021–2022 гг. на 4 участках Оби, расположенных вблизи гидрологических постов ФГБУ Западно-Сибирского УГМС (гидропосты: с. Фоминское, г. Барнаул, с. Гоньба, г. Камень-на-Оби), а также на ее притоках на территории г. Барнаула (устья рек Барнаулки и Пивоварки). Были выделены следующие сезоны: подледный период, зимняя межень (отбор проб 12-14.03.22 г.), половодье (отбор проб 15-27.04.22 г.), летний паводок (отбор проб 08-14.06.22 г.), осенняя межень (отбор проб 04-06.10.22 г.). Результаты показали (рис.8), что наибольшие концентрации общих форм ртути были отмечены для Оби в весенний период (6,3-7,9 нг/л), минимальные – в зимний (>0,5-1,8 нг/л) и осенний (1,0-1,3 нг/л) периоды, невысокий уровень (1,2-3,6 нг/л) в летний период. Тогда как для городских притоков наибольшие концентрации ртути наблюдались в летний период (2,0-9,4 нг/л), вероятно, вследствие поступления ртути в составе ливневых вод. Так как наибольшие концентрации ртути отмечались в период весеннего половодья, то весной 2021 г. было проведено детальное исследование растворенных форм ртути и ее общего содержания в изучаемых створах (рис.9). Для этого часть пробы воды фильтровали, а затем раздельно анализировали фильтрованную и нефильтрованную части. Содержание ртути во всех фильтрованных пробах находилось на уровне менее 5 нг/л, не превышая ПДК$_{р/х}$. Вариабельность концентраций ртути по створам была незначительна. Содержание общей ртути варьировало в диапазоне от 10,8 до 16,5 нг/л. Полученные результаты хорошо согласуются с ретроспективными многолетними данными ИВЭП СО РАН о низких содержаниях ртути в поверхностных водах р. Обь. В то же время по данным, представляемым ГНС Росгидромета (1990-2014 гг.) концентрации Hg превышали ПДК$_{р/х}$ в 32% проб воды р. Оби в створе у г. Барнаула, достигая 150 ПДК$_{р/х}$.

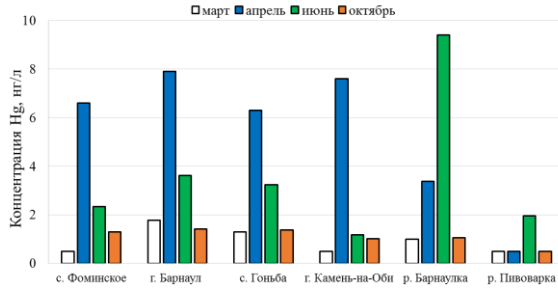

Рисунок 8 – Сезонное распределение ртути в водах р. Обь и ее городских притоков в 2022 г.

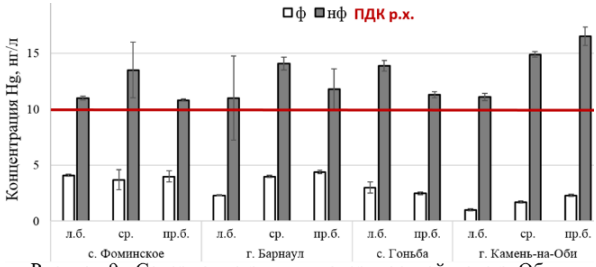

Рисунок 9 - Содержание ртути в поверхностной воде р. Обь в период весеннего половодья 2021 г.

Результаты, полученные в рамках сетей комплексного фонового мониторинга РФ за 2020 г., также указывают на значительные превышения $ПДК_{р/х}$. Такая ситуация может быть связана с методическими проблемами: отбором, пробоподготовкой и недостаточно чувствительными методами определения. Так, аттестованные в РФ методики позволяют определять ртуть от 10 нг/л, а по международным данным фоновые уровни ртути в воде незагрязненных пресноводных экосистем не превышают 3 нг/л. Таким образом, показано, что аттестованные и использующиеся контролирующими службами РФ методики не могут быть применимы для определения реальных концентраций ртути в незагрязненных пресных водах. В этой связи, мы предлагаем внедрить в работу контролирующих служб РФ методику US EPA 1631e, позволяющую определять ультранизкие концентрации ртути (от 0,5 нг/л).

В главе 4 «Распределение ртути в объектах окружающей среды водосбора Нижней Оби» приводятся результаты исследования пространственного распределения ртути в атмосферном воздухе на водосборе Нижней Оби; концентрации и потоки ртути, поступающей с атмосферными осадками на изучаемую территорию; ее содержание в снежном покрове водосбора; а также оценка вклада AMDE в годовые выпадения ртути в г. Надым, идентификация источников загрязнения и сравнение уровней содержания Hg в исследуемых объектах с данными для других арктических регионов Северного полушария.

Исследование содержания ртути и отбор проб проводили в период 2016-2023 гг. Для оценки поступления ртути на водосбор Нижней Оби было отобрано и проанализировано 84 пробы атмосферного воздуха, 178 проб атмосферных осадков, 18 проб интегрального снежного покрова. Отбор и анализ проб атмосферного воздуха и снежного покрова был проведен на городской территории Надыма и в удаленных от города районах в апреле 2023 г. (рис.1). Было выбрано 3 направления, которые соответствуют наиболее оживленным маршрутам протяженностью до 50 км: г. Надым – г. Салехард, г. Надым – г. Новый Уренгой, г. Надым – пос. Ягельный. Каждая точка находилась на равноудаленном расстоянии (10 км) друг от друга. В пределах города было отобрано 8 проб атмосферного воздуха. Отбор проб АО проводили на мониторинговой площадке Научного центра изучения Арктики (НЦИА). Содержание ртути в городском воздухе Надыма варьировало от <0,5 до 1,47 нг/м^3; по направлению г. Надым – г. Салехард от <0,5 до 1,27 нг/м^3; по направлению г. Надым – г. Новый Уренгой от <0,5 до 1,11 нг/м^3; по направлению г. Надым – пос. Ягельный от <0,5 до 0,99 нг/м^3. Среднее **содержание ртути в воздухе** городской территории Надыма

составляло 0,70 нг/м^3, а для удаленных от города территорий – 0,58 нг/м^3. Сравнение со среднегодовыми концентрациями Hg^0 в воздухе урбанизированных территорий Верхней Оби (1,4-1,5 нг/м^3) и средним уровнем для Северного полушария (1,7 нг/м^3) показало, что содержание ртути в воздухе Нижней Оби меньше в 2-3 раза. **Концентрация ртути в атмосферных осадках** Надыма (табл. 2) изменялась от 1 до 29,4 нг/л в теплый период и от <0,5 до 63,3 нг/л в холодный, с максимальными концентрациями в весенний период (середина мая). Сравнение средних концентраций в Надыме и Салехарде в холодный период показало, что концентрации ртути были близки в 2016-2017 гг. и различались почти в три раза в 2017-2018 гг., что может быть связано с укороченным периодом отбора проб в Салехарде. Средневзвешенные концентрации ртути (C_{VWC}) в АО Надыма и Салехарда близки, хотя C_{VWC} в Салехарде ниже, чем в Надыме в оба года.

Таблица 2. Средние значения, диапазоны и средневзвешенные концентрации (C_{VWC}) ртути в АО Салехарда и Надыма в 2016-2018 гг.

Город	Концентрация Hg, нг/л				Период
	Мин.	Макс.	Сред.	C_{VWC}	
Холодный период					
Салехард	1,5	26,1	6,6	5,4	5.10.2016–01.05.2017*
	1,2	20,4	5,5	5,6	01.11.2017–18.04.2018*
Надым	<0,5	27,5	6,3	6,6	26.10.2016–29.05.2017
	<0,5	63,3	14,8	8,6	14.10.2017–03.07.2018
Теплый период					
Надым	3,7	22,6	8,6	6,3	30.05.2017–13.10.2017
	1,0	29,4	12,2	10,5	04.07.2018–12.10.2018

* неполный холодный период.

Сезонная динамика C_{VWC} ртути в атмосферных осадках выявила статистически значимый рост в теплый период 2017-2018 гг. (рис.10). Годовые C_{VWC} Hg во влажных осадках в Надыме составили 6,7 и 10,0 нг/л, что демонстрирует рост примерно на 56 % с 2016-2017 по 2017-2018 годы. Этот результат противоречит тенденции к снижению концентраций ртути в воздухе и атмосферных выпадениях, наблюдаемой в последние годы на многих станциях мониторинга в США, Канаде и Европе и объясняемой снижением антропогенных выбросов. Средняя C_{VWC} ртути в атмосферных осадках в Надыме сопоставима со значениями, полученными для других урбанизированных территорий (рис.11) (Sakata et al., 2005; Gichuki & Mason, 2013; Huang et al., 2013; Siudek et al., 2015; Tripathee et al., 2019; Zhou et al., 2018), хотя значительно ниже значений, полученных для городов с сильным загрязнением воздуха, таких как Шанхай, Китай. Годовые потоки атмосферных выпадений ртути на территорию г. Надым составили 2,7 мкг/м^2 и 4,4 мкг/м^2 в 2016-2017 и 2017-2018 годах, соответственно. При этом годовое количество осадков увеличилось незначительно.

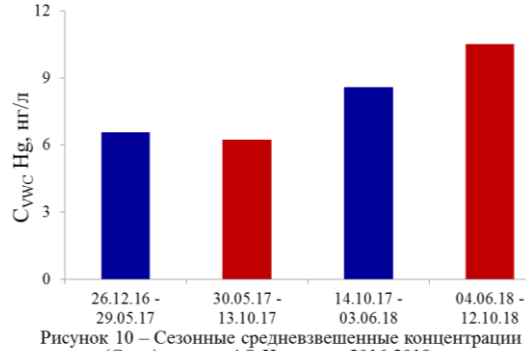

Рисунок 10 – Сезонные средневзвешенные концентрации (C_{VWC}) ртути в АО Надыма в 2016-2018 гг.

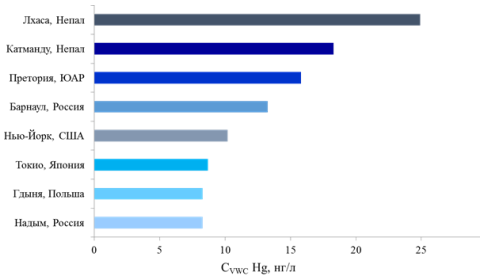

Рисунок 11 – Годовые средневзвешенные концентрации (C_{VWC}) Hg в АО различных урбанизированных районов

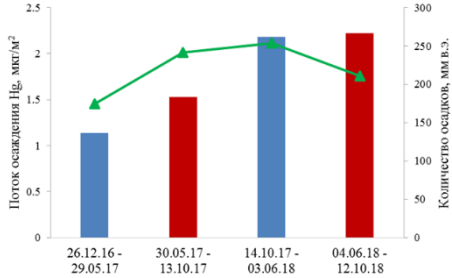

Рисунок 12 – Сезонные атмосферные осадки и потоки выпадений ртути в Надыме

Сезонные потоки ртути в составе влажных атмосферных выпадений (рис.12) варьировали от 1,14 до 2,22 мкг/м^2. В холодный период увеличение потока ртути преимущественно обусловлено межгодовой сезонной изменчивостью количества атмосферных осадков, тогда как в теплый период 2018 г. наблюдается их увеличение (более, чем на 30%), несмотря на снижение количества осадков. Это может быть связано не только с эмиссией Hg от региональных источников, но и ее ре-эмиссией из почв, в том числе сезонно-талых. Ртуть в многолетнемерзлых почвах представляет собой экологический риск как большой резервуар накопленной Hg (Schuster et al., 2018), а толщина сезонно-талого слоя в Надымском районе в 2018 г. увеличилась до 37 см по сравнению со средне-десятилетним значением.

Максимальные значения в пробах осадков были обнаружены весной, что, мы связываем с явлением AMDE. Рассчитанные потоки осаждения ртути за период AMDE в общий ее годовой поток составили 16,7 % в 2016-2017 гг. и 9,8 % в 2017-2018 гг., что выше значений, рассчитанных Обристом и коллегами (<5%) (Obrist et al., 2017).

Для выявления основных региональных и глобальных источников поступления ртути в атмосферу водосбора Нижней Оби были выделены даты осадков с высокими ее концентрациями и/или потоками и сгруппированы в соответствии со способом, приведенном в главе 3 (рис. 13).

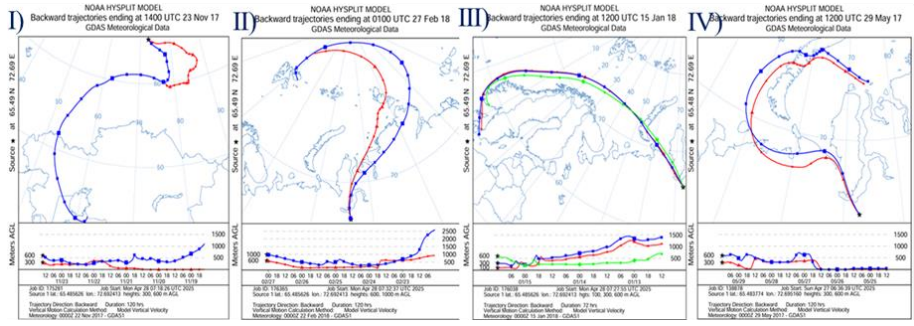

Рисунок 13 – Обратные траектории движения воздушных масс, построенные с помощью моделей HYSPLIT для атмосферных выпадений на водосбор Нижней Оби

Основные предполагаемые источники поступления ртути на территорию ЯНАО: трансграничный перенос с воздушными массами с территорий Центральной Азии и Западной Сибири, Западной части Евразии и территорий Северных морей, выбросы ртути в атмосферу при пожарах, значительные региональные и локальные поступления от сжигания газа и нефти электростанциями и заводами.

Концентрации ртути в снежном покрове г. Надым невысокие и находятся на уровне, характерном для территорий высоких широт (менее 6 нг/л). Сравнение уровней содержания ртути в снежном покрове городов Барнаул и Надым показало, что средние и медианные концентрации в г. Надым ниже ~ в 3 раза т.к. территория города не является транспортно-нагруженной, а отопление города – газовое.

В главе 5 «Экологический мониторинг содержания ртути в компонентах окружающей среды на примере водосбора Верхней Оби» представлен обзор нормативной базы, регламентирующей мониторинг водных объектов в РФ, приведены федеральные проекты, участвующие в развитии системы экологического мониторинга, в том числе действующие на территории Алтайского края. Выполнен обзор существующих мониторинговых программ и сетей наблюдения ртути, реализуемых в мире и в пределах нашей страны. Показано, что государственная система наблюдений, выполняя функции глобального мониторинга, не настроена на специфику определения ртути при контроле состояния окружающей среды в целом (Государственный доклад…, 2024), поэтому необходима разработка такого рода региональных схем. Нами предложена и обоснована схема многофункционального мониторинга ртути в объектах окружающей среды для водосборов рек умеренного климата. В зависимости от целей и задач мониторинга предлагаем проводить определение ртути по следующим составляющим (рис. 14):

- в атмосферном воздухе, осадках и снежном покрове (I–III) на удаленных территориях, таких как биосферные заповедники – для оценки фонового уровня загрязнения;
- в атмосферном воздухе, снежном покрове и природной воде в створах выше и ниже города (I, III, IV) – для оценки антропогенного влияния урбанизированных территорий;
- в снежном покрове в пойме реки (III) – для прогнозных оценок уровня содержания ртути в период открытого русла;
- в природной воде и рыбе (IV–V) – для современной общей оценки ртутной экологической безопасности водного объекта;
- в атмосферных осадках (II) – для построения и верификации моделей оценки глобальной и региональной эмиссии ртути.

Комплексное определение ртути в сопряженной системе «атмосферный воздух - атмосферные осадки - снежный покров - природная вода», а также рыбе (I – V) позволяет оценить общее поступление ртути на водосбор, ее распределение и динамику содержания в различных компонентах водной экосистемы.

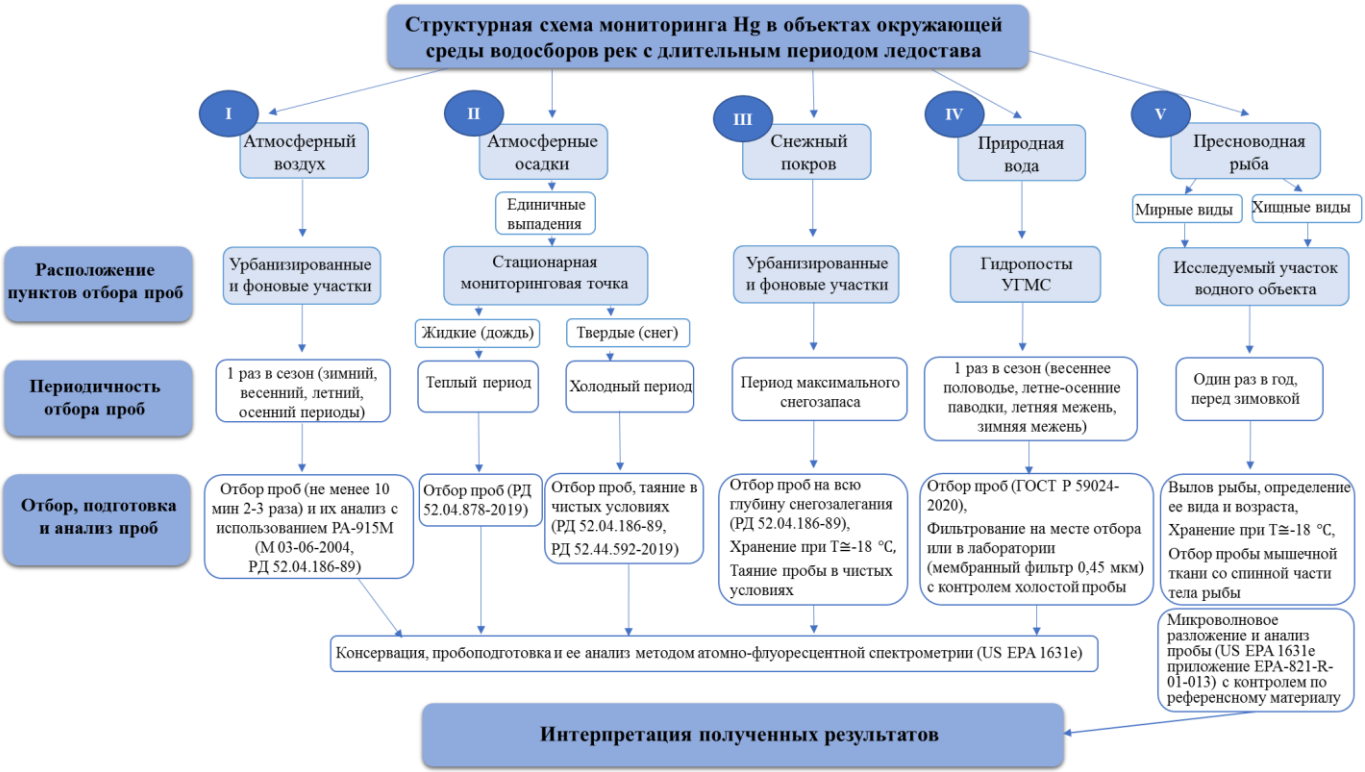

Рисунок 14 – Структурная схема мониторинга Hg в объектах окружающей среды водосборов рек с длительным периодом ледостава

Для объектов окружающей среды, участвующих в формировании стока рек с длительным периодом ледостава, предлагается мониторинг содержания ртути в пробах:

– атмосферных осадков (после каждого их выпадения) на стационарной точке наблюдения;

– атмосферного воздуха, учитывающий пространственное (урбанизированные и фоновые участки водосбора) и сезонное (не менее 1 раза в климатический сезон) распределение;

– снежного покрова на территориях с различной антропогенной нагрузкой (урбанизированные и фоновые участки) 1 раз в год в период максимального снегозапаса;

– природной поверхностной воды в створах наблюдения УГМС не менее 1 раза в гидрологический сезон.

Кондиционность данных мониторинга напрямую зависит от достоверности результатов определения ртути, поэтому критическому анализу методов отбора, подготовке и анализу проб воздуха, атмосферных осадков, снежного покрова и поверхностных вод в диссертации и непосредственно в данной главе уделяется большое внимание. Определение ртути в атмосферном воздухе по методике ПУ 61-2017 (предел обнаружения от 0,5 нг/м^3) позволяет определять ее фоновые концентрации, тогда как аттестованные в РФ методики не позволяют достоверно определять ртуть в воде на уровне ПДК$_{р/х}$ и ниже. Дополнительными источниками ошибок могут быть высокий лабораторный фон, процесс фильтрования проб воды (или его отсутствие), чистота реактивов и посуды.

Достоверность получаемых результатов определения ртути в пробах должна подтверждаться межлабораторными сличительными испытаниями (МСИ). Организации, проводящие МСИ в РФ, не могут обеспечить уровень концентраций ртути в контрольных пробах, соответствующий ее реальному содержанию в природной воде, предоставляя образцы с содержанием 10-100 нг/л. В этой связи мы предлагаем проводить определение ртути в атмосферных осадках, снежном покрове и поверхностных водах по высокочувствительной хорошо зарекомендовавшей себя методике US EPA 1631e (предел обнаружения от 0,5 нг/л).

Для косвенной оценки ртутного загрязнения водных объектов можно использовать донные отложения, водные растения и гидробионты. Наиболее подходящим для анализа объектом является рыба, которая отражает не только содержание ртути в водном объекте, но и ее биодоступность. Поэтому в схему мониторинга (рис. 15) предлагаем включить экологическую оценку водных объектов по уровню ее содержания в рыбе, так как для рыбы существуют контрольные образцы сравнения (рыба ОК РТР.16-25) и проводятся МСИ (https://uniim.ru/wp-content/uploads/2017/12/plan2025.pdf). В 2023 г. соискатель с коллегами успешно прошла проверку квалификации ХАЦ по определению ртути в рыбе.

Предложенная схема в июле 2024 года прошла апробацию при проведении независимой экспертной оценки содержания ртути в Новосибирском водохранилище. Было показано, что концентрации ртути во всех пробах воды

находились на невысоком (фоновом) уровне, а анализ мышечной ткани хищных рыб (щуки) не выявил превышений ПДК для пресноводных хищных рыб. На основании представленных результатов был сделан вывод об отсутствии ртутного загрязнения акватории. Схему комплексного мониторинга ртути в сопряженных объектах окружающей среды для водосборов рек умеренного климата планируется использовать в практике работы Верхне-Обского бассейнового управления, о чем получена справка о внедрении.

Для анализа и обобщения материалов, характеризующих уровни содержания ртути в природных объектах (снежный покров и атмосферный воздух) на территории городского округа Барнаула, была разработана структура и создана база данных: «Пространственно-временная динамика содержания ртути в снежном покрове (2018–2023 гг.) и атмосферном воздухе (2021–2024 гг.) на территории бассейна Верхней Оби (на примере г. Барнаула)» (HgSnow&air_UpOb) (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621361, 2025). База данных может быть использована для оценки современного экологического состояния окружающей среды водосбора Верхней Оби, а также для прогнозных и модельных оценок загрязнения ртутью.

ВЫВОДЫ

1. Впервые были оценены уровни содержания ртути в объектах окружающей среды, формирующих сток ртути с водосбора Верхней и Нижней Оби. Было показано, что в атмосферном воздухе среднегодовые региональные уровни ртути для фоновых и городских участков Верхней Оби (в пределах Алтайского края) составляют 1,25 и 1,5 нг/м^3, а для Нижней Оби 0,70 и 0,58 нг/м^3, соответственно. Содержание Hg в снежном покрове урбанизированных участков Верхней Оби (13,8-32,0 нг/л) было значительно выше фоновых районов (3,6-6,5 нг/л), тогда как концентрации ртути в снежном покрове городских территорий Нижней Оби находились на низком уровне (менее 6 нг/л), а максимальные ее концентрации (7,3-12,8 нг/л) приходились на территории, прилегающие к крупным автомобильным трассам. Максимальные концентрации ртути в воде р. Оби наблюдались в период весеннего половодья (6,3-7,9 нг/л), минимальные – в зимний и осенний периоды (от <0,5 до 1,8 нг/л).

2. Среднегодовой (за пять лет) поток осаждения ртути на подстилающую поверхность водосбора Верхней Оби составляет 4,8 мкг/м^2 в год. При этом в холодный и теплый периоды наблюдается достоверная средняя положительная корреляция ($r=0,63$ и $r=0,68$ соответственно) потоков осаждений ртути с количеством выпавших осадков, что свидетельствует о наличии постоянных источников ртутного загрязнения как глобальных (трансграничный перенос), так и региональных (промышленные выбросы). Вариабельность обусловлена существованием сезонных источников: сжигание угля и топлива в зимний, десорбция ртути из снежного покрова в весенний, пылевой перенос и пожары в летний период.

3. Результирующая разнонаправленных процессов, происходящих в толще снега, рассчитанная за 5-летний период на основе изменения средневзвешенных концентраций ртути в снежном покрове (за период от его образования до

максимального снегозапаса) относительно формирующих его осадков, указывает на преобладание потери ртути в снеге от 28,2 до 50,6%, составляя в среднем 37,6%.

4. Минимальные и максимальные концентрации ртути в атмосферных осадках водосбора Нижней Оби различаются по периодам незначительно, за исключением кратковременных высоких подъемов весной в период AMDE. Вклад AMDE в общий годовой поток ртути составили 16,7 % в 2016-2017 гг. и 9,8 % в 2017-2018 гг., а сезонные выпадения ртути выявили значительное повышение потока ртути (более, чем на 30%) в теплый период, в то время как в зимний период увеличение потока обусловлено межгодовой сезонной изменчивостью количества атмосферных осадков.

5. Основными источниками стока ртути в поверхностные воды реки Обь являются снежный покров в пойме реки, ливневый сток и атмосферный воздух. При этом основными источниками поступления Hg на водосбор Верхней и Нижней Оби являются такие источники эмиссии ртути как ТЭЦ, работающие на угле и газе, факела нефтеперерабатывающих заводов, транспорт, промышленность, лесные и тундровые пожары, таяние вечной мерзлоты. Значительный вклад в поступление ртути на изучаемую территорию вносит ее трансграничный перенос с воздушными массами с территории Центральной Азии и Европы, Арктической зоны, Атлантического и Северного ледовитого океана, идентифицированные с помощью модели обратных траекторий движения воздушных масс HYSPLIT.

6. На примере Верхней Оби обоснована схема комплексного мониторинга ртути для водосборов рек умеренного климата с использованием особо чистых условий пробоотбора и высокочувствительного метода анализа. Схема включает не только анализ поверхностных вод, но и атмосферных осадков, атмосферного воздуха и снежного покрова на водосборе и акватории, при этом общую оценку ртутной экологической безопасности водного объекта предлагается определять по содержанию ртути в рыбе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Колотушкина Л.В.** Эйрих С.С., Папина Т.С. Выявление источников поступления загрязняющих веществ с атмосферными осадками на юге Западной Сибири // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2025. – № 4(79). – С. 55-66.

2. Эйрих, С.С., **Колотушкина Л.В.,** Серых Т.Г. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани мирных и хищных рыб реки Иртыш // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2024. – № 2(73). – С. 77-94.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

3. Eyrikh S., **Shol (Kolotushkina) L.,** Shinkaruk E. Assessment of mercury concentrations and fluxes deposited from the atmosphere on the territory of the Yamal-Nenets autonomous area // Atmosphere. – 2021. – V. 13. – №. 1. – P. 37.

4. **Колотушкина Л.В.,** Эйрих С.С. Особенности поступления ртути с влажными атмосферными осадками на территорию г. Барнаула (Алтайский край) // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28, № 12. – С. 52-59.

Свидетельства о регистрации авторских прав:

5. **Колотушкина Л.В.,** Эйрих С.С. Свидетельство о гос. регистр. базы данных № 2025621361 РФ. Пространственно-временная динамика содержания ртути в снежном покрове (2018 – 2023 гг.) и атмосферном воздухе (2021 – 2024 гг.) на территории бассейна Верхней Оби (на примере г.Барнаул) (HgSnow&air_UpOb): заявл. 25.03.2025: опубл. 25.03.2025 / Л.В. Колотушкина, С.С. Эйрих; заявитель ФГБУН ИВЭП СО РАН.

Публикации в других изданиях:

6. **Колотушкина Л.В.** Эйрих С.С., Папина Т.С. Изучение пространственно-временной динамики атмосферных концентраций ртути на территории Алтайского края // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2023. – № 2(69). – С. 76-87.

7. **Шоль (Колотушкина) Л.В.,** Эйрих С.С., Ильина Е.Г. Оценка концентраций и потоков ртути, поступающих из атмосферы на территорию Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2020. – № 4(59). – С. 83-94.

Подписано в печать 13.03.2026 г.
Формат 60*84/16. Бумага ксероксная 80 гр/м.
Тираж 100 экз. Заказ № 105.
Типография «Текст», 656015, г. Барнаул, проспект Строителей, 11
тел.+7 (923) 654-78-96
сайт: text-print.ru