

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ЛИН СО РАН)**

На правах рукописи

ШИХОВЦЕВ Максим Юрьевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ И
ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ЮЖНОГО
ПРИБАЙКАЛЬЯ**

Направление подготовки: 05.06.01 Науки Земле

Специальность: 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Форма обучения: очная

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
АЭРОЗОЛЬНЫХ И ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ
АТМОСФЕРЫ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ**

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы
(диссертации)
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Моложникова Елена Владимировна**
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и химии атмосферы ФГБУН Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Анна Александровна Виноградова**
Доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатория оптики и микрофизики аэрозоля (ЛОМА) Института физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (г. Москва).

Денис Валентинович Симоненков
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории климатологии атмосферного состава Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск).

Ведущая организация **ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», г. Москва**

Защита состоится «24» апреля 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета

С диссертацией можно ознакомиться в

Автореферат разослан

« ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Ермакова Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Научно-технический прогресс повлек за собой не только качественное и количественное развитие многих отраслей хозяйства, но и увеличение нагрузки на все компоненты окружающей среды. Выросшее до 8,2 млрд. население Земли требует колоссального количества сельскохозяйственной продукции и энергии. Человечество, в гонке за удовлетворением своих потребностей выводит сложившиеся системы из равновесия, ярким примером чего служат значительные изменения в климатической системе, атмосфере и гидросфере Земли. В настоящее время во всем мире усиливается проблема экосистемных изменений природных объектов, связанных с увеличивающейся антропогенной нагрузкой и, в первую очередь через атмосферу, как наиболее быстрый и прямой путь доставки загрязняющих веществ от источника загрязнения.

В Российской Федерации актуальность данной проблемы подтверждается на правительственном уровне Национальным проектом «Экология 2019-2024», подготовленным в рамках Указа Президента Российской Федерации от 07.05.2018 №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в которую вошли Федеральные проекты «Сохранение озера Байкал» и «Чистый воздух». Также значимость озера, как объекта всемирного природного наследия, определена в документах ЮНЕСКО и Федеральном законе от 10.01.2002 № 7 – ФЗ (ред. от 29.07.2018) «Об охране озера Байкал». Состояние атмосферного воздуха над озером Байкал определяется не только его географическим положением и климатическими особенностями региона, но и воздействием экстремальных природных явлений (лесные пожары) и антропогенных выбросов, расположенных на побережье и на пути основного переноса воздушных масс.

На данный момент в Байкальском регионе слабо развита система государственного мониторинга атмосферы, отвечающая современным требованиям. Однако, в последние годы с выполнением постановления Правительства Российской Федерации № 681 от 9 августа 2013 г. «О государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды)» была сформирована сеть станций непрерывного мониторинга атмосферы в крупных городах-источниках (Иркутск, Ангарск, Шелехов, Байкальск, Селенгинск, Улан-Уде). Существующая система не ведет контроль в удаленных районах, подверженных влиянию атмосферного загрязнения. Достаточно детальные исследования в этом направлении проводятся Лимнологическим институтом с начала 2000-х годов, после установления трех станций непрерывного мониторинга атмосферы, работающих по международной программе ЕАНЕТ [Голобокова Л.П., и др., 2006; Оболкин В.А., и др., 2013]. Этими исследованиями установлено, что в химическом составе атмосферных осадков региона в последние десятилетия произошли качественные изменения: уменьшилось общее содержание солей, увеличилась кислотность осадков, что сказалось на химическом составе рек восточного побережья

Южного Байкала [Нецветаева О.Г., и др., 2013; Сороковикова Л.М., и др., 2015; Томберг и др, 2016]. Результаты этих работ показали, что наиболее сильно подвержена загрязнению через атмосферу Южная котловина Байкала [Жамсуева Г.С., и др., 2004; Оболкин В.А., и др., 2015]. Полученные ранее материалы, показывают значимую роль атмосферы в формировании отдельных элементов всей экосистемы Байкала.

Антропогенные воздействия на различные экосистемы Байкальской природной территории и оз. Байкал в последние годы возрастают в связи с развитием промышленности в регионе, расширением инфраструктуры туристско-рекреационных территорий прибрежной зоны и увеличением частоты лесных пожаров, которые уже приводят к необратимым процессам в некоторых районах озера [Кравцова Л.С., и др., 2012; Timoshkin O.A., et al., 2018]. Ранее было установлено значительное загрязнение атмосферы над Южным Байкалом за счет дальнего высотного переноса оксидов серы и азота со стороны удаленных региональных ТЭЦ [Моложникова Е.В., 2016]. Соответственно, важно изучить роль местных (относительно слабых) и удаленных, но более мощных источников, в загрязнении атмосферы в ЦЭЗ и оценить возможные риски их воздействия на прибрежные экосистемы и озера. Другим значимым источником, оказывающим воздействие на окружающую среду региона, является рост числа лесных пожаров на региональном (Красноярский край, Республика Саха, север Иркутской области) и локальном уровне (вблизи побережья озера). Так, во время лесных пожаров 2015 - 2016, 2019 гг. в Южном (район Большого Голоустного, бухта Песчаная), Среднем (остров Ольхон), Северном (мыс Елохин, Давша, бухта Сосновка) Байкале выгорели сотни гектаров различных степных и лесных ландшафтов. В последние годы исследованиями атмосферы при лесных пожарах над оз. Байкал было установлено увеличение концентраций в аэрозоле биогенных элементов: минерального азота, калия; микроэлементов: железа, марганца, ванадия, цинка, бария, свинца и др. Отмечен рост концентрации газовых примесей - азота, серы, стойких органических загрязнителей – ПАУ, сажи в дымовой эмиссии лесных пожаров над акваторией озера и поверхностном слое воды в послепожарный период [Marinaite I.I., et al., 2019; Khodzher T.V., et al., 2020; Popovicheva O.V., et al., 2021].

Всё выше сказанное, определяет необходимость постоянного контроля за поступлением химических веществ в окружающую среду и их трансформацией на пути в водные объекты. Представляется, что ответить на данные вопросы в настоящее время можно на основе проведения комплексных теоретических исследований и натурных измерений.

Цель и задачи исследования

Основной целью настоящей работы является изучение и оценка возможных изменений состояния атмосферы над акваторией Южного Байкала под влиянием природных и антропогенных факторов с применением современных автоматических методов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Развить и адаптировать методы автоматического мониторинга газовых и аэрозольных примесей на опорных станциях мониторинга атмосферы Иркутск, Листвянка;

2) Изучить влияние синоптических ситуаций, мезо- и микрометеорологических факторов в атмосфере над Южным Байкалом на процессы переноса и рассеивания малых газовых и аэрозольных примесей.

3) Оценить влияние экстремальных природных явлений, местных и региональных антропогенных источников на концентрации малых газовых и аэрозольных примесей в Южном Прибайкалье, на основе данных многолетних натуральных наблюдений с высоким временным разрешением, с применением методов статистической обработки данных и математического моделирования.

4) Изучить химический состав твердых и жидких атмосферных выпадений. Выявить влияние трансграничного переноса. Получить картину пространственного распределения антропогенного аэрозоля в Южном Прибайкалье.

Научная новизна

Данная работа представляет собой первое комплексное исследование, в котором объединены натурные, аналитические и модельно-статистические методы, позволившее изучать количественное содержание малых газовых и аэрозольных примесей, а также их динамику в атмосфере Южного Прибайкалья.

1. Разработан оригинальный методический подход, позволяющий создавать новую или оптимизировать существующую систему мониторинга и проводить многофакторную оценку состояния атмосферного воздуха;

2. Расширена существующая сеть мониторинга за малыми газовыми и аэрозольными примесями в атмосфере Южного Байкала. В дополнение к существующим опорным станциям «Иркутск» и «Листвянка» добавлены две новые: «Патроны» и «Танхой». Станции оборудованы современными low-cost сенсорами, и газоанализаторами, позволяющими в режиме реального времени с высокой дискретностью измерений (5 минут) контролировать аэрозольные частицы (PM_{10} и $PM_{2,5}$) и малые газовые примеси (SO_2 , NO_2 , NO);

3. Впервые получены сезонные, недельные и суточные вариации содержания малых газовых и аэрозольных примесей в атмосфере Южного Байкала. Анализ проводился на основе многолетних экспериментальных данных с высоким временным разрешением. В результате исследования были выявлены природные и антропогенные факторы, которые влияют на формирование областей загрязнения в атмосфере исследуемого региона;

4. Исследованы механизмы переноса и рассеивания антропогенных примесей в воздушном бассейне Южного Байкала, от крупных источников загрязнения атмосферы Иркутской области и Республики Бурятия.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовался комплексный подход, основанный на совместном использовании математической обработки (факторный анализ, траекторный анализ, геостатистическая обработка данных), и натуральных измерений (наблюдений за содержанием малых газовых и аэрозольных примесей, химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова).

На защиту выносятся

1. Методический подход, направленный на создание оптимизированной сети мониторинга и проведения многофакторной оценки состояния атмосферы в Южном Прибайкалье;
2. По результатам экспериментальных и численных исследований установлены закономерности суточных, недельных и сезонных вариаций содержания малых газовых и аэрозольных примесей в атмосфере Южного Прибайкалья.
3. По результатам экспериментальных и численных исследований установлено влияние мезо- и микрометеорологических особенностей на содержание примесей и уровень загрязнения атмосферы в воздушном бассейне Южного Прибайкалья;

Личный вклад автора

Автор принимал участие на всех этапах настоящего исследования: в постановке задач, в поиске возможных способов их решения, в экспериментальных и численных исследованиях, а также в обсуждении полученных результатов.

Совместно с сотрудниками Лимнологического института СО РАН выполнены работы по отбору и химическому анализу проб снежного покрова и атмосферных осадков. На основании результатов химического анализа атмосферных выпадений, накопленных в снежном покрове, была проведена геостатистическая обработка данных, позволившая определить участки с наибольшим уровнем накопления антропогенных примесей в снежном покрове Южного Прибайкалья.

Автор непосредственно участвовал в работах по установке измерительного оборудования на станциях мониторинга и организации наблюдений за содержанием малых газовых и аэрозольных примесей в атмосфере региона.

Все представленные результаты в настоящей диссертационной работе получены автором самостоятельно или при непосредственном участии в коллективе соавторов. Автор самостоятельно подготавливал доклады и представлял их на конференциях и симпозиумах. Автору принадлежит основная роль в подготовке публикаций по представленной теме исследований

Достоверность результатов

Обеспечивается большим объемом отобранного материала, полученного с использованием апробированных методик и поверенных измерительных инструментов. Камеральная обработка материала проведена по единой методике с использованием сертифицированного оборудования, а также международных образцов для оценки качества химических анализов. Расчет обратных траекторий движения воздушных масс проводился с помощью траекторной модели HYSPLIT, разработанной Лабораторией воздушных ресурсов Американской национальной администрации по исследованию океана и атмосферы (NOAA) с использованием данных реанализа GDAS.

Практическая значимость работы.

Предложенный в работе методический подход и полученные результаты могут быть использованы при оценке влияния атмосферы на загрязнение вод Байкала, притоков озера, почвенного покрова ЦЭЗ. Материалы могут быть востребованы в работе

природоохранных ведомств, для экологического мониторинга и оценки влияния антропогенного фактора на различные экосистемы Байкальской природной территории. Они могут использоваться при преподавании дисциплин: «Охрана окружающей среды» в высших учебных заведениях экологической направленности. Результаты исследований микро- и мезометеорологических особенностей могут быть полезны для понимания природы и механизмов влияния метеопараметров на процессы трансформации и переноса примесей от антропогенных источников.

Полученные результаты нашли применение в исследовании роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал и идентификации источников загрязнения атмосферы (Государственное задание Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук № 0279-2021-0014), научных изысканий по проектам: РФФИ № 19-77-20058 (Исследования состава и пространственно-временного распределения аэрозольно-газовых примесей атмосферы в акватории оз. Байкал) и № 22-29-01137 и № 19-79-00061; РФФИ № 20-45-380024 p_a (Экотоксикологическое исследование снега в городах Иркутской области (на примере Иркутска, Ангарска и Шелехова)); крупных научных проектов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-15-2020-787) «Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки на Байкальской природной территории» и № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Проведенные работы предоставляют новые уникальные результаты для развития современных методов экологического мониторинга, и накопления уникальной базы данных, которую можно использовать при создании новых или верификации уже существующих моделей статистического, машинного и глубокого обучения. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для прогноза изменения экологической обстановки в случае размещения крупного промышленного производства в отдельных районах Восточной Сибири.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались автором на 15 конференциях: VII международной Верещагинской Байкальской конференции, г. Иркутск, 2020 г.; XXVI-XXIX симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», гг. Москва, Томск, Санкт-Петербург, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.; «Ляпуновских чтениях», г. Иркутск, 2023 г.; XIX Большом географическом фестивале, г. Санкт-Петербург, 2023 г.; III всероссийской научной конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества», г. Москва, 2023 г.; XV Международной Школе молодых учёных «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника, г. Томск, 2022; XXVIII-XXX рабочей встрече «Аэрозоли Сибири», г. Томск, 2021, 2022, 2023 гг.; V всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и

перспективы развития гидрометеорологии в России», г. Иркутск, 2023 г.; Тринадцатых Петряновских и четвертых Фуксовских чтениях, г. Нижний Новгород, 2021 г., а так же на секциях Ученого Совета ЛИН СО РАН, и семинарах Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы ЛИН СО РАН.

Публикации:

Материалы диссертации опубликованы в 18 работах, из них 6 в журналах из перечня ВАК по специальности; 16 статей проиндексированы в базах Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации (без приложения) – 175 страниц, в том числе, рисунков – 55, таблиц – 2, библиографический список из 313 наименований (38 страниц).

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность к.т.н. Е.В. Моложниковой за научное руководство, д.г.н. Т.В. Ходжер, к.г.н. В.А. Оболкину, к.г.н. М.М. Макарову и к.г.н. В.В. Блинову за содействие в выполнении исследований, к.г.н. О.Г. Нецветаевой за предоставление результатов анализов по химическому составу атмосферных выпадений в снежном покрове, а также другим сотрудникам лаборатории гидрохимии и химии атмосферы за оказанную помощь при выполнении работы и обсуждении результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения о структуре и объеме работы и защищаемых положениях.

Первая глава посвящена анализу проблемы аэрозольного и газового загрязнения атмосферы и постановке задач исследования. Описано влияние аэрозольных частиц на окружающую среду: здоровье живых организмов, климат и иные абиотические условия среды. Представлены источники поступления аэрозольных частиц и малых газовых примесей в атмосфере. Продемонстрированы особенности химического состава твердых частиц в зависимости от их происхождения. Рассмотрены современные методы анализа уровня загрязнения атмосферы, и влияние метеорологических условий на уровень загрязнения.

Во второй главе изложен, предложенный автором, оригинальный методический подход, направленный на создание оптимизированной сети мониторинга и проведения многофакторной оценки состояния атмосферы. Подход базируется на совместном использовании натуральных наблюдений с высоким временным разрешением: содержание аэрозольных и газовых примесей, а также химического состава твердых и жидких атмосферных выпадений, с последующей математической обработкой данных. Схема методического подхода в общем виде представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема методического подхода представляемого в работе

Для использования предлагаемого подхода необходимо определить расположение и структуру выбросов существующих источников загрязнения атмосферы и упорядочить их, для выделения вероятных «маркерных веществ». Провести анализ существующих сетей мониторинга и научно-исследовательских работ для определения характерных для региона концентрации примесей, и выявления «белых пятен» в расположении существующей сети наблюдения. Следующий этап включает в себя Дальнейшие шаги направлены на анализ условий рассеивания примесей от выявленных источников и оценки полей концентраций загрязняющих веществ и выбор подходящего типа и набора измерительных средств (Рисунок 1).

В главах 2.8.1 – 2.8.6 описано применение предложенной методики адаптации автоматического мониторинга газовых и аэрозольных примесей на примере южной части Центральной Экологической зоны озера Байкал. В 2.8.1 проанализированы основные стационарные антропогенные источники загрязнения атмосферы в пределах Центральной Экологической зоны озера Байкал и ближайших крупных городах (гг. Иркутск, Ангарск, Шелехов, Улан-Удэ, Гусиноозерск, Селенгинск и Каменск). На территории центральной экологической зоны функционирует 98 котельных различной мощности, 67 % из которых используют в качестве топлива уголь. Эти угольные энергоисточники поставляют в атмосферу 99 % от суммарных расчетных выбросов в центральной экологической зоне, или 23,8 тыс. тонн/год [Санеев Б.Г., 2016]. Наибольшее количество котельных сгруппировано на юге – в Слюдянском (25 объектов) и Кабанском районах (20 объектов). Суммарный выброс загрязняющих веществ от источников Иркутской агломерации составляет 290 тыс. тонн/год. Выбросы от представленных выше источников Республики Бурятия составляют 72 тыс. тонн/год (Рис. 2). Это в 15 раз больше, чем поступает от антропогенных источников, расположенных вблизи озера. Учитывая разницу в объеме выбросов важно изучить не только роль локальных источников, но и крупных внешних источников в загрязнении атмосферы в центральной экологической зоне Байкала и оценить возможные риски их воздействия на прибрежные экосистемы и озеро.

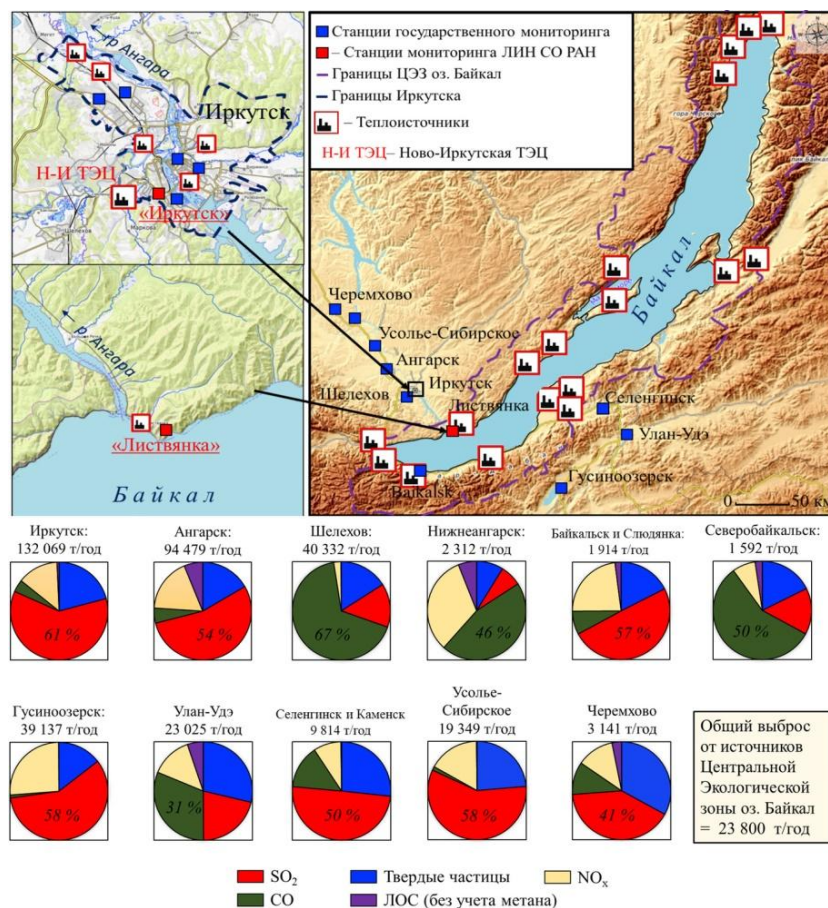


Рисунок 2 – Расположение и объем выбросов в 2022 г. от стационарных источников загрязнения и станций мониторинга состояния атмосферы, расположенных в центральной экологической зоне озера Байкал и городах-источниках загрязнения

В главе 2.8.2. проведена инвентаризация существующей сети наблюдения за состоянием атмосферы в пределах Южного Прибайкалья. На данный момент в регионе существует 24 станции государственного автоматического мониторинга. Посты данной сети расположены крупных городах-источниках (Иркутск, Ангарск, Шелехов, Байкальск, Селенгинск, Улан-Удэ, Гусиноозерск, Черемхово, Саянск), и не ведут контроль в удаленных районах, подверженных влиянию атмосферного загрязнения. Помимо государственного мониторинга значительные усилия в изучении атмосферы над Байкалом предпринимаются и научными организациями. Так, исследовано содержание малых газовых (SO₂, NO, NO₂, CO, O₃) [Zhamsueva G.S., et al., 2022], аэрозольных примесей (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁), стойких органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ) [Marinaite I.I., et al., 2021], черного углерода [Porovichova O.V., et al., 2021] в атмосфере над Байкалом. Полученные результаты позволили оценить пространственно-временную структуру аэрозольных полей в атмосфере над озером в течение навигационного периода. Показано, что наиболее сильное загрязнение атмосферы над озером отмечено в южной его части и что связано с атмосферным переносом от крупных угольных электростанций Иркутской области и республики Бурятия, выбросы от которых достигают акватории.

В главе 2.8.3. Дана краткая физико-географическая характеристика района исследования. Район исследования расположен в центре Азиатской части России, на Юге Восточной Сибири и включает в себя территорию нескольких субъектов: Иркутской области и Республики Бурятии. Местность представляет собой сильно расчленённый рельеф с узкими водоразделами, пологими склонами и наличием хорошо разработанных речных долин. На северном участке изучаемой территории расположены долина р. Ангара, обрамленная с юго-востока Прибайкальским хребтом, а с юго-запада ступенчатыми поднятиями Восточного Саяна. Перепад высот между самыми низкими и высокими формами рельефа на изучаемом участке севернее Байкала составляет 600-610 метров.

В главе 2.8.4. Проанализированы циркуляционные и климатические условия в Южном Прибайкалье. Описан температурный и ветровой режим региона, сезонные особенности турбулентности в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья и особенности регионального и трансграничного переноса воздушных масс.

Для выявления особенностей переноса воздушных масс проведена серия детальных расчетов с помощью Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT), разработанной National Oceanic and Atmospheric Administration. Расчеты проведены на основе архивных метеорологических данных за период 2010 – 2018 гг. (архив GDAS, США). Рассчитанные траектории были разделены на шестнадцать наиболее типов атмосферного переноса (СЗ; 3-СЗ; 3; 3-ЮЗ; ЮЗ; Ю-ЮЗ; Ю; Ю-ЮВ; ЮВ; В-ЮВ; В; В-СВ; СВ; С-СВ; С; С-СЗ), и «местную циркуляцию» (МЦ). Это позволило оценить общие направления воздушного переноса от потенциальных региональных источников выбросов и оценить дальний перенос в регионе. Первый сектор (I) включает в себя траектории западных и северо-западных направлений. Воздушные массы, входящие в данный сектор, характеризуются, как арктические и умеренные, сформировавшиеся над Северной Атлантикой и трансформировавшиеся при движении над Европой и Западной Сибирью. В среднем, доля траекторий данного направления составляет 69%. В случае возникновения данного типа переноса воздушных масс в атмосферу над озером поступают значительные объемы антропогенных примесей. Второй сектор (II) включает траектории восточных и северо-восточных направлений. Данные траектории характерны для ныряющих циклонов, которые приносят на Байкальскую природную территорию холодный арктический воздух, сформировавшийся над Северным Ледовитым океаном. Воздушные массы данного типа формируются над территорией Якутии в холодный период. Встречаемость данных траекторий составляет в среднем 8%. Третий сектор (III) состоит из траекторий юго-восточных направлений, и включает в себя случаи «местной циркуляции». Повторяемость траекторий данного типа в среднем составляет 5%. Четвертый сектор (IV), состоящий из траекторий южных и юго-западных направлений, является вторым по количеству приходящих в регион исследования воздушных масс, и имеет повторяемость 18% случаев. Из данного сектора попадают умеренные, а летом и тропические воздушные массы, изначально сформировавшиеся в районе Атлантики и трансформировавшиеся над субтропическими районами Европы и Средней Азии.

Крупные антропогенные источники загрязнения в этом секторе находятся на значительном удалении от региона-рецептора.

При анализе прямых траекторий, рассчитанных от городов-источников Иркутской агломерации, получено, что перенос в основном направлен на Южную котловину Байкала и в среднем составляет около 58% от всех рассмотренных случаев за год. В 8 % случаев перенос направлен в Среднюю котловину. Перенос в Северную котловину озера проявляется в виде единичных случаев. От крупных стационарных антропогенных источников республики Бурятия перенос в Южную котловину составляет не более 15%, Среднюю около 26 %, в Северную не более 10% за год.

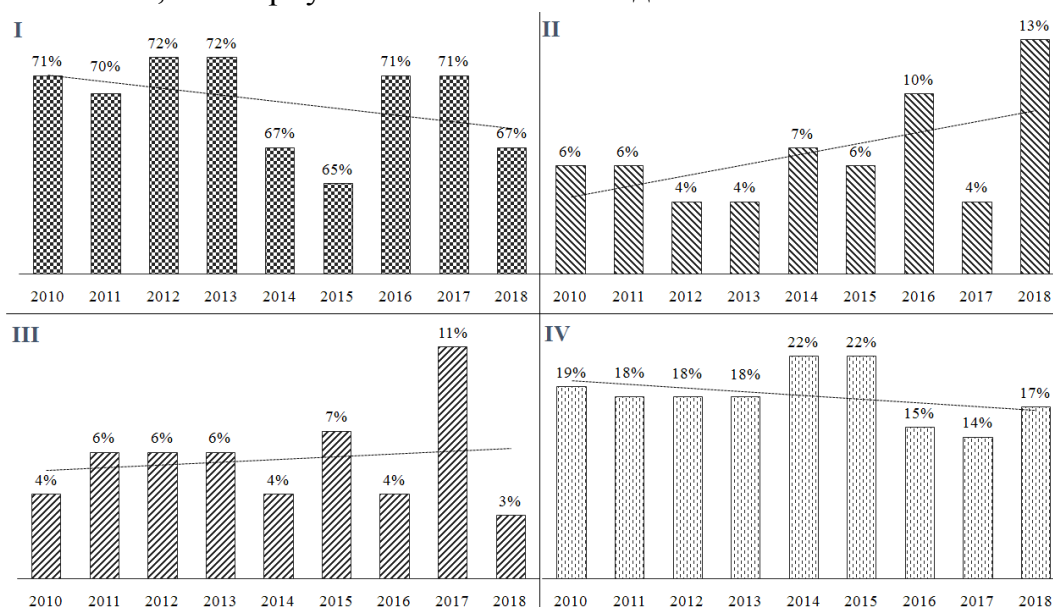


Рисунок 3 – Межгодовая динамика траекторий воздушных масс по районам их формирования (I - СЗ; 3-СЗ; 3; С-СЗ; II - В; В-СВ; СВ; С-СВ; С; III - Ю-ЮВ; ЮВ; В-ЮВ; МЦ; IV -3-ЮЗ; ЮЗ; Ю-ЮЗ; Ю;) [Shikhovtsev M.Yu. and Molozhnikova Ye.V., 2020]

В главе 2.8.5. представлено пространственное распределение примесей в снежном покрове исследуемого района. Для понимания общей картины аэрозольной нагрузки в снежном покрове бассейна озера Байкал рассмотрено распределение удельной электропроводности (Рис. 4 а). Карта позволяет оценить область и площади рассеивания выбросов от промышленных предприятий, а также районировать регион по степени аэрозольной нагрузки. Повышенный уровень загрязнения снежного покрова аэрозолями отмечен в городах-источниках. Наиболее подверженным антропогенному загрязнению является г. Ангарск. В городе расположена промышленная зона протяженностью более 30 километров, с суммарным выбросом в атмосферу более 94 тыс. тонн в год (Рис.2). Загрязнение от источников Иркутской агломерации и промышленных городов Бурятии распространяется на десятки километров по преобладающему направлению переноса, а также вдоль основных транспортных потоков и локально определяется вблизи малых населенных пунктов, расположенных на побережье. Например, влияние шлейфов от промышленных предприятий Иркутской агломерации можно увидеть на льду Байкала в районе мыса Кадильный (отмечен

красной точкой). Воздействие выбросов от источников Бурятии (г. Селенгинск и п. Каменск) визуализируется в дельте реки Селенги.

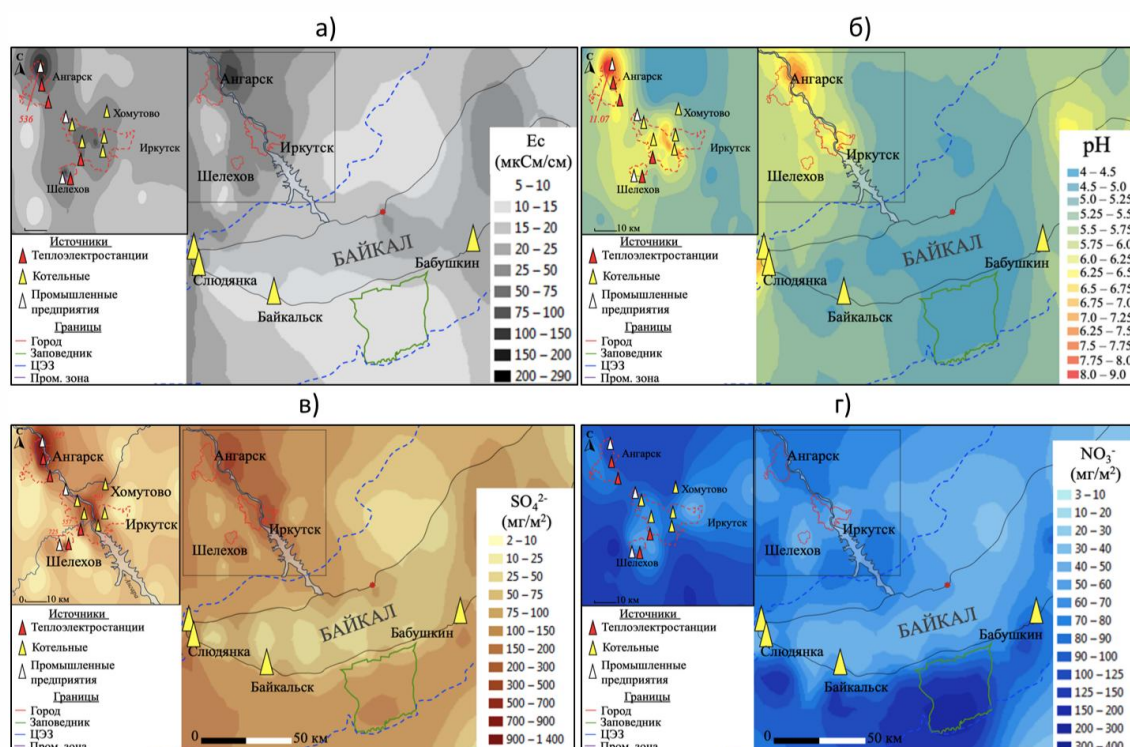


Рисунок 4 – Карта-схема пространственного распределения а) удельной электропроводности; б) рН; в) накопления сульфатов; г) накопления нитратов в снежном покрове в бассейне Южного Байкал в 2017-2023 гг. [Molozhnikova Ye.V., Shikhovtsev M.Yu., et al., 2023]

В третьей главе представлены результаты натуральных измерений содержания твердых частиц (PM_{10} , $PM_{2.5}$ и PM_{10}) в атмосфере Южного Прибайкалья. Измерения проводились на станциях: «Листвянка» (с 2021 г.), «Патроны» и «Танхой» (с 2023 г.). Так же были использованы результаты измерений со станции государственного мониторинга «Байкальск» (<https://www.feerc.ru/baikal/ru/monitoring>) (с 2021 г.). При анализе межгодовых вариаций выявлен рост содержания РМ в атмосфере региона. В 2021 г. среднемесячные концентрации PM_{10} на ст. Листвянка изменялись в пределах от 6 до 36 мкг/м^3 (среднее за год = 9,1 мкг/м^3). В 2022 и 2023 гг. концентрации изменялись в пределах от 5 мкг/м^3 до 34 мкг/м^3 (со средними = 14,4 мкг/м^3 и 21,6 мкг/м^3 , соответственно). В 2024 г. концентрации изменялись в пределах от 17 мкг/м^3 до 72 мкг/м^3 (среднее = 34,4 мкг/м^3). На ст. «Байкальск» При анализе сезонных вариаций РМ выделено два максимума: с декабря по февраль и с июля по август. Наименьшее содержание РМ в атмосфере отмечено в апреле и ноябре. Зимний максимум связан с увеличением объема выбросов от объектов теплоэнергетики в регионе, наибольшей повторяемостью переноса воздушных масс от антропогенных источников на Байкал, а также ухудшением условий рассеивания и самоочистения атмосферы. Летний максимум возникает вследствие поступления дымового аэрозоля из районов лесных пожаров [Shikhovtsev M.Yu., et al., 2024].

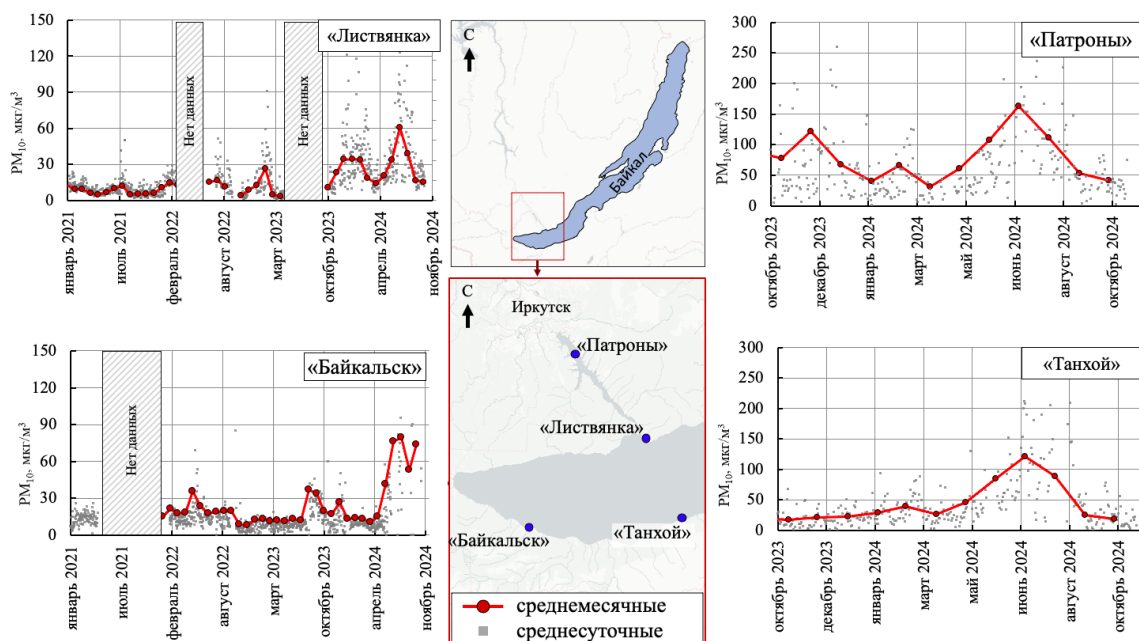


Рисунок 5 – Временные колебания среднесуточных и среднемесячных концентраций PM_{10} ($мкг/м^3$) в атмосфере Южного Прибайкалья за период с 2021 по 2024 год

На рисунке 6 представлен суточный ход массовой концентрации аэрозольных частиц PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} на ст. «Листвянка» по данным наблюдений за 2021-2024 гг., осредненных по времени за 10 минут. Как видно из рисунка 6, характерными чертами суточного хода являются утренний и вечерний максимумы и послеполуденный минимум. Ночной максимум возникает вследствие уменьшения толщины пограничного слоя атмосферы и развития температурных инверсий. В утренние часы на ст. «Листвянка» часто регистрируются аномальные ситуации, когда аэрозольное загрязнение в несколько раз превышает фоновый уровень. Данные аномалии связаны с привнесением в атмосферу станции дымовых шлейфов от крупных объектов теплоэнергетики, расположенных к северо-западу от станции [Shikhovtsev M.Yu., et al., 2023]. В полдень, результате развития конвективного перемешивания, способствующего притоку чистого воздуха из вышележащих слоев, концентрации твердых частиц убывают.

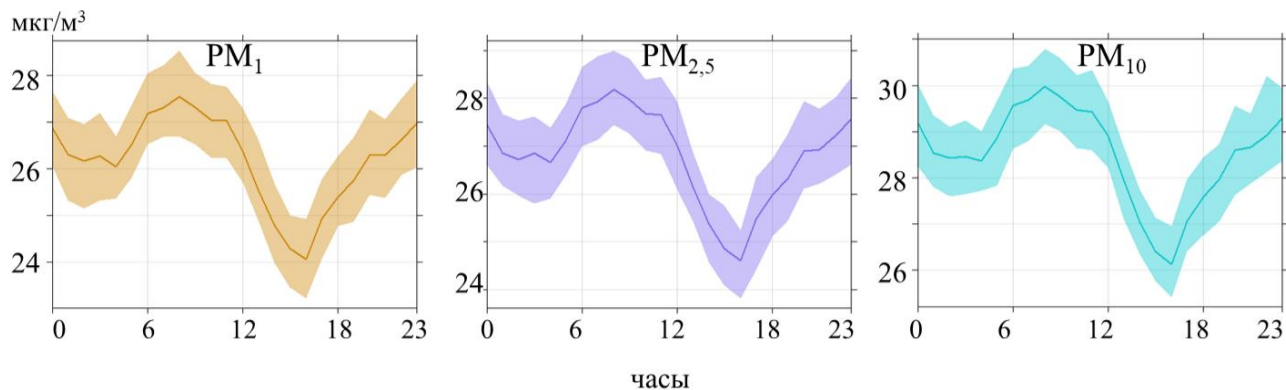


Рисунок 6 – Суточные вариации концентраций PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} на ст. «Листвянка» по данным наблюдений за 2021-2024 гг. Затененная область обозначает 95 % доверительный интервал.

Четвертая глава посвящена анализу содержания SO_2 , NO и NO_2 в атмосфере Южного Прибайкалья. Измерения проводились непрерывно, с высоким временным разрешением, на трех станциях: «Иркутск» (с 2021 г.), «Листвянка» (с 2021 г.), и «Танхой» (с 2023 г.) газоанализаторами фирмы ОПТЕК (Санкт-Петербург).

В главе 4.1 представлен анализ временной изменчивости малых газовых примесей в атмосфере Южного Прибайкалья. Выявлено, что наибольшее содержание газообразных оксидов серы и азота фиксируется в атмосфере региона в отопительный период – с октября по апрель. Наименьшее – в июле и августе (Рисунок 7). Зимний максимум, вероятнее всего, связан с увеличением интенсивности работы ТЭЦ, обратно зависящей от температуры окружающей среды [Моложникова Е.В., 2003]. Это подтверждается сильной отрицательной линейной зависимостью между среднемесячной температурой воздуха в районе крупных источников загрязнения атмосферы (г. Иркутск) и содержанием оксидов серы и азота в атмосфере Листвянки. Коэффициент корреляции составляет $-0,93$ для SO_2 и температуры, и $-0,97$ для NO_2 и температуры. Корреляционный анализ выявил, что концентрации оксидов серы и азота коррелируют между собой (коэффициент корреляции Пирсона составляет $0,97$). Учитывая, что большинство выбросов диоксида серы в регионе происходит в результате сжигания твердого органического топлива (угля), логично предположить, что основным источником поступления оксидов азота в атмосферу ст. «Листвянка» так же являются объекты теплоэнергетики, расположенные в Иркутской области.

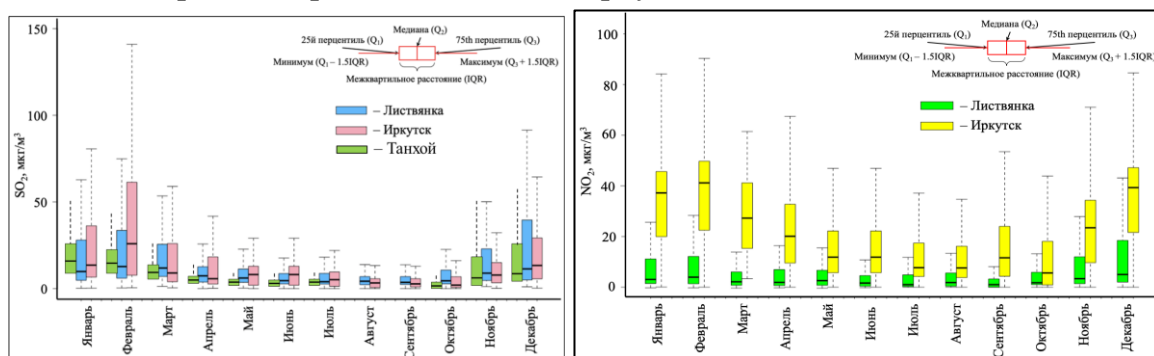


Рисунок 7 – Временные колебания среднесуточных и месячных концентраций SO_2 и NO_2 в атмосфере Южного Прибайкалья

В главе 4.2 проведен анализ характеристик струйных течений, атмосферной завихренности в области под струйными течениями и приземной концентрации SO_2 . Для сопоставления временных измерений концентраций SO_2 с другими атмосферными характеристиками на рисунке 8, а показан примеры изменений концентрации, полной кинетической энергии турбулентности и вертикальных турбулентных потоков температуры воздуха, соответственно, за 22 августа 2023 г.

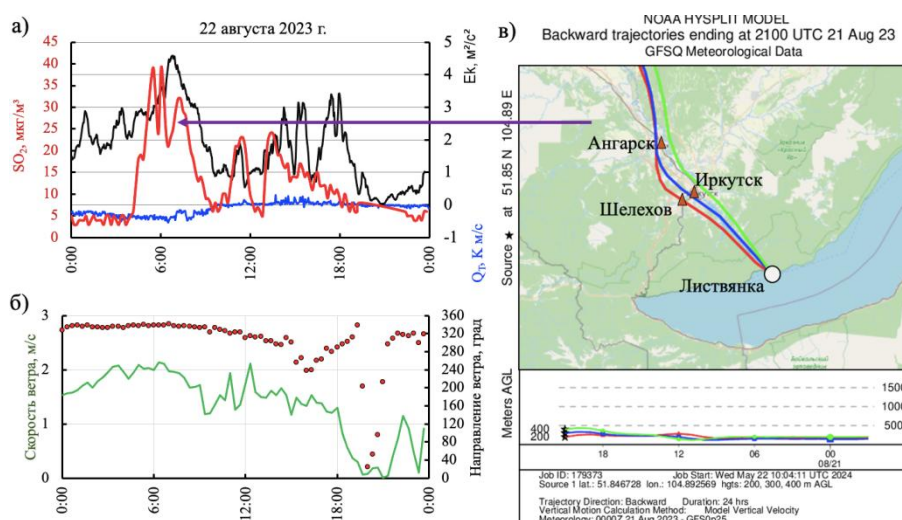


Рисунок 8 – Суточный ход концентрации диоксида серы и турбулентных характеристик в атмосфере на ст. «Листвянка» 22.08.2023 г. а) концентрации SO_2 (красная линия) и полной кинетической энергии турбулентности E_k (черная линия) при положительных и близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры воздуха Q_T (синяя линия); б) изменчивость приземной скорости (зеленая линия) и направления ветра (красные круги); в) обратная траектория движения воздушных масс в 5:00 местного времени.

При рассмотрении метеорологической ситуации 22 августа (рис. 8, б) на станции преобладал ветер в секторе $295\text{--}340^\circ$, то соответствует прямому направлению «Иркутск-Листвянка». А максимум концентрации зарегистрирован при отрицательных вертикальных потоках тепла (рис. 8, а). Физическое объяснение связи приземных временных изменений концентрации SO_2 и вариаций характеристик турбулентности может состоять в следующем. Концентрация приземных значений SO_2 в воздушном бассейне ст. «Листвянка» определяется сезонностью (объемом выбросов от антропогенных источников), направлением переноса воздушных масс и интенсивностью атмосферной турбулентности в нижних слоях атмосферы. В свою очередь, интенсивность турбулентности зависит от характеристик атмосферы непосредственно под мезомасштабными струйными течениями, наблюдающихся на разных высотах в нижнем $0,2\text{--}2,5$ км слое атмосферы. В частности, интерес к мезомасштабным струйным течениям над ст. «Листвянка» обусловлен тем, что они могут активизировать процесс переноса загрязняющих веществ от высотных антропогенных источников в удаленные районы, в «слаборассеянном» виде. Согласно расчетам четкой связи между скоростью потока на оси струи и концентрацией SO_2 не удалось установить. В большей степени, приземная концентрация SO_2 определяется развитостью турбулентности в нижнем слое атмосферы и, более того, непосредственно под струйным течением на высотах $300\text{--}400$ м.

На рисунке 9 показаны вертикальные профили завихренности атмосферных течений за 22.08.2023 г., для случая, когда наблюдалась связь между изменениями концентраций SO_2 и кинетической энергией турбулентности на высоте расположения

акустической метеосистемы «Метео-2». Анализ рисунка 9 позволяет предположить, что рост интенсивности динамической турбулентности под струей, вероятно, определяет процессы ослабления и разрушения струи, а также «осаждения» SO_2 .

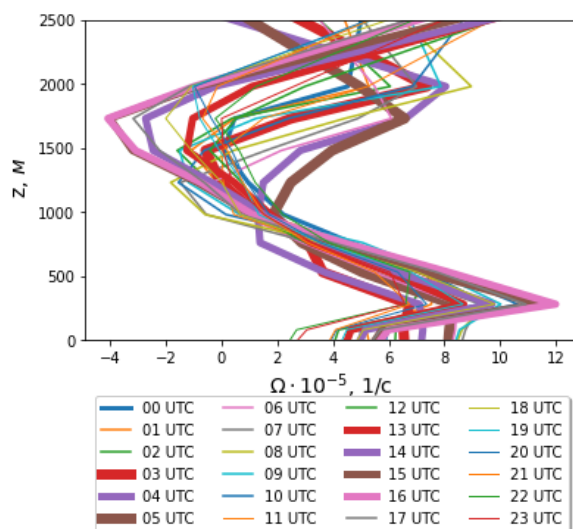


Рисунок 9 – Вертикальные профили завихренности атмосферных течений над ст. «Листвянка», 22.08.2023 г.

В главе 4.3 проведена систематизация данных измерений приземных концентраций аэрозольных и малых газовых примесей на ст. «Листвянка», в зависимости от скорости и направления ветра. На рисунке 10 продемонстрировано, что наибольшие средние концентрации фиксируются при переносе воздушных масс с двух направлений. Первое направление ветра находится в диапазоне $310\text{-}340^\circ$, и скоростями от 10 до 12 м/с. Второе, в диапазоне от 280 до 295° , со скоростью 6-9 м/с. Направление первого пика соответствует расположению источников, находящихся на территории Иркутско-черемховского промышленного узла – крупнейшего сосредоточения промышленных объектов в Иркутской области. При ветрах южного и юго-восточного секторов (с направления водной поверхности озера) концентрации газовых примесей опускаются до региональных фоновых значений. Концентрации монооксида азота распределяются по отличной от прочих газов закономерности. В весенний, летний и осенний периоды отмечается повышение содержания оксида азота в воздушных массах, привнесенных на станцию с озера. Это может быть связано с добавлением в навигационный период выбросов от многочисленных судов, фрахтуемый в Лиственничном заливе и активизацией наводных транспортных средств.

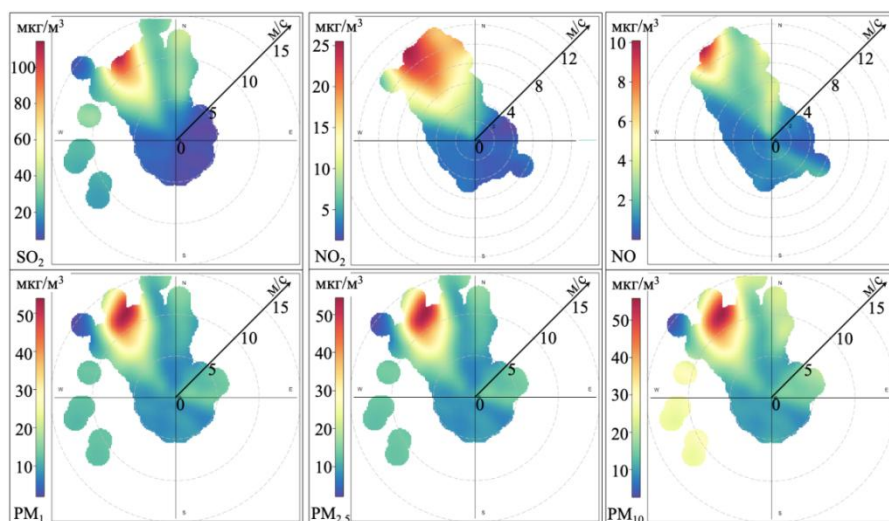


Рисунок 10 – NDW анализ малых газовых и аэрозольных примесей на ст. «Листвянка»

На рисунке 13 представлен анализ эпизод сильного загрязнения атмосферы сельской станции в результате переноса воздушных масс от антропогенных источников. Данная ситуация произошла во второй декаде декабря 2023 г. В этот период на юге Иркутской области установился антициклональный тип погоды, со слабыми ветровыми потоками, отсутствием атмосферных осадков, и температурой воздуха, на 11-17 ° ниже климатической нормы для декабря. Подобные условия привели к увеличению объема выбросов от объектов теплоэнергетики и уменьшению потенциала рассеивания атмосферы. Согласно данным радиозондирования, над Ангарском сформировался инверсионный слой, мощностью до 1327 м с перепадом температур 13 °С. Расчёт траекторий движения воздушных масс от крупных антропогенных источников гг. Иркутск, Ангарск и Шелехов выполненный с помощью модели HYSPLIT (Рисунок 13 в, г) показал, что воздушные массы от источников перемещались в юго-восточном направлении. При этом основные выбросы от источников г. Шелехов перенеслись в 10-15 км западнее от ст. «Листвянка», выбросы от источников г. Ангарск в 20-30 км северо-восточнее от станции, а выбросы от Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск) были затянуты вдоль долины р. Ангары. Спустя 3 часа после выброса, шлейфы от ТЭЦ г. Иркутск достигли юго-западного побережья оз. Байкал в районе ст. «Листвянка» (Рисунок 4.13 а). Это было зафиксировано в виде повышения концентрации диоксида серы 13 декабря в 8:00. В этот же момент на станции была зафиксирована температурная инверсия с мощностью 200-300 метров и перепадом температуры до 5-6 °, что ослабило возможность рассеивания примесей в атмосфере (Рисунок 4.13 б). Наибольшие среднечасовые концентрации на ст. «Листвянка» 13 декабря 2023 г., были зарегистрированы в промежутке с 4 до 11 часов и составили ~ 600 мкг/м³, с мгновенными значениями 1107 мкг/м³ (Рисунок 4.13 а).

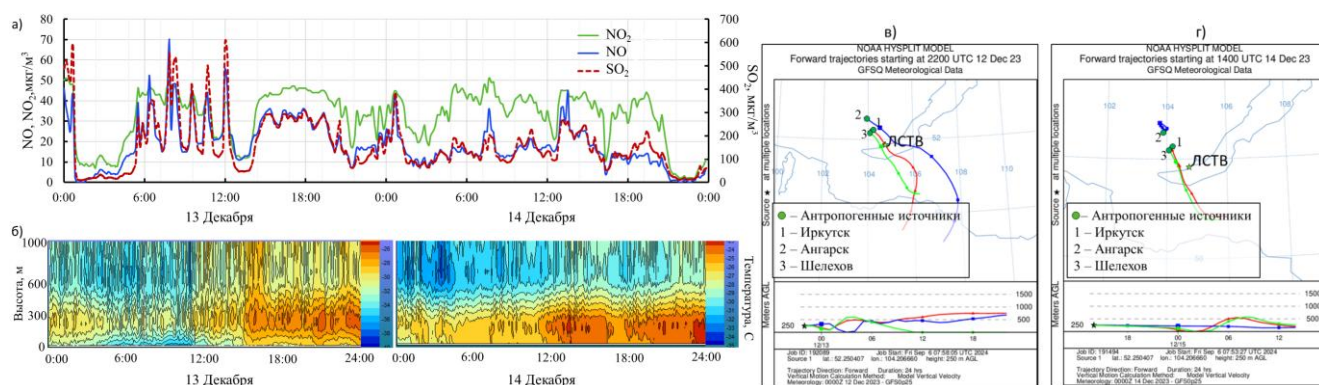


Рисунок 13 – Эпизод сильного загрязнения атмосферы на ст. «Листвянка» 13-14 декабря 2023 г. а) 20-минутные концентрации диоксида серы; г) температурная стратификация атмосферы на ст. «Листвянка» 13 и 14 декабря 2023 г. (по данным измерения профилера МТП-5); в, г) прямые траектории движения воздушных масс от крупных антропогенных источников 13 декабря 2023 г. в 6:00 м.в. и 14 декабря 2023 г. 22:00 м.в.

Основные выводы:

Основные научные и практические результаты работы сводятся к следующему:

1. Предложен оригинальный методический подход, позволяющий создавать эффективную систему мониторинга для комплексной оценки состояния атмосферы в Байкальском регионе. Метод основан на комплексном подходе и объединяет современные методы экологического мониторинга. Подход включает в себя: непрерывный контроль за дисперсным составом атмосферного аэрозоля, малыми газовыми примесями и метеорологическими параметрами; анализ химического состава атмосферных выпадений; применение методов математического моделирования, методов спутникового мониторинга и статистической обработки полученных данных. Этот методический подход может быть успешно применён для решения экологических задач, как в Байкальском регионе, так и в других частях России.

2. Рассчитан процент неблагоприятных метеорологических ситуаций при которых происходит перенос от крупных региональных стационарных источников малых газовых примесей и аэрозольных частиц в воздушный бассейн Южного Байкала. Определены возможные области рассеивания антропогенных примесей от антропогенных источников на территории южного Прибайкалья. Получено, что основной перенос антропогенных примесей от источников Иркутской области направлен на южную котловину Байкала и составил 58% за год, а случаев переноса в южную котловину от источников республики Бурятия зафиксировано не более 15% за исследуемый период.

3. Определена взаимосвязь между изменением концентрации сульфатов в атмосферных осадках и регионом формирования воздушных масс. Анализ проб атмосферных осадков позволил определить удаленные районы-источники, которые могут влиять на состав атмосферных выпадений в Южном Прибайкалье. Наибольшее влияние оказывают промышленные центры Западной и Восточной Сибири. Концентрации сульфат-иона в осадках, сформировавшиеся над этими городами

зафиксировано 3,58-5,52 мг/л. Наименьшее содержание сульфат-иона наблюдается в атмосферных осадках, пришедших с севера Иркутской области и северной части Монголии – 0,9-1,9 мг/л.

4. Для эффективного выбора реперных точек и установки измерительного оборудования, на территории Южного Прибайкалья проведен статистический анализ результатов химического состава проб снежного покрова. Получены количественные оценки накопления антропогенных аэрозолей в снежном покрове на территории Южного Прибайкалья, построены карты экологических нагрузок. Наиболее подвержены антропогенному загрязнению от промышленных центров региона Южная котловина озера Байкал. Максимумы концентраций антропогенных аэрозолей в снежном покрове определены в городах-источниках и населенных пунктах, расположенных на побережье озера Байкал, а также в устье реки Селенги.

4. На основании предложенного в работе методического подхода расширена сеть станций мониторинга. Установка новых станций позволила исследовать механизм переноса и рассеивания антропогенных примесей в воздушном бассейне Южного Байкала. Впервые получены сезонные, недельные и суточные вариации содержания аэрозольных (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1) и малых газовых примесей в атмосфере региона. Установлено, что примеси распространены в атмосфере региона неоднородно как пространственно, так и сезонно. Наибольшее содержание примесей было зафиксировано на всех станциях мониторинга, в декабре и феврале, наименьшее в летние месяцы. Определены фоновые концентрации для различных участков Южного Прибайкалья, сельских и урбанизированных районов. Зафиксировано, что на западном побережье Южного Байкала концентрации газовых и аэрозольных примесей соизмеримы со значениями в городских условиях.

6. Установлено, что экстремально высокие, короткопериодные флуктуации газовых и аэрозольных примесей в атмосфере над Южным Байкалом связаны с переносом шлейфов выбросов от крупных региональных угольных тепловых электростанций, расположенных в пределах Иркутской агломерации. Перенос примесей в атмосферу озера Байкал в основном происходит на высотах до нескольких сотен метров и в виде узких струйных потоков, которые могут проходить через станцию мониторинга «Листвянка» или обходить ее в других направлениях. В зимний период были обнаружены случаи синхронного повышения концентраций аэрозольных частиц и малых газовых примесей, что свидетельствует о влиянии единой группы источников. Систематизировано влияние метеорологических факторов на содержание примесей и уровень загрязнения атмосферы в воздушном бассейне Южного Байкала

7. Совместный анализ спутниковых данных, траекторных расчетов и данных мониторинга с опорных станций подтвердил эпизоды загрязнения воздуха над акваторией озера, обусловленные переносом дымовых шлейфов от антропогенных региональных источников, лесных пожаров, показал возможности эффективного использования спутниковых данных для описания источников и процессов распространения загрязнений на больших площадях Байкальского региона.

8. Показано, что в атмосфере над озером Байкал мезомасштабные струйные течения формируются на высотах 400 – 700 м относительно уреза воды. Непосредственно под струйными течениями, на высотах 300 – 400 м генерируются области с высокой атмосферной завихренностью и интенсивной мезомасштабной турбулентностью. Показано, что при отрицательных вертикальных турбулентных потоках температуры на фоне формирования струйных течений и больших вертикальных сдвигов скорости ветра в нижнем атмосферном слое приземная концентрация аэрозольных примесей имеет тенденцию к увеличению. При положительных или близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры атмосферная турбулентность приводит к противоположному эффекту, при котором концентрации аэрозольных примесей, как правило, остаются на уровне фоновых значений.

9. Проведенные работы предоставляют новые научные и практические результаты для развития современных методов экологического мониторинга, и накопления уникальной базы данных, которую можно использовать при создании новых или верификации уже существующих моделей статистического, машинного и глубокого обучения. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для прогноза изменения экологической обстановки в случае размещения крупного промышленного производства для территорий Восточной Сибири.

Основные публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Scopus/Web of Science

- 1) **Shikhovtsev M.Yu.,** Molozhnikova Y.V., Obolkin V.A., Potemkin V.L., Lutskin E.S., Khodzher T.V. Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia) // Applied sciences. 2024. – V. 14. – № 18. – P. 1-19. DOI: 10.3390/app14188327
- 2) **Шиховцев М.Ю.,** Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Оболкин В.А., Моложникова Е.В. Влияние структуры воздушных движений на характеристики турбулентности и содержание диоксида серы в атмосфере над ст. «Листвянка» // Оптика атмосферы и океана. 2024. – Т. 37. – № 11. – С. 954-961. DOI:10.15372/AOO20241108
- 3) **Шиховцев М.Ю.,** Оболкин В.А., Ходжер Т.В., Моложникова Е.В. Изменчивость приземной концентрации твердых частиц PM1—PM10 в воздушном бассейне южного Прибайкалья // Оптика атмосферы и океана. 2023. – Т. 36. – № 6. – С. 448-455. DOI: 10.15372/AOO20230604
- 4) **Shikhovtsev M.Yu.,** Molozhnikova Y.V. Inter-annual dynamics of regional and transboundary transport of air masses of the Baikal region for 2010-2018 // Proceedings of SPIE. 2020. – V. 11560. – P. 1-8. DOI: 10.1117/12.2574735
- 5) **Shikhovtsev M.Yu.,** Onishchuk N.A., Netsvetaeva O.G., Molozhnikova Ye.V. Multivariate statistical analysis of the chemical composition of the snow in the

- industrial cities of the Southern Baikal region // Proceedings of SPIE. 2021. – V. 11916. – P. 1-8. DOI: 10.1117/12.2600456
- 6) **Shikhovtsev M.Y.**, Obolkin V.A., Molozhnikova Y.V. Dependence of the concentration of small gas impurities in the air basin of the Southern Baikal region on synoptic and meteorological conditions according to the Listvyanka station // Proceedings of SPIE. 2022. – V. 12341. – P. 1-7. DOI: 10.1117/12.2643498
 - 7) **Shikhovtsev M.Yu.**, Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova Y.V. Spatio-temporal variability of small gas impurities in the surface layer of the atmosphere of the southern Baikal region // Proceedings of SPIE. 2023. – V. 12780. – P. 1-10. DOI: 10.1117/12.2687772
 - 8) Molozhnikova Y.V., **Shikhovtsev M.Yu.**, Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V. Ecological Zoning of the Baikal Basin Based on the Results of Chemical Analysis of the Composition of Atmospheric Precipitation Accumulated in the Snow Cover // Applied sciences. 2023. – V. 13. – N 14. – P. 1-17. DOI: 10.3390/app13148171
 - 9) Моложникова Е.В., Голобокова Л.П., Маринайте И.И., Нецветаева О.Г., **Шиховцев М.Ю.**, Ходжер Т.В. Химический состав атмосферных выпадений на территории Байкальского государственного природного биосферного заповедника (восточное побережье Южного Байкала) // Метеорология и гидрология. 2023. – № 4. – С. 10-21. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-4-10-21
 - 10) Marinaite I., Penner I., Molozhnikova E., **Shikhovtsev M.**, Khodzher T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of the Southern Baikal Region (Russia.: Sources and Relationship with Meteorological Conditions // Atmosphere. 2022. – V. 13. – N 3. – P. 1-13. DOI: 10.3390/atmos13030420
 - 11) Obolkin V., Molozhnikova E., **Shikhovtsev M.**, Netsvetaeva O., Khodzher T. Sulfur and Nitrogen Oxides in the Atmosphere of Lake Baikal: Sources, Automatic Monitoring, and Environmental Risks // Atmosphere. 2021. – V. 12. – N 10. – P. 1-10. DOI: 10.3390/atmos12101348
 - 12) Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Моложникова Е.В., **Шиховцев М.Ю.** Некоторые результаты цифрового (in situ. мониторинга загрязнения атмосферы газовыми примесями в центральной экологической зоне Южного Байкала // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». 2020. – Т. 34. – С. 141-155. DOI: 10.26516/2073-3402.2020.34.141
 - 13) Маринайте И.И., Ходжер Т.В., **Шиховцев М.Ю.**, Кустова О.В., Потёмкин В.Л. Изменчивость концентрации аэрозольных частиц, ПАУ, ПХБ в атмосфере над поверхностью Байкала // География и природные ресурсы. 2024. – Т. 1. – С. 82-90. DOI: 10.15372/GIPR20240108
 - 14) Луцкин Е.С., **Шиховцев М.Ю.**, Моложникова Е.В., Оболкин В.А., Бердашкинова О.И., Ходжер Т.В. Ртуть в атмосферном воздухе и осадках в 2022—2023 гг. на станции мониторинга Листвянка (Южное Прибайкалье) // Оптика атмосферы и океана. 2024. – Т. 37. – № 6. – С. 502-511. DOI: 10.15372/AOO20240609
 - 15) Marinaite I.I., Khodzher T.V., Molozhnikova E.V., **Shikhovtsev M.Yu.**, Kustova O.V., Potyomkin V.L. Studies of spatiotemporal distribution of polycyclic aromatic

hydrocarbons and sub-10 μm particulate matter above the water area of Lake Baikal in the autumn of 2021 // Proceedings of SPIE. 2022. – V. 12341. – P. 1-6. DOI: 10.1117/12.2643380

- 16) Molozhnikova Y.V., **Shikhovtsev M.Yu.**, Popova A.K., Obolkin V.A., Khodzher T.V. Comparative analysis of satellite and continuous surface measurements of gas impurities in the air basin at the Listvyanka station, Lake Baikal // Proceedings of SPIE. 2022. – V. 12341. – P. 1-6. DOI: 10.1117/12.2643507
- 17) Molozhnikova Y.V., **Shikhovtsev M.Yu.**, Marinaite I.I., Netsvetaeva O.G., Onishchuk N.A. Spatial distribution of anthropogenic tracers in the snow cover of the Southern Baikal region // Proceedings of SPIE. 2022. – V. 12341. – P. 1-7. DOI: 10.1117/12.2644206
- 18) Molozhnikova Y.V., **Shikhovtsev M.Yu.**, Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V. Determination of the groups of sources affecting the chemical composition of atmospheric fallout on the northeastern coast of Lake Baikal // Proceedings of SPIE. 2023. – V. 12780. – P. 1-6. DOI: 10.1117/12.2685152

Статьи в материалах и сборниках конференций

- 1) **Шиховцев М.Ю.**, Онищук Н.А., Нецветаева О.Г., Моложникова Е.В. Многомерный статистический анализ химического состава снежного покрова в промышленных городах Южного Прибайкалья // XXVII Международный Симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Конференция С. Исследование атмосферы и океана оптическими методами. 05-09 июля 2021. Москва – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021. – Т. 27. – С. С-25 - С-28. <https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/27/C.pdf> (Стендовый доклад)
- 2) **Шиховцев М.Ю.**, Оболкин В.А., Моложникова Е.В., Ходжер Т.В. Задымление атмосферы Сибири, как следствие аномальных пожаров в августе 2021 г // Тринадцатые Петряновские и четвертые Фуксовские чтения. 08-09 октября 2021. Нижний Новгород 2021. – С. 88-90. (71916) (Стендовый доклад)
- 3) **Шиховцев М.Ю.**, Оболкин В.А., Ходжер Т.В., Моложникова Е.В. Влияние синоптических процессов на вариации диоксида серы в воздушном бассейне Южного Прибайкалья // Аэрозоли Сибири. XXVIII Конференция: Тезисы докладов. 23-26 ноября 2021. Томск – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021. – С. 48 (Устный доклад).
- 4) **Шиховцев М.Ю.**, Моложникова Е.В. Первые результаты применения современных недорогих датчиков для мониторинга аэрозольных примесей в атмосфере Южного Байкала // Третья всероссийская научная конференция с международным участием "Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества". 15-17 ноября 2023. – Москва: ФГБУ «ИГКЭ». 2023. – С. 191-194. ISBN: 978-5-6046393-0-6 (Устный доклад).
- 5) **Шиховцев М.Ю.** Пространственно-временная изменчивость диоксида серы в приземном слое Южного Прибайкалья // XIX Большой Географический

Фестиваль. 7-9 апреля 2023. Санкт-Петербург 2023. – С. 441-446 (*Устный доклад*).

- 6) **Шиховцев М.Ю.**, Макаров М.М., Асламов И.А., Моложникова Е.В. Первые результаты измерения концентрации аэрозольных примесей в атмосфере Южного Прибайкалья с помощью современных low-cost сенсоров // XXX рабочая группа "Аэрозоли Сибири". 28 ноября - 1 декабря 2023. Томск 2023 (*Устный доклад*).
- 7) **Шиховцев М.Ю.**, Моложникова Е.В. Взаимосвязь концентраций малых газовых примесей и метеопараметров в условиях температурных инверсий на примере г. Ангарск // XXX рабочая группа "Аэрозоли Сибири". 28 ноября - 1 декабря 2023. Томск 2023 (*Стендовый доклад*).