

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Сибирское отделение
Лимнологический Институт

УДК

На правах рукописи

ШИХОВЦЕВ Максим Юрьевич

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

Специальность 1.6.18 – науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Е. В. Моложникова

Иркутск 2024

Оглавление

<i>ВВЕДЕНИЕ</i>	5
<i>Актуальность темы</i>	5
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1 ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ АЭРОЗОЛЯМИ	14
1.1.1 <i>Влияние аэрозолей на окружающую среду</i>	15
1.1.2 <i>Происхождение и химический состав аэрозольных частиц</i>	19
1.2 ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ГАЗОВЫМИ ПРИМЕСЯМИ.....	24
1.3 МЕТОДЫ АНАЛИЗА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ.....	25
1.3.1 <i>Исследование атмосферного аэрозоля и осадков для оценки уровня загрязнения окружающей среды</i>	26
1.3.2 <i>Использование снегосъемки для исследований загрязнения окружающей среды аэрозолями</i>	27
1.3.3 <i>Использование дистанционного зондирования в целях мониторинга загрязнения атмосферы</i>	28
1.3.4 <i>Использование реанализов и математических моделей</i>	31
1.4 ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ.....	32
1.4.1 <i>Макромасштаб</i>	32
1.4.2 <i>Мезометеорологический масштаб</i>	33
1.5 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	34
2 РАЗВИТИЕ И АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОПОРНЫХ СТАНЦИЯХ МОНИТОРИНГА В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ	35
2.1 ОБЩАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.2 АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ	36
2.3 АНАЛИЗ СЕТЕЙ МОНИТОРИНГА	36
2.4 УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ	38
2.5 УЧЕТ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ	39

2.6	ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ	40
2.7	ВЫБОР И ПРИНЦИП УСТАНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ	40
2.8	ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ АДАПТАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ.....	42
2.8.1	<i>Анализ источников загрязнения атмосферы в Байкальском регионе....</i>	42
2.8.2	<i>Анализ существующей сети наблюдения в Байкальском регионе.....</i>	46
2.8.3	<i>Учет физико-географических особенностей Южного Прибайкалья....</i>	47
2.8.4	<i>Оценка метеорологических особенностей изучаемой территории</i>	50
2.8.5	<i>Оценка пространственной картины распределения примесей в Южном Прибайкалье на основе данных о химическом составе снежного покрова</i>	73
2.8.6	<i>Оценка пространственной картины распределения примесей в Южном Прибайкалье на основе данных дистанционного зондирования атмосферы.....</i>	80
2.8.7	<i>Описание станций наблюдения и установленного оборудования</i>	84
3	ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ.....	94
3.1	ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ОЗ. БАЙКАЛ	94
3.1.1	<i>Массовая концентрация частиц $PM_1 - PM_{10}$ в атмосфере на станции «Листвянка»</i>	94
3.1.2.	<i>Применение современных low-cost сенсоров для определения концентрации аэрозольных примесей в атмосфере Южного Прибайкалья</i>	98
3.1.3.	<i>Суточная изменчивость PM в атмосфере ст. Листвянка.....</i>	103
4	ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ.....	105
4.2	ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТМОСФЕРЫ НАД СТ. ЛИСТВЯНКА.....	114
4.3	ВЛИЯНИЕ МИКРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ АТМОСФЕРЫ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ НАД СТ. «ЛИСТВЯНКА».....	122

4.4	ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКСИДОВ СЕРЫ И АЗОТА В АТМОСФЕРЕ ЗАПАДНОГО И ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЮЖНОГО БАЙКАЛА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2023 Г.....	128
4.5	ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКСИДОВ СЕРЫ И АЗОТА В АТМОСФЕРЕ ГОРОДОВ-ИСТОЧНИКОВ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ МОНИТОРИНГА.....	135
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

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, 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 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в который 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-Удэ). 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 [1, 2]. 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 [3, 4, 5]. Результаты этих работ показали, что наиболее сильно подвержена загрязнению через атмосферу Южная котловина Байкала [6, 7]. 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 [8, 9]. Ранее было установлено значительное загрязнение атмосферы над Южным Байкалом за счет дальнего высотного переноса оксидов серы и азота со стороны удаленных региональных ТЭЦ [10]. 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 [11, 12, 13].

Все вышесказанное 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.

Объект исследования

В диссертационной работе объектом исследования является атмосфера Южного Прибайкалья.

Предмет исследования

Малые газовые и аэрозольные примеси, синоптические процессы, мезо- и микрометеорологические параметры в атмосфере Южного Прибайкалья, процессы переноса примесей на побережье и акваторию Южного Байкала.

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»;

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

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

3) 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, позволившие 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;

1. 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);

2. 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;

3. Исследован механизм переноса 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 данных (факторный анализ данных, траекторный анализ и геостатистическая обработка данных) и натурных данных (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 во 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.

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 изысканиях по проектам: РФФ № 19-77-20058 (Исследования состава и пространственно-временного распределения аэрозольно-газовых примесей атмосферы в акватории оз. Байкал), № 22-29-01137 и № 19-79-00061; РФФИ № 20-45-380024 р_а (Экотоксикологическое исследование снега в городах Иркутской области (на примере Иркутска, Ангарска и Шелехова)); крупных научных проектах 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 Верецагинской 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 ученых «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 также 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) – 180 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 и к.г.н. В. А. Оболкину, к.г.н. М. М. Макарову, 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.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблема загрязнения окружающей среды аэрозолями

Твердые частицы (particular matter – PM) представляют собой систему, состоящую из антропогенных и природных материалов, взвешенных в атмосфере в виде аэрозольных частиц [14, 15]. Эти частицы могут быть первичного происхождения, поступающие непосредственно в атмосферу в жидкой или твердой фазе, или вторичного, то есть образующиеся в атмосфере из газообразных прекурсоров. Как правило, первичные аэрозоли крупнее, чем вторичные аэрозоли [16, 17]. Источниками первичного аэрозоля могут выступать как естественные процессы: песчаные бури, морские брызги, вулканическая активность, лесные пожары и биогенные выбросы, так и антропогенные, например, строительство, промышленность, сельское хозяйство и сжигание биомассы и ископаемого топлива [18, 19]. Вторичные аэрозоли представляют собой смеси соединений, основными компонентами которых являются сульфаты и нитраты [20]. По размеру они представляют собой ядра (< 1 мкм). Попадая в атмосферу, твердые частицы подвергаются микрофизическим (коагуляция, конденсация и реструктуризация) и химическим (окисление, поглощение газов и другие химические реакции) преобразованиям и изменяют свой размер, структуру, химический состав и переносятся с атмосферными потоками от источников поступления [21]. Тропосферные аэрозоли, вызывающие основную озабоченность, находятся в атмосфере в среднем в течение 5 дней и переносятся на расстояние примерно 2000 км от источников [22]. Это определено эффективным удалением твердых частиц, либо в ходе прямого осаждения на поверхность, либо путем поглощения облачными каплями и кристаллами льда с последующим выпадением осадков [23, 24, 25]. Напротив, аэрозоли, занесенные в стратосферу в результате взрывных извержений вулканов, могут находиться в ней

от нескольких месяцев до нескольких лет из-за медленных скоростей осаждения частиц и образования вторичного аэрозоля.

Диапазон размеров твердых частиц охватывает пять порядков – от 0,001 мкм до 100 мкм. Минимальный размер частиц определен возможностью существования вещества в агрегатном состоянии [26]. Так, одна молекула воды не может образовать ни газа, ни жидкости, ни твердого тела. Для образования фазы необходимо по крайней мере 20–30 молекул. Таким образом, самая маленькая частица твердого вещества или жидкости не может иметь размер меньше $1 \cdot 10^{-3}$ мкм (1 нм). Однозначно определить верхнюю границу размера аэрозоля довольно сложно. Согласно Х. Юнге, эта граница равна $R_{\max} = 20$ мкм, однако во время пылевых бурь верхний предел размеров витающих в воздухе частиц может превышать 100 мкм [27].

По размерам различают три класса аэрозольных частиц:

- . мелкодисперсные ($R \leq 0,1$ мкм),
- . среднедисперсные ($0,1 \text{ мкм} < R < 1 \text{ мкм}$),
- . грубодисперсные ($R \geq 1$ мкм).

1.1.1 Влияние аэрозолей на окружающую среду

Влияние на здоровье. Устойчивый интерес к изучению загрязнения атмосферы твердыми частицами обусловлен их негативным влиянием на различные среды. В ряде исследований показана взаимосвязь загрязнения атмосферы твердыми частицами с различными проблемами со здоровьем человека [28, 29]. К ним относят преждевременную смерть людей с заболеваниями сердца или легких, сердечные приступы, обострение астмы, снижение функции легких и усиление симптомов респираторных заболеваний [30, 31]. Согласно таким оценкам, при увеличении уровня загрязнения атмосферы PM_{10} на каждые 10 мкг/м^3 происходит возрастание уровня смертности на 0,2–0,6 %. При увеличении концентрации $PM_{2,5}$ на те же 10 мкг/м^3 риск смерти, вызванный сердечно-легочными заболеваниями, возрастает на 6–13 % [32]. Это

особенно важно для детей, пожилых людей и тех, у кого уже существуют заболевания легких и сердца [33]. Учитывая, что $PM_{2,5}$ могут проникать глубоко в легкие, раздражая альвеолярную стенку, это приводит к снижению функции легких [34]. Согласно Всемирной организации здравоохранения, примерно 3 % случаев смертей от сердечно-легочного заболевания и 5 % случаев смерти от рака легких в мире связаны с чрезмерным аэрозольным загрязнением атмосферы. Изменения в дыхательной [35], сердечно-сосудистой [36] и когнитивной функциях снижают продуктивность работников, что, в свою очередь, приводит к неблагоприятным экономическим последствиям [37].

Климатические эффекты. Помимо влияния на здоровье человека атмосферный аэрозоль оказывает воздействие на климатическую систему Земли, участвуя как в процессах нагрева, так и в процессах охлаждения приземного слоя атмосферы [38]. В настоящее время это воздействие разделяют на три основных типа: прямое, косвенное и смешанное [39, 40, 41, 42]. Схематическое представление о влиянии аэрозолей на атмосферные процессы представлено на рисунке 1.1.

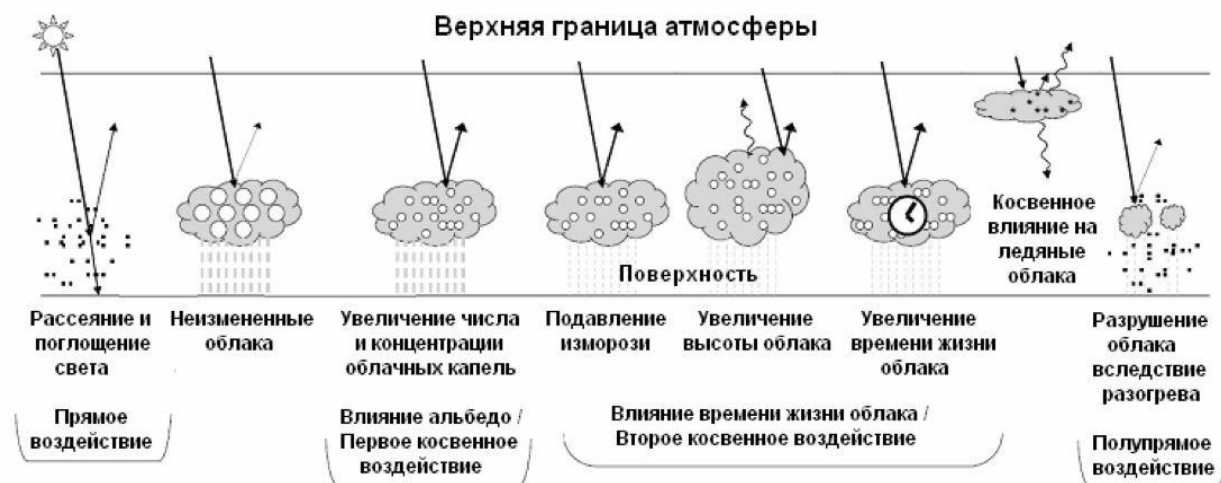


Рисунок 1.1 – Прямое воздействие аэрозоля и эффект альбедо облаков. Маленькие черные точки – аэрозольные частицы; большие открытые белые кружки – облачные капли; прямые линии – падающее и отраженное солнечное

излучение; волнистые линии – тепловое излучение; вертикальным пунктиром изображены осадки [43].

Прямое воздействие заключается в том, что аэрозоли поглощают и рассеивают солнечное и тепловое излучение, таким образом изменяя радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Наибольшее прямое воздействие на потоки солнечного и теплового излучения оказывают аэрозоли, содержащие сульфаты, органический углерод, сажу и пыль, попадающие в атмосферу в результате природной и хозяйственной деятельности [43]. Основные радиационно-климатические эффекты атмосферного аэрозоля связаны со следующими параметрами: фактор асимметрии индикатрисы рассеяния, коэффициент ослабления электромагнитного излучения и альbedo однократного рассеяния. Эти параметры зависят от длины волны излучения, содержания аэрозоля в атмосфере, относительной влажности воздуха [44].

Наличие в атмосфере рассеивающих аэрозолей приводит к негативному радиационному эффекту и может существенно снизить количество солнечной радиации, достигающей земли и, таким образом, ослабить тепловые потоки, которые определяют суточное изменение температуры в приземном слое атмосферы. Это, в свою очередь, приводит к ослаблению турбулентности в приземном слое и уменьшению поступления сухого воздуха из свободной тропосферы, что приводит к увеличению влажности. Повышенная влажность способствует гигроскопичному росту аэрозолей и усиливает рассеяние солнечной радиации, а также может способствовать образованию вторичных аэрозолей – сульфатов и нитратов. Поглощающие аэрозольные образования над рассеивающими поверхностями (облаками, снегом, льдом, пустынями) могут способствовать росту температуры воздуха в приземном слое, а над поглощающими поверхностями (океан или лес) – её снижению.

Косвенное климатическое воздействие аэрозолей заключается в изменении радиационных свойств облаков (увеличение поглощения и отражения), а также

времени их жизни в атмосфере. Первым косвенным эффектом является микрофизическое влияние аэрозолей на концентрацию и размер капель облаков при фиксированном влагосодержании и изменение альбедо [45]. Этот эффект заключается в том, что увеличение числа ядер конденсации в воздухе по-разному влияет на альбедо оптически тонких и оптически плотных облаков. Облака с большой оптической толщиной при отсутствии аэрозольных частиц сами по себе обладают высоким альбедо, поэтому привнесение в облачную среду ядер конденсации, поглощающих солнечную радиацию (например, сажи), снижает их отражательную способность. Тонкие полупрозрачные облака характеризуются относительно низким альбедо, поэтому добавление к ним частиц аэрозоля может повысить их отражательную способность. Таким образом, «загрязнение» облаков аэрозолями делает оптически плотные облака темнее, а тонкие – светлее. Так, тонкие стратосферные облака, загрязненные антропогенными ядрами конденсации, охлаждают стратосферу, а толстые кучевые облака нагревают приземный слой атмосферы [46, 47, 48, 49, 50]. Микрофизическое влияние аэрозолей на содержание воды в облаках, высоту их расположения и время их существования называется вторым косвенным эффектом, или эффектом Альбрехта [51, 52].

В последние годы стали также рассматривать так называемые полупрямые эффекты, когда поглощающие аэрозоли изменяют свойства облаков, не действуя непосредственно на ядра конденсации и ядра льда, а оказывая влияние за счет:

- 1) нагревания окружающего воздуха при уменьшении количества солнечного излучения, достигающего земли, что стабилизирует атмосферу, уменьшает конвекцию и возможность образования облаков;
- 2) повышения температуры атмосферы, как следствие – понижения относительной влажности. Это препятствует образованию облаков и усиливает испарение существующих [53].

Совместное радиационное воздействие аэрозолей до сих пор остается весьма неопределенным, но, по оценкам, оно приводит к суммарному охлаждающему эффекту [54].

Воздействие на окружающую среду. В зависимости от химического состава твердые частицы могут привести к закислению озер и ручьев, изменить баланс питательных веществ в прибрежных водах и бассейнах крупных рек, истощить питательные вещества в почве, нанести ущерб чувствительным лесам и сельскохозяйственным культурам, а также отрицательно повлиять на разнообразие экосистем [55]. Кислотные дожди оказывают разрушительное воздействие на инфраструктуру, ускоряя выветривание зданий, а также уличных скульптур и статуй. Более того, $PM_{2,5}$ ответственны за смог, который можно увидеть как в городских, так и в сельских регионах [56]. Поглощение солнечной радиации может вызвать температурную инверсию в приземном слое атмосферы, которая часто ассоциируется с эпизодами сильного загрязнения.

1.1.2 Происхождение и химический состав аэрозольных частиц

В зависимости от своего происхождения аэрозоли могут быть естественными или антропогенными. Основные источники антропогенных твердых частиц в атмосфере находятся в городах и промышленных зонах. К источникам частиц антропогенного происхождения относятся: дорожное движение (выбросы выхлопных газов, истирание дорожного покрытия, износ тормозов и шин, ресуспендирование частиц с дорог с твердым покрытием); промышленная деятельность (выбросы электростанций, нефтеперерабатывающих заводов, горнодобывающей промышленности); строительство (земляные работы, перемещение почвы, снос зданий); и выбросы от жилья (отопление, приготовление пищи). С другой стороны, в сельской местности основными источниками аэрозолей являются сжигание биомассы и выбросы в результате различных видов сельскохозяйственной деятельности.

К природным источникам твердых частиц относятся моря и океаны, пустыни, почва, вулканы, растительность, лесные пожары и молнии. Этот широкий спектр источников генерирует частицы с очень разным химическим составом, обычно связанным с их происхождением.

1. *Почвенный аэрозоль* – попадает в атмосферу в результате ветровой эрозии. Концентрация и химический состав почвенного аэрозоля отличаются большим разнообразием, что обусловлено химическим составом выветриваемых пород. Однако химический состав почвенного аэрозоля не идентичен составу почвы, поскольку почвенные компоненты не одинаково выветриваются и распространяются в воздухе. В частицах почвенного аэрозоля преобладают соединения кремния, глиноземы, карбонаты и кальциты, окислы железа, алюминия, марганца, а также отмечается относительно большое содержание калия, магния и натрия [57].

2. *Морской аэрозоль*. Моря и океаны занимают более 60 % поверхности Земли и являются глобальным и постоянно действующим источником легко растворимых и гигроскопических аэрозольных частиц. Эти частицы в виде солевых растворов (от долей до десятков мкм по радиусу) образуются в результате инъекции в атмосферный воздух мельчайших капель малых размеров. К основным механизмам образования частиц морского солевого аэрозоля относятся сдувание брызг с гребней разбивающихся волн, образование более мелких капель из-за лопания большого числа пузырьков воздуха, как поднимающихся на водную поверхность, так и образующихся непосредственно на ней [58]. Основным компонентом морских аэрозолей является хлорид натрия, однако в них присутствуют карбонаты, сульфаты, калий, магний и кальций, ряд органических соединений. Реальный состав морских солевых частиц может значительно отличаться от химического состава сухого остатка морской воды: 88,7 % – хлориды, 10,8 % – сульфаты, 0,3 % – карбонаты и 0,2 % – остальные соли [59]. Такое расхождение связано с особенностями механизма поступления солевых частиц в атмосферу и состоянием поверхностно-активной пленки,

покрывающей водную поверхность. Пространственно распространенность морских солевых частиц ограничена акваторией Мирового океана и узкой прибрежной полосой. В вертикальном направлении – зоной активного турбулентного обмена, с высотой 2–3 км над поверхностью.

3. *Вулканы.* Важным источником поступления природного аэрозоля является вулканическая деятельность. Аэрозоли вулканического происхождения представляют собой частицы измельченной лавы, водяного пара, сернистого газа, соляной кислоты, продуктов истирания стенок кратера и легко испаряющихся металлов. Анализ химического состава вулканических выбросов показывает преимущественное содержание соединений кремния – 60–80 %, сульфатов – 30–10 %, кальцитов – 3–10 %, соединений алюминия – 0–20 %, железа – 1–10 % [60]. Для частиц вулканического аэрозоля характерно изменение химического состава с высотой: мелкие частицы сильно обогащены умеренно летучими элементами (мышьяк, селен, свинец, кадмий, цинк), более крупные частицы преимущественно содержат элементы, характерные для магмы (кремний, кальций, скандий, титан, железо, цинк, торий) [61].

4. *Пыль внеземного происхождения.* Различают, по крайней мере, два вида пыли космического происхождения: субмикронные частицы, которые могут достигать земной поверхности в неизменном виде, и более крупные частицы, претерпевающие процесс абляции. Доля пылевой материи внеземного происхождения составляет приблизительно 10 % от общего содержания аэрозольных частиц в нижней стратосфере, и с высотой увеличивается до 80–100 %. Частицы межзвездной пыли могут быть ядрами конденсации и, таким образом, влиять на облачный покров, изменять прозрачность атмосферы и, как следствие, воздействовать на радиационный баланс. Имеющиеся оценки выпадения массы метеоритной пыли в атмосферу имеют порядок 10^4 – 10^6 т/год [62].

5. *Природные пожары* являются еще одним важным источником образования атмосферного аэрозоля с разнообразным химическим составом,

включающим в себя как сложные углеводороды, так и неорганическую золу, состоящую из минералов, первоначально присутствовавших в тканях растений. Основными компонентами аэрозолей, образующихся при пожарах растительности, являются кристаллический углеводород (сажа) и «летучий пепел» (минеральный остаток) [63]. От 80 % до 90 % частиц, образующихся при лесных пожарах, имеют диаметр менее 1 мкм [64]. При этом характеристики аэрозолей сильно различаются от одного пожара к другому, в зависимости от типа растительности, влажности, фазы горения и условий ветра. Физические, химические и оптические характеристики частиц изменяются по мере рассеивания дымового шлейфа, что усложняет сопоставление характеристик отдельных пожаров и группы дымовых шлейфов, влияющих на радиационный баланс атмосферы [65].

6. *Вторичный аэрозоль.* Значительная масса атмосферного аэрозоля приходится на его тонкодисперсную фракцию, которая образуется непосредственно в самой атмосфере в процессе фото- и газохимических превращений из малых газовых примесей. Эта фракция аэрозолей получила название аэрозоль *in situ*, или вторичный аэрозоль. Его основными газовыми предшественниками являются оксиды серы, азота, аммиак, водяной пар, а также окислы и полимеры углеводородов. Процессы генерации аэрозольных частиц в атмосфере, как в окислительной среде, идут в сторону образования высших окислов при облучении прекурсоров коротковолновой солнечной радиацией в присутствии сильных окислителей – озона, кислорода. Установлено, что основными компонентами этих частиц являются соединения серы [66, 67]. Сульфатный аэрозоль распространен повсеместно и составляет от 30 до 80 % в суммарной продукции атмосферного аэрозоля, в зависимости от региона. В нижнем пятикилометровом слое атмосферы центральных регионов Европы половина всех частиц с размерами 0,28–0,55 мкм состоит из соединений серы. В атмосфере над прибрежными водами Тихого океана четверть общего аэрозоля с размерами менее 1 мкм имеет сульфатный состав. В Антарктике более 50 %

частиц, собранных импакторами, представляли собой соединения серы и серной кислоты. В стратосфере сульфатный аэрозоль образуется в процессе фотохимических реакций с образованием серной кислоты. Подобная распространенность сульфатного аэрозоля указывает на наличие мощных источников поступления в атмосферу соединений серы, а также на способность сульфатного аэрозоля и его газовых предшественников к высокой степени перемешивания в атмосфере. К основным естественным источникам серы в тропосфере относится эмиссия сероводорода (H_2S), вызванная процессами разложения живых организмов и продуктов их жизнедеятельности микробами. Известно, что в глубинных водах слабопроточных морей скапливается колоссальное количество H_2S . Однако не до конца определено, насколько H_2S может преодолеть поверхностные воды, представляющие для него окислительный фильтр. Вместе с тем имеются данные, указывающие на снижение концентрации сернистого газа по мере удаления от побережья в глубь материка [68]. Мощными, но эпизодическими источниками серосодержащих соединений являются извержения вулканов. В отличие от почвенного и морского, вторичный аэрозоль существенным образом зависит от режима инсоляции и метеорологических параметров, поэтому характеризуется чрезвычайно неравномерным и нестабильным распределением.

7. *Генерация органического аэрозоля.* Основная масса органического аэрозоля образуется в результате фотохимических превращений вторичного аэрозоля из органических паров, выделяемых в атмосферу растительностью и фитопланктоном. Образующиеся при этом частицы заполняют диапазон субмикронных размеров. По оценочным данным, в атмосферу выделяется 108 т/год. Около 25 % органического аэрозоля поступает в атмосферу в виде готовых органических частиц. К ним относятся биологические частицы – пыльца, споры растений, грибки, микробы и вирусы [69].

8. *Антропогенный аэрозоль.* Основными антропогенными источниками атмосферного аэрозоля являются энергетика, транспорт, химическая и

металлургическая промышленность. Химический и гранулометрический состав аэрозольных частиц зависит от технологического процесса в источнике. Состав аэрозольных частиц из дымовых труб следующий: зола: 51–62 % (преимущественно соединения кремния и кальция), сажа: 27–48 %; смола – 1 %. Большинство малых газовых примесей, выбрасываемых в атмосферу из дымовых труб (SO_2 , NO_x , альдегиды, ненасыщенные углеводороды), участвуют в генерации аэрозолей *in situ* [70]. Состав отработанных газов от двигателей внутреннего сгорания изучен достаточно подробно – эти двигатели относятся к основным антропогенным источникам выбросов углеводородов и соединений свинца, в основном в виде аэрозоля неорганических солей и окислов.

1.2 Проблема загрязнения окружающей среды газовыми примесями

Диоксид серы (SO_2) и оксиды азота (NO_x) являются одними из наиболее широко распространенных газообразных загрязняющих веществ в атмосфере и оказывают существенное влияние на региональное и глобальное качество воздуха, здоровье человека, экологические условия и изменение климата [71, 72, 73]. Основными источниками оксидов азота являются высокотемпературное сжигание ископаемого топлива и биомассы [74], а также грозовая активность [75]. NO_2 участвует в круговороте азота в системе «воздух – вода – почва» [76], влияет на интенсивность окислительных процессов в атмосфере [77] и при наличии в атмосфере летучих органических соединений приводит к образованию приземного озона [78, 79].

Основными источниками SO_2 являются вулканическая активность, сжигание органического топлива (уголь, нефть) и очистка сульфидных руд. Однако, если вулканический SO_2 выбрасывается в атмосферу на больших высотах над пограничным слоем атмосферы (ПСА), антропогенные выбросы SO_2 , от объектов теплоэнергетики и промышленности, поступают преимущественно в пределы ПСА или немного выше. Оксиды азота и серы, находящиеся в приземном слое атмосферы, участвуют во множестве физико-химических реакций.

Окисляясь, диоксид азота реагирует с аммиаком, что приводит к образованию аэрозоля нитрата аммония. SO_2 окисляется в реакциях с гидроксильным радикалом, с озоном или перекисью водорода, образуя сульфатные аэрозоли [80, 81]. Это способствует загрязнению атмосферы твердыми частицами с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм ($\text{PM}_{2.5}$) [82], что представляет серьезную опасность для здоровья человека [83, 84], снижает метеорологическую дальность видимости [85], а также влияет на погоду и климат посредством прямого радиационного воздействия и косвенного изменения образования облаков и оптических свойств атмосферы [86, 87].

Повышенное содержание SO_2 и NO_x в атмосфере увеличивает риски возникновения респираторных и онкологических заболеваний и негативно влияет на репродуктивную функцию организмов [88, 89, 90]. Оксиды азота и серы общепризнанно являются кислотообразующими газами и способствуют возникновению кислотных дождей и подкислению почв, что представляет серьезную опасность для биоразнообразия, в особенности для растений. Высокое содержание оксидов азота негативно сказывается на растительности и сельскохозяйственных культурах, поскольку снижает эффективность роста растений [91].

1.3 Методы анализа уровня загрязнения атмосферы

Современный анализ уровня загрязнения атмосферы представляет собой широкий спектр дистанционных и контактных методов. Их можно разделить на две группы – непрерывный и усредненный по времени отбор проб. Непрерывный отбор проб осуществляется с помощью автоматических датчиков, оптических, электрохимических, а также спектроскопических методов и обеспечивает непрерывную регистрацию качественных и количественных характеристик атмосферных примесей. Затем из непрерывных записей можно получить усредненные по времени данные о параметрах аэрозольных и газовых примесей. Усредненные по времени данные также можно получить путем отбора проб

воздуха за установленное время, атмосферных выпадений, снежного и почвенного покрова. Затем пробы анализируются установленными физическими, химическими и биологическими методами на значения концентрации, которые являются средними значениями.

1.3.1 Исследование атмосферного аэрозоля и осадков для оценки уровня загрязнения окружающей среды

Пассивный метод определения качества атмосферного воздуха – это один из наиболее широко используемых методов анализа во всем мире [92, 93]. Метод часто применяется в международных сетях мониторинга, таких как Сеть мониторинга кислотного осаждения в Восточной Азии (ЕАНЕТ) и Всемирная метеорологическая организация (ВМО). В основе данного метода лежит накопление газов на пропитанном фильтре за счет происходящей диффузии в соответствии с законом Фика [94]. Достоинствами данного метода являются: дешевое оборудование для отбора проб, работа без использования электричества и отсутствие жестких требований к квалификации персонала, устанавливающего оборудование для отбора проб. Таким образом, благодаря этим характеристикам, этот метод универсален и может качественно оценивать состояние воздуха в труднодоступных местах, таких как горы, леса, водные зоны и другие локации [95]. Время отбора проб зависит от нагрузки в окружающей среде, частоты отбора проб, количества пустых субстратов и чувствительности анализа и может варьироваться от нескольких часов в городских районах до нескольких суток и более в чистых фоновых условиях [96]. Существенным недостатком данного метода является высокая продолжительность отбора пробы, что приводит к равномерному усреднению результатов по времени.

Широкое применение для анализа влажного осаждения атмосферных примесей получил химический анализ атмосферных выпадений (дождь, снег). С помощью определения химического состава и кислотности атмосферных осадков возможно определить общий уровень атмосферного загрязнения, выявить его

динамику, оценить перенос веществ в атмосфере и вклад трансграничного переноса, определить сезонную и суммарную нагрузку содержащихся в осадках химических соединений на подстилающую поверхность [97, 98]. При этом примеси, содержащиеся в осадках, рассматриваются как индикатор загрязнения определенного слоя атмосферы. Это приобретает особое значение для тех территорий, на которых другие виды наблюдений за загрязнением атмосферы не проводятся. Существенными недостатками данного метода являются очевидное непостоянство в частоте отбора проб и зависимость от естественных природных процессов.

Существенным достоинством данных методов является широкий перечень анализируемых параметров: ионный и микроэлементный состав, стойкие органические загрязнители, нефтепродукты и т. д.

1.3.2 Использование снегосъемки для исследований загрязнения окружающей среды аэрозолями

Изучение химического состава снежного покрова используется для эффективного и экономичного мониторинга загрязнения воздуха в регионах с холодным климатом [99]. Использование снежного покрова для оценки атмосферного переноса от природных и антропогенных источников имеет долгую историю [100, 101]. Особый интерес эти исследования представляют при изучении процессов длительного загрязнения. Снежный покров представляет собой сложную гетерогенную систему, основными компонентами которой являются твердая вода (ее содержание обычно превышает 99 %) и примесь твердых аэрозольных частиц. Эти аэрозольные фракции представляют наибольший интерес для исследования проб снега, поскольку по их характеристикам можно получить информацию об источниках, химическом составе аэрозолей и о характере распространения антропогенных веществ, выбрасываемых в атмосферу и переносящихся на большие расстояния [102]. Общей классификации источников аэрозольных частиц в снеге не существует.

Можно предположить наличие аэрозольных частиц природного происхождения (континентальный и морской аэрозоль, космическая пыль) [103], а также антропогенные выбросы промышленных предприятий, транспорта, сельского хозяйства, коммунального хозяйства [104]. В зависимости от мест отбора проб вклад источников и соотношения между веществами могут различаться по химическому составу и преобладанию маркерных веществ [105].

В настоящее время в России все чаще в качестве объекта мониторинга состояния атмосферы используют снежный покров как интегральный показатель загрязненности атмосферы на территориях, характеризующихся наличием устойчивого снежного покрова в течение длительного времени. Публикации по мониторингу снежного покрова можно разделить на несколько групп: местного, регионального или глобального значения. Самые многочисленные посвящены изучению состояния окружающей среды в промышленных центрах [106, 107, 108, 109, 110]. Также встречаются работы, где оценивают влияние конкретной промышленной группы источников [111, 112, 113, 114] или определенного антропогенного вещества [115, 116,] на окружающую среду путем анализа проб снега. Работ, посвященных региональному мониторингу на больших территориях [117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124] и в фоновых районах [125, 126], значительно меньше, что связано с трудоемкостью отбора проб на больших территориях.

1.3.3 Использование дистанционного зондирования в целях мониторинга загрязнения атмосферы

Спутниковый мониторинг позволяет с достаточной степенью достоверности получить данные о распространении загрязнителей воздуха на больших территориях и оценить характеристики атмосферы с приемлемой точностью [127]. На протяжении последних десятилетий спутниковые системы измерения газовых (NO_x , NH_3 , CO , O_3 , SO_2) и аэрозольных примесей (PM_x) активно использовались для определения глобального распределения

загрязнителей воздуха в атмосфере [128, 129]. Одним из общедоступных средств спутникового зондирования атмосферы является спутник Sentinel-5P (Европейское космическое агентство). Sentinel-5P состоит из одного спутника с установленным прибором мониторинга тропосферы (TROPOMI), который представляет собой электрометр для измерения ультрафиолетового и видимого (270–495 нм), ближнего инфракрасного (675–775 нм) и коротковолнового инфракрасного диапазона (2305–2385 нм) света. Данные доступны в следующих режимах обработки: NRT (близкое к реальному времени) и OFFL (автономный уровень). Однако некоторые проблемы, связанные с использованием спутникового мониторинга, до сих пор остались нерешенными. Прежде всего, они связаны с отсутствием достоверных значений во время облачности. Также отмечаются трудности моделирования и сложные взаимосвязи между приземными и атмосферными концентрациями, особенно при экстремальных увеличениях концентраций загрязняющих веществ.

Из всех факторов, указывающих на физические характеристики аэрозолей, оптическая глубина аэрозоля (AOD, мера столбчатого поглощения солнечной радиации аэрозолями) является важным оптическим параметром при оценке их концентрации, уровня загрязнения атмосферы и оценке воздействия аэрозолей на климат. AOD может быть определена двумя методами: наземным мониторингом и с помощью спутниковых снимков. Наземное определение включает прямые измерения с использованием различных приборов, таких как многофилтратационный вращающийся теневой радиометр (MFRSR), спектрометрический прибор Lambda Instruments Corporation (LICOR), солнечный фотометр Microtops, актинометры Линке-Фойсснера и системы обнаружения света и определения дальности (ЛИДАР). Тем не менее солнечный фотометр Cienciae Investigación Medica Estudiantil Latinoamericana (CIMEL) является наиболее часто используемым инструментом для характеристики встроенного в колонку AOD. Этот метод способен давать точные показания аэрозоля, но ограничен доступностью данных только в определенных фиксированных положениях. Такие

точечные данные не позволяют получить подробную картину пространственно-временного распределения аэрозоля. Для сравнения, спутниковый метод дистанционного зондирования способен генерировать результаты на обширной территории в режиме реального времени. Полученные результаты могут периодически обновляться за относительно короткий промежуток времени. Такие преимущества делают этот метод жизненно важным дополнением к наземным измерениям, позволяющим эффективно и быстро собирать точную информацию об аэрозолях.

За последние годы было получено большое количество достижений в получении AOD по спутниковым снимкам, при этом были разработаны многие виды алгоритмов поиска, такие как методы темной цели, структурно-функциональный [130, 131], измерения поляризации [132], многоугловой метод [133] и алгоритм deer blue [134]. Общим для всех этих методов является сложный процесс поиска, но каждый из них имеет свою особую применимость. Например, метод темных объектов более точен в районах с густым растительным покровом. Метод структурной функции требует получения информации на четком фоне, и точность ее получения выше на участках со светлой поверхностью земли.

В дистанционном зондировании индексация характеристик была довольно простым, но высокоэффективным методом извлечения информации из изображений, поскольку интересующий наземный объект, вероятно, будет демонстрировать разные спектральные характеристики в разных диапазонах волн. Например, отличительные коэффициенты отражения и поглощения растительности, воды и населенных пунктов на разных длинах волн использовались для получения нормированного разностного индекса растительности (NDVI), который способен эффективно отражать распределение растительности [135], нормализованного разностного индекса воды (NDWI), который указывает на распределение воды [136], и нормализованного разностного накопительного индекса (NDBI), указывающего на распределение населенных

пунктов и бесплодных земель [137]. В основе построения этих индексов лежит принцип определения наиболее чувствительных и нечувствительных спектральных диапазонов среди всех доступных мультиспектральных диапазонов [138]. Из этих двух диапазонов наиболее чувствительный рассматривается как числитель, а наиболее нечувствительный – как знаменатель. Соотношение двух полос искусственно увеличивает спектральное различие между всеми наземными объектами. Следовательно, информация об интересующей цели максимально расширяется на вновь полученном индексном изображении, в то время как информация о других фоновых объектах на том же изображении одновременно подавляется.

Видимая отражательная способность, зафиксированная на спутниковых снимках, зависит как от поверхности, так и от состава атмосферы. Таким образом, можно определить физические и химические свойства аэрозолей по изменению видимой отражательной способности, вызванному обратным рассеянием аэрозоля. Таким образом, после получения разностного вегетационного индекса (DVI) возможно оценить взаимосвязь между DVI и PM_{10} , чтобы последние можно было количественно извлечь из первых с помощью установленного соотношения [139].

1.3.4 Использование реанализов и математических моделей

Использование данных реанализа нашло широкое применение в науках об атмосфере для оценки пространственного распределения примесей и прочих метеорологических параметров в атмосфере. С помощью данных повторного анализа возможно определять временные и пространственные изменения в оптической толще атмосферы, содержании черного углерода, угарного газа, аэрозольных частиц, озона, других малых газовых примесей и интегрального качества воздуха с высокой степенью достоверности во многих регионах мира. Ключевыми достоинствами реанализа являются: наличие длительных массивов данных, с временным разрешением до 1 часа, покрытие широкой области, в том

числе с высоким горизонтальным разрешением, и свободный доступ ко многим из них. К недостаткам реанализов относят: высокую ошибку при эпизодах экстремального загрязнения атмосферы, особенно в сравнении с некоторыми спутниками, отсутствие валидации с реальными данными наземных наблюдений в слаборазвитых регионах [140]. Наиболее часто применяются реанализы MERRA-2 [141] и ERA 5 [142].

В сравнении с выше представленными методами, исследование химического состава снегового покрова является более трудозатратным методом анализа пространственного распределения атмосферных примесей, но предоставляющим достоверную эмпирическую информацию об уровне и особенностях химического загрязнения в период устойчивого снежного покрова [143, 144, 145]. Обработка полученных в ходе химического анализа данных с помощью геоинформационных технологий позволяет привести данные в удобный для интерпретации вид и провести оценки загрязнения и контроля экологических рисков на большой площади, в том числе на участках, где не проводился отбор проб ввиду труднодоступности мест или невозможности отбора проб на территории промышленных объектов.

1.4 Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферы

1.4.1 Макромасштаб

Макромасштаб рассматривает погодные явления диаметром более 1000 км и со временем жизни от несколько дней до недель [146]. К таким структурам относятся фронты, циклоны и антициклоны. Одним из распространенных методов оценки региональных особенностей циркуляции атмосферы данного масштаба является анализ синоптических карт погоды [147, 148]. Определение повторяемости воздействия различных барических систем полезно при выявлении условий, способствующих накоплению примесей, или, наоборот, условий, при

которых происходит более активное самоочищение атмосферы. Неблагоприятные для рассеивания примесей условия чаще связаны с антициклонами (застойные явления, туманы). Наиболее благоприятные условия для рассеивания создаются при активной циклонической деятельности, что связано с интенсивным выпадением осадков и более высокими скоростями ветра [149, 150]. Выделение и систематизация синоптических систем позволяет выявить наиболее напряженные периоды и количественно оценить их повторяемость для определенной территории.

1.4.2 Мезометеорологический масштаб

Мезометеорологический масштаб соответствует атмосферным структурам с приблизительными линейными размерами от 10 до 1000 км, которые длятся от нескольких часов до нескольких дней [151]. Мезомасштабные циркуляции вызываются неоднородностями подстилающей поверхности двух видов. Первый вид неоднородности – это орографическая неоднородность (рельеф). Ею обусловлены, в частности, склоновые и горно-долинные ветра, фены. Второй вид неоднородности – термическая. Она обусловлена различием радиационных, теплофизических (коэффициент теплопроводности, теплоемкость) и аэродинамических характеристик между подстилающими поверхностями. Эти различия вызывают разную скорость нагревания и охлаждения поверхностей в суточном ходе и, следовательно, разную суточную амплитуду температуры поверхности. Разность температуры между соседними участками вызывает неоднородный нагрев приземного слоя атмосферы, что инициирует развитие мезомасштабных циркуляций. Одними из наиболее интересных примеров мезомасштабных циркуляций, с точки зрения загрязнения атмосферы, являются бризовые и долинные циркуляции, а также мезомасштабные струйные течения низкого уровня.

1.5 Постановка задач исследования

На основе выполненного автором анализа проблем загрязнения окружающей среды аэрозольными и малыми газовыми примесями в работе в качестве основного объекта исследования выбрана атмосфера Южного Прибайкалья. Основной целью настоящей работы стало изучение и оценка содержания аэрозольных и малых газовых примесей в различных временных масштабах: суточный, сезонный, годовой, выявление связей с метеорологическими параметрами различных масштабов и оценка возможных изменений состояния атмосферы над акваторией Южного Байкала. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

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

2) Выявить влияние различных синоптических ситуаций, мезо- и микрометеорологических особенностей в атмосфере над Южным Байкалом на процессы переноса и рассеивания малых газовых и аэрозоля примесей;

3) На основе данных многолетних натурных наблюдений, с применением методов статистической обработки и математического моделирования, оценить влияние экстремальных природных явлений и антропогенных выбросов на концентрации малых газовых и аэрозольных примесей в Южном Прибайкалье;

Поскольку рассматриваемая проблема является сложной и носит ярко выраженный междисциплинарный характер, целесообразно решать поставленные задачи на основе системного подхода. Получить численные оценки концентраций аэрозольных и малых газовых примесей в «контрольных» точках рассматриваемой территории стало возможно только на основе совместного анализа натурных измерений и теоретических исследований.

2 РАЗВИТИЕ И АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОПОРНЫХ СТАНЦИЯХ МОНИТОРИНГА В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

2.1 Общая схема исследования

В работе представлен современный комплексный методический подход, направленный на создание оптимизированной сети мониторинга и проведения многофакторной оценки состояния атмосферы. Подход базируется на совместном использовании натурных наблюдений: анализ содержания аэрозольных и газовых примесей с высоким временным разрешением, а также химического состава твердых и жидких атмосферных выпадений, с последующей математической обработкой данных. Схема методического подхода в общем виде представлена на рисунке 2.1.

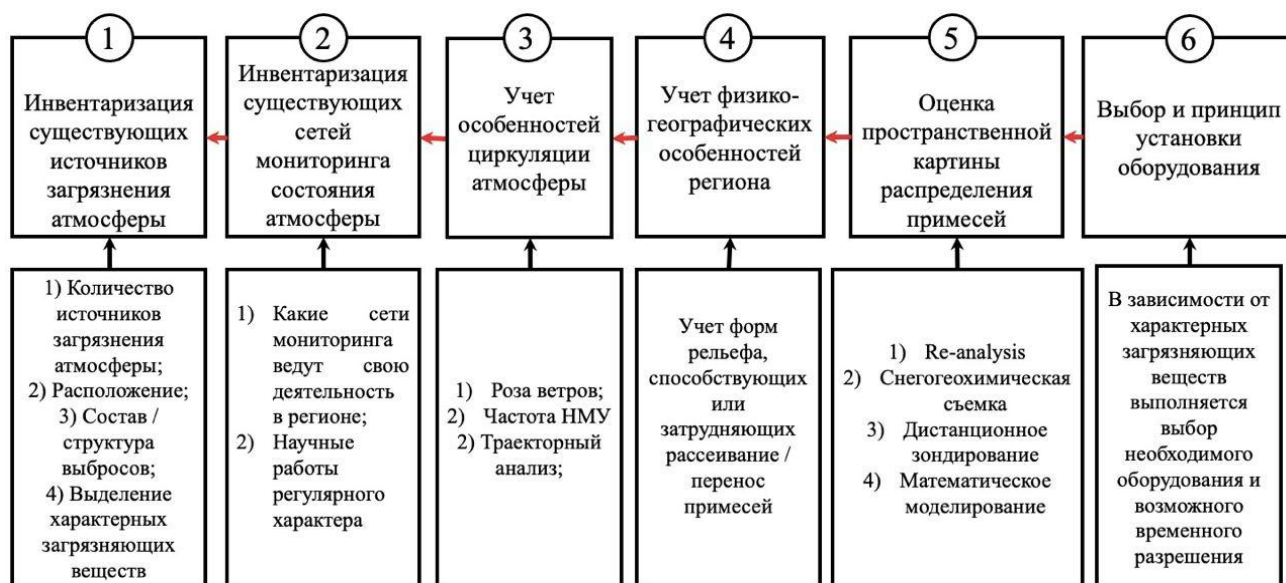


Рисунок 2.1 – Схема методического подхода оптимизированной сети мониторинга и проведения многофакторной оценки состояния атмосферы Южного Прибайкалья и ЦЭЗ Южного Байкала

2.2 Анализ источников

Первым шагом, необходимым для создания сети мониторинга и последующей оценки состояния атмосферы, является определение и упорядочивание существующих источников загрязнения. В данном пункте необходимо определить местоположение источников, их происхождение, организованность, подвижность, пространственные, физические особенности, режим деятельности, объем и структуру состава выбросов. Это необходимо для дальнейшего определения контролируемых компонентов, проведения расчетов рецепторного моделирования, оценки циркуляционных особенностей в атмосфере и установки новых станций наблюдения на доминирующий, либо специфичный источник загрязнения атмосферы в Байкальском регионе. Обобщенная схема классификации источников загрязнения атмосферы представлена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Схема классификации источников загрязнения атмосферы [152, 153]

2.3 Анализ сетей мониторинга

После оценки источников загрязнения атмосферы необходимо провести анализ сетей мониторинга состояния атмосферы, уже ведущих свою деятельность в регионе исследования. Согласно [154], регулярные измерения уровней

загрязнения атмосферного воздуха на территории Российской Федерации проводятся в 223 городах. Из них регулярные измерения проводятся на 624 станциях государственного мониторинга. Контролируются концентрации от 4 до 60 компонентов, в том числе с использованием автоматических методов мониторинга. Учитывая, что большинство постов наблюдения располагается в крупных населенных пунктах, жилых, промышленных районах и вблизи крупных автомагистралей, сведения, получаемые с этих станций, могут быть применимы для оценки экологического состояния атмосферы вблизи от источников загрязнения, однако недостаточны для понимания роли трансграничного и регионального переноса примесей на природные экосистемы. Частично эта проблема решается за счет наблюдений на станциях фоновых мониторинга российских и международных программ, осуществляющих свою деятельность на территории России: EMEP (The European Monitoring and Evaluation Program), EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia), ICP IM (International Co-operative Program on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems), GMOS (Global Mercury Observation System) [155] и отдельные подразделения Всемирной метеорологической организации (Global Atmosphere Watch). Однако на территории России расположено менее двух десятков подобных станций, в основном в европейской части страны. Общая схема, где указано месторасположение станций фоновых мониторинга и международных постов наблюдения, представлена в работе С. А. Громова с соавторами [156].

В дополнение к измерениям метеорологических параметров и экологических характеристик в приземном слое атмосферы на 114 станциях радиозондирования в Российской Федерации ведутся аэрологические измерения вертикальных профилей температуры, давления, влажности воздуха, скорости и направления ветра от земной поверхности до высот 28–30 км [157]. Данные исследования могут быть полезны при учете особенностей циркуляции атмосферы на отдельных территориях, направления переноса воздушных масс на различных высотах, в том числе на высотах подъема факела и выявления условий,

затрудняющих рассеивание примесей, например, температурных инверсий или штилей.

Помимо государственных сетей мониторинга существенный вклад в оценку состояния атмосферы вносят работы научно-исследовательских институтов, описывающие пространственно-временную картину распределения примесей, как в городских условиях, так и в удаленных, труднодоступных районах, что может быть полезным при выполнении оценки пространственной картины распределения примесей. Таким образом, предварительный анализ существующих станций наблюдения и проведенных ранее работ позволяет определить фоновые и характерные для региона концентрации примесей, а также выявить «белые пятна» в расположении существующей сети наблюдения [158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178].

2.4 Учет особенностей циркуляции атмосферы

После проведения анализа источников загрязнения (пункт 2.1) необходимо оценить особенности циркуляции атмосферы и пространственно-временную картину переноса воздушных масс в регионе исследования. Для данной задачи широко применяется комплексное использование траекторного анализа, ГИС-технологии и рецепторного моделирования [179, 180, 181, 182, 183]. В качестве траекторных моделей возможно использовать модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), разработанную NOAA и находящуюся в открытом доступе [184]. Аналогичные функции также имеют другие модели, например, FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model) [185] или METEX (METEOrological data Explorer) [186]. Генерация и совместный анализ множества прямых и обратных траекторий перемещения воздушных масс, при известных источниках либо при измеренных концентрациях в точке-реципиенте, позволяет с высокой степенью достоверности оценить вклад фактора циркуляции, определения атмосферных коридоров, по которым осуществляется

основной воздушный поток загрязненных воздушных масс, и оценить временную изменчивость этого фактора для конкретных территорий.

Помимо учета мезомасштабных метеорологических особенностей, при выборе местоположения станции наблюдения необходимо провести анализ метеорологических условий непосредственно в точке наблюдения. Особое внимание необходимо уделить исследованию спектра скорости ветра, розе ветров, особенностям температурной стратификации пограничного слоя атмосферы, повторяемости атмосферных осадков, туманов.

2.5 Учет физико-географических особенностей

Как было описано выше, одним из параметров, влияющих на распространение примесей, являются мезомасштабные процессы переноса и вертикальные перемешивания воздушных масс, во многом зависящие от неоднородностей подстилающей поверхности и пространственного распределения крупных водных объектов [187]. Для выбора мест размещения постов наблюдения за качеством атмосферного воздуха необходимо детальное исследование орографических, аэрографических и теплофизических свойств исследуемой территории.

Учет орографических особенностей местности сводится к нахождению наиболее благоприятной для наблюдения точки. Она должна располагаться на хорошо проветриваемом участке местности, который не подвергается воздействию отдельно стоящих зданий или локальных источников выбросов. Очевидно, станция не должна быть расположена в отрицательных формах рельефа, поскольку воздух в них застаивается, что приводит к накоплению примесей вблизи подстилающей поверхности и искажению результатов наблюдения (особенно от низких источников выбросов).

2.6 Оценка пространственной картины распределения примесей

Для подтверждения проведенной выше работы, направленной на выбор наиболее подходящих мест расположения постов наблюдения, следует провести оценку пространственного распределения примесей в регионе исследования. Для решения этой задачи применяются:

- а) методы дистанционного зондирования;
- б) данные реанализов;
- в) геостатистическая обработка результатов натурных исследований (например снегогеохимической съемки, данных мониторинга содержания газовых и аэрозольных примесей на существующих станциях);
- г) математическое моделирование и нейросети.

2.7 Выбор и принцип установки оборудования

В настоящее время наземный мониторинг состояния атмосферы проводят с использованием двух широко применяемых методов отбора проб: пассивного – седиментация и активного – импакция и фильтрация с применением пробоотборников.

К основным преимуществам активного метода относятся: хорошая точность качественных и количественных результатов, а также высокое временное разрешение, позволяющее получать информацию о кратковременных пиках и случайных ситуациях точечного воздействия. Однако высокоточное измерительное оборудование обладает жесткими требованиями к условиям размещения, обслуживающему персоналу, а также является дорогостоящим.

Использование пассивных методов пробоотбора, в сравнении с активными, имеет ряд преимуществ: они проще и удобнее в обращении; низкая стоимость позволяет проводить измерения в нескольких точках одновременно. Поскольку пассивный отбор проб воздуха предоставляет информацию о долгосрочном загрязнении атмосферы выбранного участка, его можно использовать в качестве метода скрининга для полуколичественного сравнения, с преимуществом низкой

чувствительности к случайным кратковременным изменениям концентрации загрязняющих веществ [188, 189, 190].

В последнее время активно развивается метод, объединяющий в себе низкую стоимость и возможность вести мониторинг различных атмосферных параметров в режиме on-line: использование low-cost сенсоров [191, 192, 193, 194]. Проведенные исследования по сличению результатов измерений low-cost сенсоров и эталонных приборов показали, что наиболее высокий уровень сходимости результатов отмечен при измерении концентрации аэрозольных частиц [195, 196]. Увеличение плотности станций мониторинга РМ за счет low-cost сенсоров имеет хорошие перспективы и уже применяется во многих регионах мира [197, 198, 199, 200, 201]. Это стало возможным благодаря простоте установки и эксплуатации, в сравнении с профессиональным оборудованием, меньшему потреблению энергии, низкой стоимости приборов. Это позволяет одновременно установить большое количество low-cost сенсоров, в том числе и в удаленных, труднодоступных районах [202, 203, 204].

Несмотря на преимущества устройств, описанные выше, low-cost сенсоры имеют важные недостатки, которые ограничивают их потенциал и должны быть учтены при широкомасштабном использовании. К недостаткам относятся: сильная зависимость от параметров окружающей среды – в первую очередь, влажности и температуры; невозможность измерить непосредственно массовую концентрацию РМ; отсутствие чувствительности к частицам с аэродинамическим диаметром менее 0,3 мкм; различная реакция на частицы в зависимости от их состава [205]. Однако, использование low-cost сенсоров вполне подходит для расширения сетей мониторинга качества воздуха, предоставляя данные худшего качества, чем эталонные приборы, но, за счет высокого пространственно-временного разрешения, упрощающее поиск наиболее напряженных точек, выявление источников загрязнения атмосферы и паттерн загрязнения атмосферы [206, 207, 208].

2.8 Применение предложенной методики адаптации автоматического мониторинга газовых и аэрозольных примесей на примере южной части Центральной Экологической зоны озера Байкал

2.8.1 Анализ источников загрязнения атмосферы в Байкальском регионе

Иркутская область является одним из наиболее развитых, с промышленной точки зрения, субъектов Российской Федерации. В 2022 году объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от антропогенных источников Иркутской области составил 739 тыс. тонн. Практически половина от этого (290 тыс. тонн) поступила в атмосферу от предприятий, сгруппированных на сравнительно небольшой территории в долине реки Ангары – Иркутско-Черемховского промышленного узла. Это втрое больше, чем объем выбросов антропогенных источников Республики Бурятия (107 тыс. тонн/год), и в 12 раз больше, чем поступает от антропогенных источников, расположенных вблизи озера. Непосредственно на территории ЦЭЗ озера 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 [209]. Наибольшее количество котельных сгруппировано на юге – в Слюдянском (25 объектов) и Кабанском районах (20 объектов) [210]. (Рисунок 2.3)

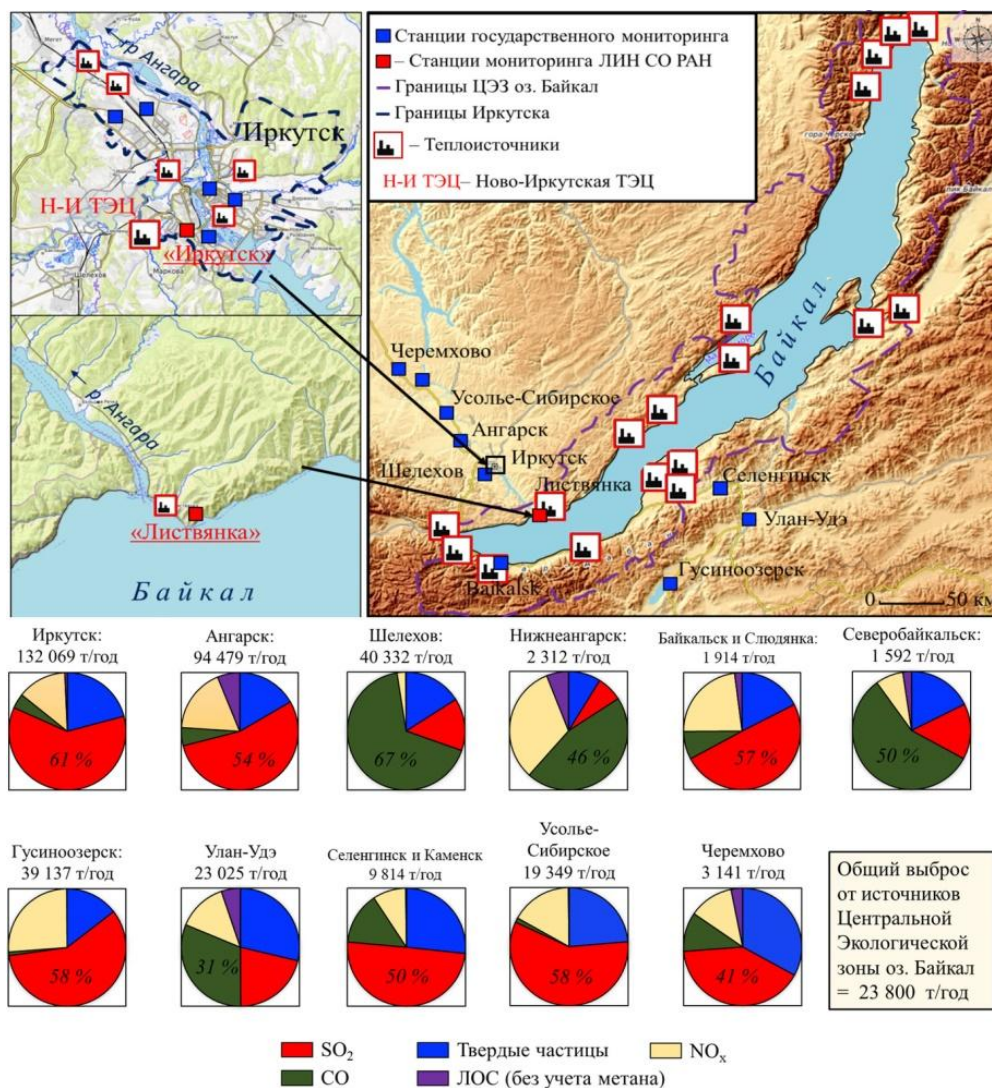


Рисунок 2.3 – Расположение стационарных источников загрязнения и станций мониторинга состояния атмосферы, расположенных в Центральной экологической зоне озера Байкал и городах-источниках загрязнения Байкальского региона [211, 212]

Учитывая разницу в объеме выбросов, важно изучить роль не только локальных источников, но и крупных внешних источников в загрязнении атмосферы в ЦЭЗ озера Байкал и оценить возможные риски их воздействия на прибрежные экосистемы и озеро. Так, в г. Иркутске располагаются предприятия более чем 25 отраслей промышленности, в том числе авиастроение, машиностроение и металлообработка, энергетическая, лесная, деревообрабатывающая и строительная промышленность. На территории города

находится одна крупная ТЭЦ (Ново-Иркутская), более 100 котельных, работающих на органическом топливе (из них 30 коммунальных, 56 промышленных и 69 малых), а также 40 электростанций [213]. По состоянию на 2022 год предприятия города выбрасывают в атмосферу более 132 тыс. тонн/год, 61 % из которых – диоксид серы, 21 % – твердые вещества.

На втором месте по объему выбросов в Южном Прибайкалье стоит г. Ангарск, в котором располагаются предприятия энергетической, топливной, химической и нефтехимической промышленности, машиностроения и металлообработки, пищевой индустрии, а также предприятия строительного сектора. Наиболее значимыми для города предприятиями являются Ангарская нефтехимическая компания, азотно-туковый завод, завод полимеров, завод катализаторов и органического синтеза и цементно-горный комбинат. Данные предприятия, как и крупные объекты теплоэнергетики, сгруппированы, в основном, в промышленной зоне, вытянутой на 30 км вдоль Ангары. В городе расположены три котельные и три теплоэлектростанции: ТЭЦ-9, Участок № 1 ТЭЦ-9 и ТЭЦ-10 [214]. Суммарный выброс от города в 2022 г. составил 94 тыс. тонн, из которых 51 тыс. тонн – диоксид серы и 16 тыс. тонн – твердые вещества.

На третьем месте по объему выбросов в Иркутско-Черемховском промышленном узле стоит г. Шелехов. В отличие от других городов промышленного узла, 67 % от объема выбросов города составляет оксид углерода. Это отражается и в промышленной специализации города, ведущую роль в которой занимает цветная металлургия. Она представлена работой трех алюминиевых заводов: «РУСАЛ ИркАЗ», «СУАЛ-ПМ» и «Кремний». В меньшей степени промышленность Шелехова представлена машиностроением, металлообработкой, теплоэнергетической и строительной отраслями. В общей сложности в 2022 г. в атмосферу региона поступило более 40 тыс. тонн выбросов от предприятий, размещенных в городе (Рисунок 2.3).

На территории Республики Бурятия, входящей в Байкальскую природную территорию, расположены предприятия теплоэнергетики, целлюлозно-бумажной,

пищевой, авиационной, лесной промышленности, металлообработки, машиностроения и объектов производства строительных материалов. В регионе расположена крупнейшая в Забайкалье электростанция – Гусиноозерская ГРЭС, являющаяся градообразующим предприятием. Объем выброса от г. Гусиноозерск в 2022 году составил 39 тыс. тонн, из них 58 % составляет диоксид серы, 26 % – оксиды азота и 15 % – твердые вещества. Наибольшее количество предприятий региона, несмотря на меньший объем выбросов, сгруппированы в г. Улан-Удэ (Рисунок 2.4). Крупнейшими из них являются: «Улан-Удэнский авиационный завод», «Улан-Удэстальмост», ТЭЦ-1, ТЭЦ-2. Суммарный годовой выброс от источников Улан-Удэ составляет 23 тыс. тонн/год, из которых 60 % – оксиды углерода и твердые вещества. Доля диоксида серы в объеме выбросов в Улан-Удэ значительно меньше, чем в городах Иркутской агломерации и Гусиноозерске, где существенную роль в структуре промышленности занимают предприятия топливно-энергетического комплекса [215].

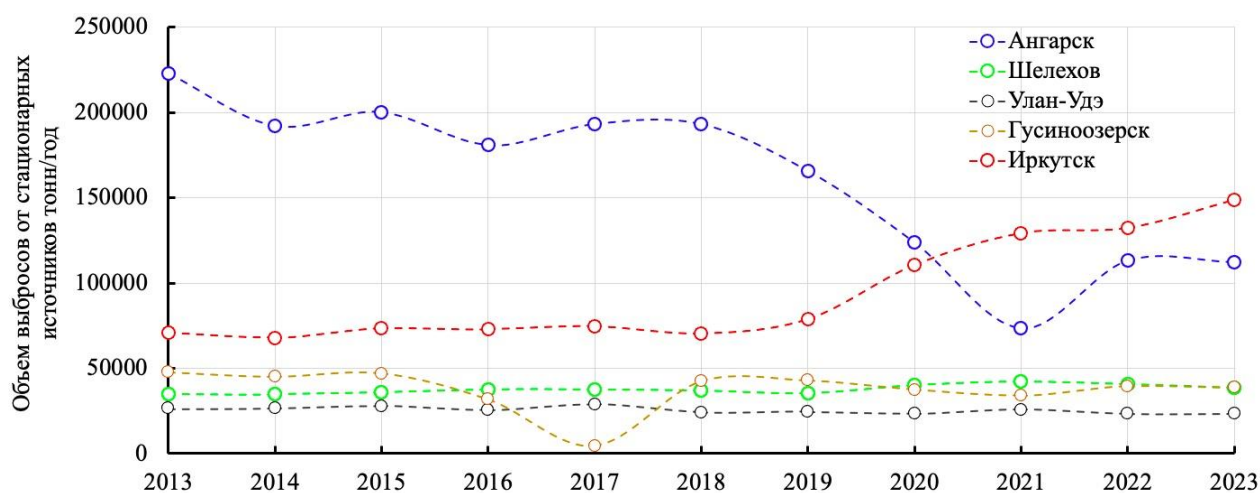


Рисунок 2.4 – Объем выбросов от стационарных источников в городах Южного Прибайкалья за период с 2013 по 2023 гг.

По общему объему выбросов загрязняющих веществ Иркутская область занимает третье место в Сибирском федеральном округе. В 2023 г. суммарный объем выбросов от стационарных источников составил 730 тыс. тонн. Для сравнения, интегральный объем выбросов в соседних регионах составил: 2440

тыс. тонн – в Красноярском крае (759 тыс. тонн без учета г. Норильск): 102 тыс. тонн – в республике Бурятия и 9,2 тыс. тонн – в республике Тыва. Несмотря на существенный объем выбросов (в особенности от источников, расположенных к западу от исследуемой территории), вклад трансграничного переноса – незначителен ввиду удаления ($\sim 800\text{--}1000$ км). Зафиксировать влияние трансграничного переноса загрязняющих примесей на состояние атмосферы в ЦЭЗ Южного Байкала возможно только в периоды экстремальных природных явлений (лесные пожары в Красноярском крае, Якутии) либо путем анализа химического состава атмосферных осадков.

2.8.2 Анализ существующей сети наблюдения в Байкальском регионе

На данный момент в Байкальском регионе система государственного мониторинга атмосферы, отвечающая современным требованиям, насчитывает 24 станции автоматического мониторинга за состоянием атмосферы (по данным https://www.feerc.ru/baikal/ru/monitoring/air/ask_overall). Посты данной сети в основном расположены в крупных городах-источниках (Иркутск, Ангарск, Шелехов, Байкальск, Селенгинск, Улан-Удэ, Гусиноозерск, Черемхово, Саянск). Контроль загрязнения в удаленных сельских и фоновых районах, подверженных влиянию атмосферного загрязнения, не проводится.

Помимо государственного мониторинга значительные усилия в изучении атмосферы над Байкалом предпринимаются и научными организациями. Так, исследовано содержание малых газовых примесей (SO_2 , NO , NO_2 , CO , O_3), ионного состава аэрозолей, атмосферных осадков [216], аэрозольных примесей (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1), стойких органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ) [217, 218, 219], черного углерода [220] в том числе в приземном слое атмосферы 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 связано с атмосферным переносом от

крупных угольных электростанций Иркутской области и Бурятии, выбросы от которых достигают акватории [221, 222]. Также 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 [223].

Несмотря на множество проведенных отдельных исследований, регулярные, всесезонные наблюдения в ЦЭЗ озера ведутся только на двух научных станциях: «Листвянка» [224, 225, 226], «Танхой», работающих в том числе и по международной программе ЕАНЕТ [227], и одной станции государственного мониторинга «Байкальск». Расположение станций мониторинга указано на рисунке 2.3.

2.8.3 Учет физико-географических особенностей Южного Прибайкалья

Район исследования расположен в центре Азиатской части России, на юге Восточной Сибири и включает в себя территорию двух субъектов: Иркутскую область и Республику Бурятия. Исследуемая территория представляет собой сильно расчлененный рельеф с узкими водоразделами, пологими склонами и наличием хорошо разработанных речных долин. На северном участке изучаемой территории расположена долина р. Ангара, обрамленная с юго-востока Прибайкальским хребтом, а с юго-запада ступенчатыми поднятиями Восточного Саяна. Долина р. Ангары на участке от г. Иркутск до истока широка и асимметрична. Левый склон – крутой и изрезанный короткими и глубокими падами, со слабовыраженными террасами, а правый склон пологий, с ярко выраженными террасами и сильно разработанными падами. Перепад высот между самыми низкими и высокими формами рельефа на изучаемом участке севернее Байкала составляет 600–610 метров.

Южная часть исследуемой территории имеет резко расчлененный рельеф, абсолютные отметки высот колеблются от 456 до 2316 метров над уровнем моря.

Большую часть территории занимает горная система хребта Хамар-Дабан с обширно развитой сетью рек и озер. С северного склона, подходящего к береговой линии, многочисленны выходы скал с каменистыми россыпями. Площадь гор превышает площадь, занимаемую низменностями [228]. Топографическая карта региона представлена на рисунке 2.5.

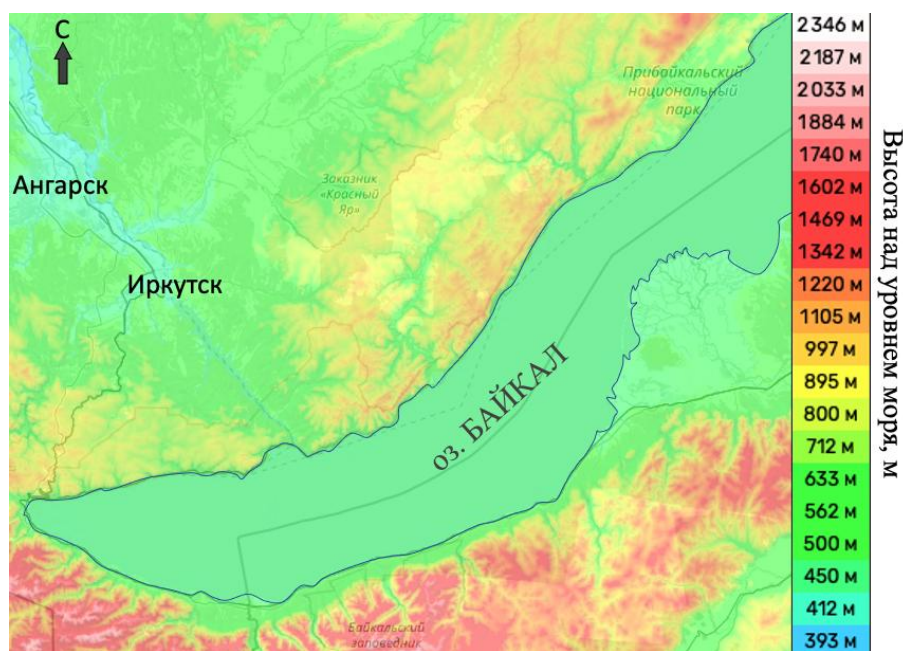


Рисунок 2.5 – Топографическая карта исследуемого региона (<https://ru-topographic-map.com>).

Террасы и склоны речных долин имеют трещинно-полигональный и бугристо-западинный рельеф. Большое разнообразие ландшафтно-геологических условий – от горно-альпийских и горно-таежных до равнинно-таежных, лесостепных и степных полуаридных – создает смену растительности от смешанных и хвойных лесов до лесостепной растительности, что определяет почвообразовательные процессы и формирование различных типов почв. Почвообразующими породами являются рыхлые отложения, они различаются по генезису, составу и свойствам. В почвенном покрове преобладают серые лесные, дерново-подзолистые, дерново-карбонатные, черноземные, луговые, болотные типы почв. Основным растительным покровом являются подгорные сосновые и лиственнично-сосновые бруснично-разнотравные леса в сочетании с богато

разнотравно-злаковыми-луговыми степями. Южное Прибайкалье включает в себя водный бассейн озера Байкал и тесно связанные с ними процессы воздушного и водного массообмена прилегающих районов бассейна реки Ангара. Особенностью Южного Прибайкалья является неравномерное пространственное распределение антропогенного влияния на природную среду – от минимальной степени загрязнения до экологически очень опасной в ряде промышленных зон [229].

Таблица 2.1 – Характеристика почв и растительности в районе исследования [230, 231, 232, 233].

Участки	Почвы	Растительность
Иркутск-Листвянка	Почвы серые, дерново-подзолистые, подбуры оподзоленные	Лиственнично-сосновые леса, березняк, сообщество кустарников
Иркутск – Большое Голоустное	Почвы серые, дерново-подзолистые, подбуры оподзоленные	Лиственнично-сосновые леса, степи
Юго-восточный берег	Подбуры оподзоленные	Пихтово-елово-кедровый лес, березняк
Байкальский заповедник	Мерзлотно-таежные, дерново-литогенные бурые лесные буроземы грубогумусовые	Пихтово-елово-кедровые леса, высокогорные и альпийские луга, сообщество кустарников
Побережье Южной котловины Байкала	Подбуры оподзоленные, буроземы грубодисперсные, криоземы	Лиственнично-сосновые леса, березняки, болотная растительность, пихтово-елово-кедровые леса

2.8.4 Оценка метеорологических особенностей изучаемой территории

Климатические условия изучаемой территории неоднородны и зависят от внутриконтинентального расположения, расчлененности рельефа и особенностей атмосферной циркуляции. Циркуляция атмосферы в регионе характеризуется тем, что сюда практически не поступают морские воздушные массы с Атлантического или Тихого океана. Источником пополнения влаги служит, главным образом, арктический воздух, трансформирующийся над континентом в воздух умеренного пояса [234]. Существенное влияние на атмосферу оказывают наличие крупного водного объекта – озера Байкал и массивного горного хребта Хамар-Дабан, приводящего к возникновению барьерного эффекта. Поэтому климат юго-восточного побережья озера существенно отличается от юго-западного и носит черты муссонности, здесь отсутствуют резкие перепады температур, зима менее морозная и более снежная, а летние месяцы прохладные, с частыми и продолжительными дождями [235].

Вследствие большой изменчивости общей циркуляции атмосферы и конкретных погодных условий как в течение года, так и от года к году, ниже приводятся закономерности климата в рассматриваемом районе по отдельным климатическим сезонам.

Зимой погода на юге Прибайкалья преимущественно определяется влиянием азиатского антициклона, обычно достигающего своего максимального развития в январе в результате циркуляционных факторов и условий радиационного выхолаживания. При этом преобладает ясная морозная погода со значительным количеством безветренных дней, глубокими инверсиями, небольшой влажностью воздуха, а также малым количеством осадков [236]. Однако в начале и конце зимы имеют место потепления, обусловленные влиянием циклонов, смещающихся из южных и центральных районов Западной Сибири [237].

Весной при повышении температуры воздуха и под влиянием прогрева земной поверхности действие азиатского антициклона ослабевает, а

циклоническая деятельность, напротив, усиливается. Возрастает число циклонов, приходящих с запада и юго-запада, которые часто смещаются группами и приносят с собой теплый воздух из районов Средней Азии и Казахстана. В это время на юге Прибайкалья устанавливается сухая и жаркая погода, но при прохождении заключительных циклонов отмечается ухудшение погоды с сильными ветрами и последующим похолоданием. Отличительной особенностью весенней циркуляции является преобладание трансформированных воздушных масс, поступающих с районов арктических морей [238].

Летом, в противоположность зиме, наблюдается общее понижение атмосферного давления и установление циклонического типа погоды. Первая половина лета обычно бывает засушливая, с большим количеством ясных дней и высокими температурами воздуха, вторая – обильная с осадками. Это связано, во-первых, с возрастанием числа дней с прохождением холодных фронтов через регион и, во-вторых, с активизацией циклонической деятельности над Монголией, что приводит к выходу южных циклонов на юг Прибайкалья.

Осенью, как и летом, преобладающими циркуляционными процессами являются смещения в средних широтах циклонов с запада на восток. В это же время вдоль южных широт происходят смещения антициклонов, что обуславливает малооблачную, сухую погоду со слабыми ветрами на территории Южного Прибайкалья. Эпизоды значительного потепления вызывают циклоны, смещающиеся в регион с Арало-Каспийского бассейна. Осеннее снижение положительных значений радиационного баланса и интенсивное охлаждение материка приводит к изменениям характера циркуляции атмосферы. Во второй половине осени возрастает повторяемость меридиональной северной циркуляции в сочетании со стационарным положением, характеризующим процессы с вторжением арктических масс [239, 240].

Температурный режим

На рисунке 2.6 продемонстрированы особенности температурного режима атмосферы изучаемого региона и мест расположения крупных источников

загрязнения атмосферы. Анализ проведен на основе данных за период с 1966 по 2022 гг. Как показано, среднегодовая температура воздуха в регионе имеет положительное значение на станциях Иркутск ($0,8^{\circ}\text{C}$), Бабушкин ($0,5^{\circ}\text{C}$) и Голоустное ($0,2^{\circ}\text{C}$). На остальных станциях (Улан-Удэ, Хамар-Дабан) среднегодовые температуры имеют отрицательные значения, изменяясь в пределах от $-0,2^{\circ}\text{C}$ до $-3,2^{\circ}\text{C}$ [241]. Наиболее холодным месяцем в регионе является январь (средняя температура от -15 до -27°C). Следует отметить, что на станциях, расположенных на восточном побережье озера, минимальная температура наблюдается в феврале. Также разница в температуре наблюдается между прибрежными и внутриконтинентальными метеостанциями. Среднемесячная температура января в прибрежной зоне колеблется от $-15,3^{\circ}\text{C}$ до $-21,7^{\circ}\text{C}$, в то время как на внутриконтинентальных станциях Иркутск и Улан-Удэ она составляет $-17,9^{\circ}\text{C}$ и $-23,4^{\circ}\text{C}$, соответственно. В июле температура на побережье изменяется от $+12^{\circ}\text{C}$ до $+16,6^{\circ}\text{C}$, а на внутриконтинентальных станциях от $+18,3^{\circ}\text{C}$ до $+19,8^{\circ}\text{C}$. Это связано с обогревающим влиянием крупной водной массы озера Байкал в холодный период и охлаждающим эффектом озера в теплый. В результате в прибрежной полосе озера температура осенью всегда выше, чем во внутриконтинентальных районах. В весенний период происходит обратное явление: холодная вода прогревается долго, и температура в прибрежной зоне озера остается ниже, чем во внутренних районах за хребтами. Влияние Байкала на прибрежные районы распространяется на расстояние до 1,5–2 км от озера, по долинам рек до 35–50 км [242]. Также влияние водной массы на нижние слои атмосферы ведет летом к образованию инверсий температуры на высотах до 500 м над поверхностью озера. Осенью инверсии сменяются неустойчивой стратификацией, а влияние озера распространяется до высоты 2,5 км [243].

Значительное влияние на образование и распределение осадков на рассматриваемой территории оказывает рельеф, сложность и разнообразие высот которого приводят к тому, что осадки здесь распределяются крайне

неравномерно, от 200 мм/год на западном побережье до 1400 мм/год на склонах Хамар-Дабана. Осадки, выпадающие на акваторию самого озера, составляют от 200 до 500 мм в год [244]. Преобладающая часть осадков (от 70–80 % на склонах прибрежных гор и до 80–90 % на побережье и зеркале озера) выпадает в период с апреля по октябрь с максимумом в июле (до 30 % от годовой величины) (Рисунок 2.6).

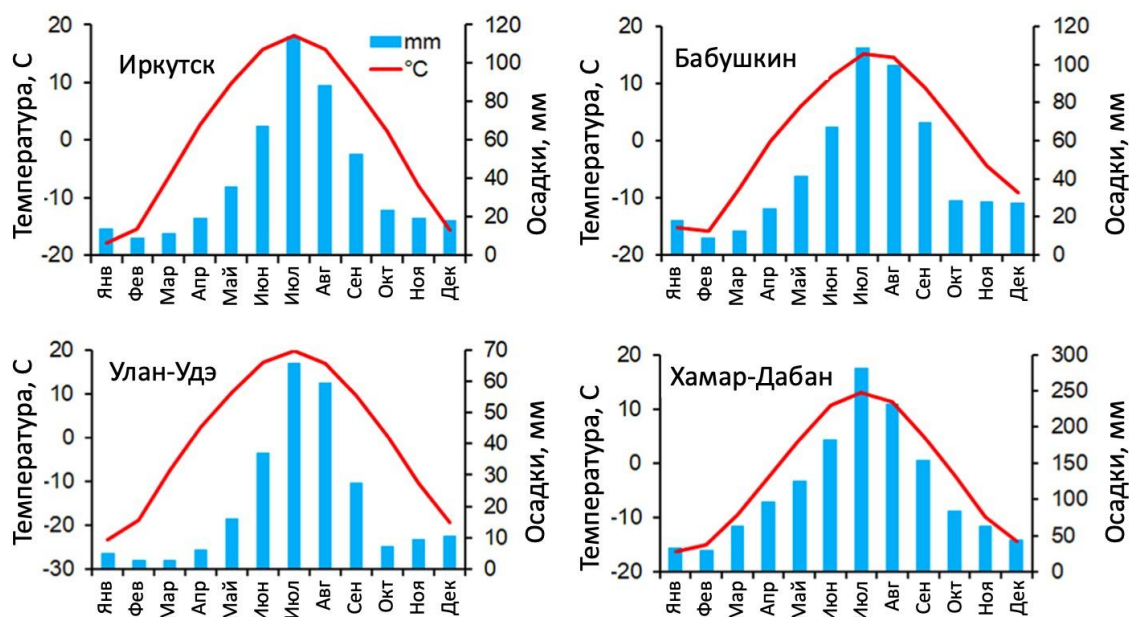


Рисунок 2.6 – Внутригодовое распределение средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков [246]

Ветровой режим

Характер ветрового режима региона определяется особенностями общей циркуляции атмосферы. В холодный период года, когда над большей частью Восточной Сибири устанавливается область высокого давления, в нижнем 500-метровом слое атмосферы преобладают слабые ветра. По мере разрушения антициклона изменяется и характер погодных условий. Летом, ввиду развития циклонической деятельности, скорости ветра резко увеличиваются. В более высоких слоях атмосферы наблюдается обратная картина: минимальные скорости ветра регистрируются в июле, а максимальные – в ноябре и декабре [245]. Несмотря на то, что преобладающим направлением переноса воздушных масс в

регионе является северо-западный ветер (в среднем 60–70 % в году) [246], направление ветра в приземном слое атмосферы определяется орографическими особенностями. Так, в пределах Иркутско-Черемховского промышленного узла, где долина р. Ангары ориентирована с северо-запада на юго-восток, повторяемость ветров этих направлений наибольшая (Рисунок 2.5 а). Наглядное представление о распределении повторяемости ветра по направлениям дают розы ветров, длина лучей которых пропорциональна повторяемости ветров различных румбов, а цвет указывает на повторяемость ветров различной силы (Рисунок 2.7). Как видно из рисунка 2.7, на ст. «Иркутск» и «Листвянка» наименьшую повторяемость имеют юго-западные и северо-восточные ветра. Ветра преобладающих направлений встречаются в 10–20 раз чаще, чем ветра наименьшей повторяемости. Поэтому годовая и сезонные розы ветров в Иркутске и Листвянке значительно вытянуты в стороны преобладающих переносов. Роза ветров на ст. «Бабушкин», расположенной на противоположном (юго-восточном) берегу озера, существенно отличается от описанных выше. В первую очередь, за счет повышения повторяемости ветров западного и юго-западного направления – вдоль береговой линии озера, что отражает один из аспектов внутрикотловинной циркуляции воздушных масс. При этом скорости ветра на станциях в течение года изменяются по двум противоположным сценариям: для городской станции характерен максимум в мае-июне, и минимум в зимние месяцы (декабрь-январь). На прибрежных станциях наибольшие скорости ветра зарегистрированы зимой (декабрь-январь), а наименьшие летом (июль-август). Несмотря на незначительное удаление станций друг от друга, ст. «Листвянка» имеет черты морского климата, что связано с тем, что огромные водные массы озера Байкала в летний период прогреваются до глубины 200–250 метров и, как аккумулятор, накапливают большое количество тепла, изменяя и циркуляционные особенности атмосферы в регионе.

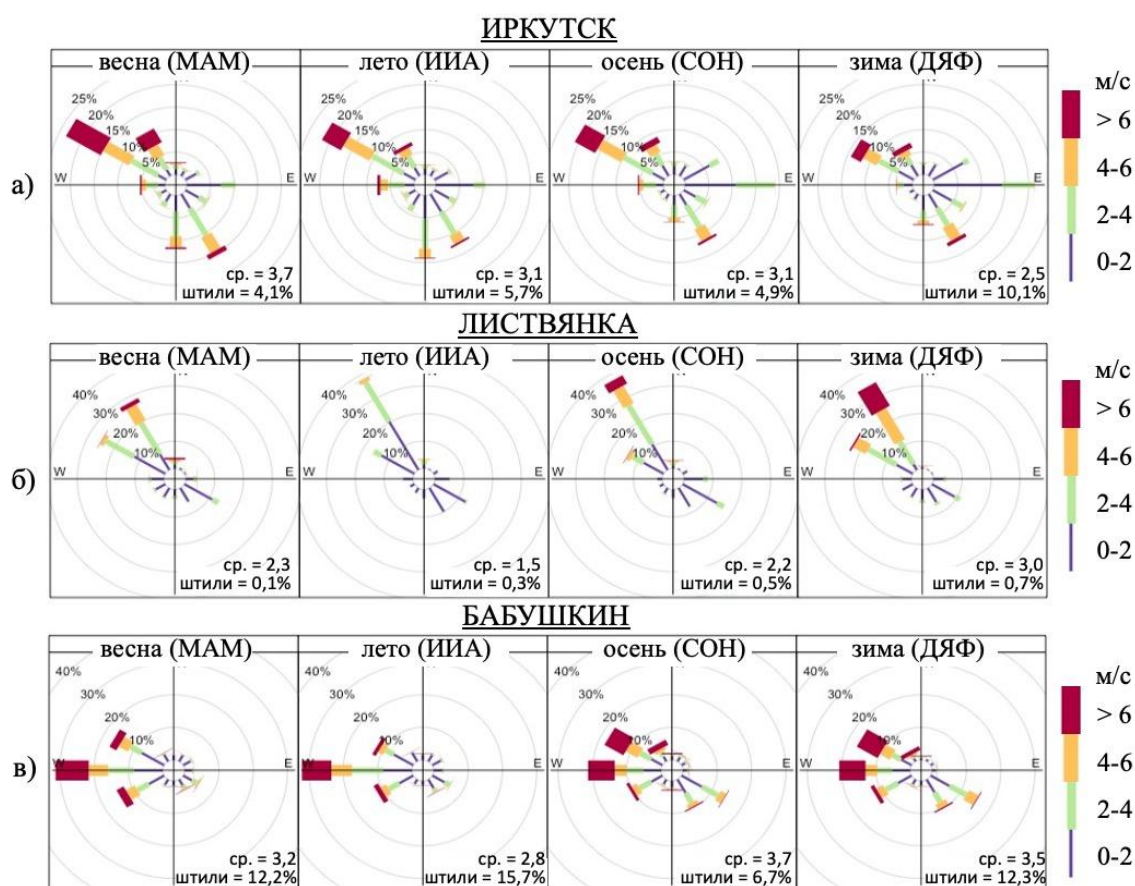


Рисунок 2.7 – Повторяемость (%) ветра различных направлений по отдельным метеорологическим сезонам на станциях: а) «Иркутск»; б) «Листвянка»; в) «Бабушкин» (МАМ – март, апрель, май; ИИА – июнь, июль, август; СОН – сентябрь, октябрь, ноябрь; ДЯФ – декабрь, январь, февраль)

Согласно многочисленным исследованиям, помимо ветрового и температурного режимов на состояние воздушной среды оказывают влияние глубина пограничного слоя атмосферы, степень развития обменных процессов и характер температурной стратификации атмосферы (частота, высота и тип инверсий) [247]. По данным наблюдений, при неблагоприятных метеорологических условиях концентрации загрязняющих веществ могут возрастать более чем в 5 раз по сравнению со средними значениями [248].

Как было сказано выше, в зимние месяцы над территорией Восточной Сибири устанавливается зона высокого давления. На рисунке 2.7 видно, что в зимние месяцы на ст. «Иркутск» отмечается наибольшее число штилевых

ситуаций и случаев со слабым ветром. Наличие над городом острова тепла способствует образованию нескольких инверсионных слоев: приземного в слое атмосферы 0–24 м и приподнятого на высоте ~ 90 –180 м. Суммарная повторяемость инверсий в зимний период в ночные и утренние часы составляет 85–93 %. Наибольшая повторяемость приходится на декабрь–январь. Летом возникновение температурных инверсий свойственно только в ночное время суток [249]. Согласно данным радиозондирования [250], максимальная мощность инверсий в летний период может достигать 2 км, а в зимний более 3 км.

Сильное влияние на изменчивость концентрации аэрозольных и газовых примесей в атмосфере оказывает пространственно-временная динамика пограничного слоя атмосферы. Глубина пограничного слоя атмосферы обладает характерной суточной изменчивостью и тесно связана с нагревом поверхности солнечным излучением. Согласно [251, 252], в зимние месяцы на ст. «Иркутск» и «Листвянка» отмечено уменьшение высоты пограничного слоя атмосферы до 500–700 метров, что в 1,5 раза меньше, чем в переходные сезоны (весна и осень). Более тонкий пограничный слой атмосферы в это время связан с увеличением термической устойчивости нижних слоев, что также ослабляет процессы естественного рассеивания примесей, приводя к повышению концентраций последних [253, 254]. В случаях устойчивой стратификации и больших градиентов температуры в слое инверсии нередко отмечается почти полное затухание процессов турбулентной диффузии. При таких условиях в подынверсионных слоях могут образовываться так называемые струйные течения низкого уровня [255, 256], способствующие быстрому переносу значительных объемов выбросов примесей от источника на существенные расстояния, при этом достигая объекта в слабо рассеянном виде [257, 258]. В летние месяцы толщина пограничного слоя атмосферы возрастает до 900–1100 метров, что приводит к улучшению условий рассеивания примесей в атмосфере региона.

Сезонные особенности турбулентности в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья

На процессы переноса и скорость осаждения примесей в воздухе влияет множество факторов. Среди этих факторов важную роль играет турбулентность. Так, при сильной атмосферной турбулентности из-за усиления вертикального потока тепла, влажности и примесей могут наблюдаться случаи разрушения инверсионных слоев в пограничном слое атмосферы. В ряде работ обсуждались различные характеристики турбулентности в атмосфере Южного Прибайкалья [259, 260]. Ниже описана специфика кинетической турбулентности в районе п. Листвянка (западный берег Южного Байкала) и выявлены сезонные особенности энергетики в 2018 г. Измерения проводились с помощью автоматизированного метеорологического комплекса (АМК-03), установленного на верхней площадке Большого солнечного вакуумного телескопа, ст. «Листвянка». Расчет проводился по соотношению 2.1:

$$E_n = \frac{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2}{2}, \quad 2.1$$

где E_n – удельная кинетическая энергия турбулентного движения, σ^2 – дисперсии компонент вектора скорости по направлениям u , v , w . Средние значения компонент скорости ветра (u , v , w) определялись за трехминутные интервалы времени.

Используя полученные ряды значений E_n , была рассчитана функция вероятности повторяемости для разных сезонов года (Рисунок 2.8). По оси абсцисс отложены значения удельной кинетической энергии турбулентности, а по оси ординат – повторяемость. Анализ распределений показал, что турбулентность в пограничном слое наиболее развита в осенний и зимний сезоны. Осенью и зимой также наблюдается высокая частота событий, когда значение удельной кинетической энергии турбулентности превышает $7 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Средние значения удельной кинетической энергии турбулентности в холодный сезон в 1,6 раза

выше, чем в теплый. Это может быть обусловлено, во-первых, подавлением турбулентности в теплый сезон, связанным с развитием антициклона над озером, во-вторых, преобладанием воздушных масс западного и северо-западного направлений, часто с большими скоростями ветра и, следовательно, высокой энергией.

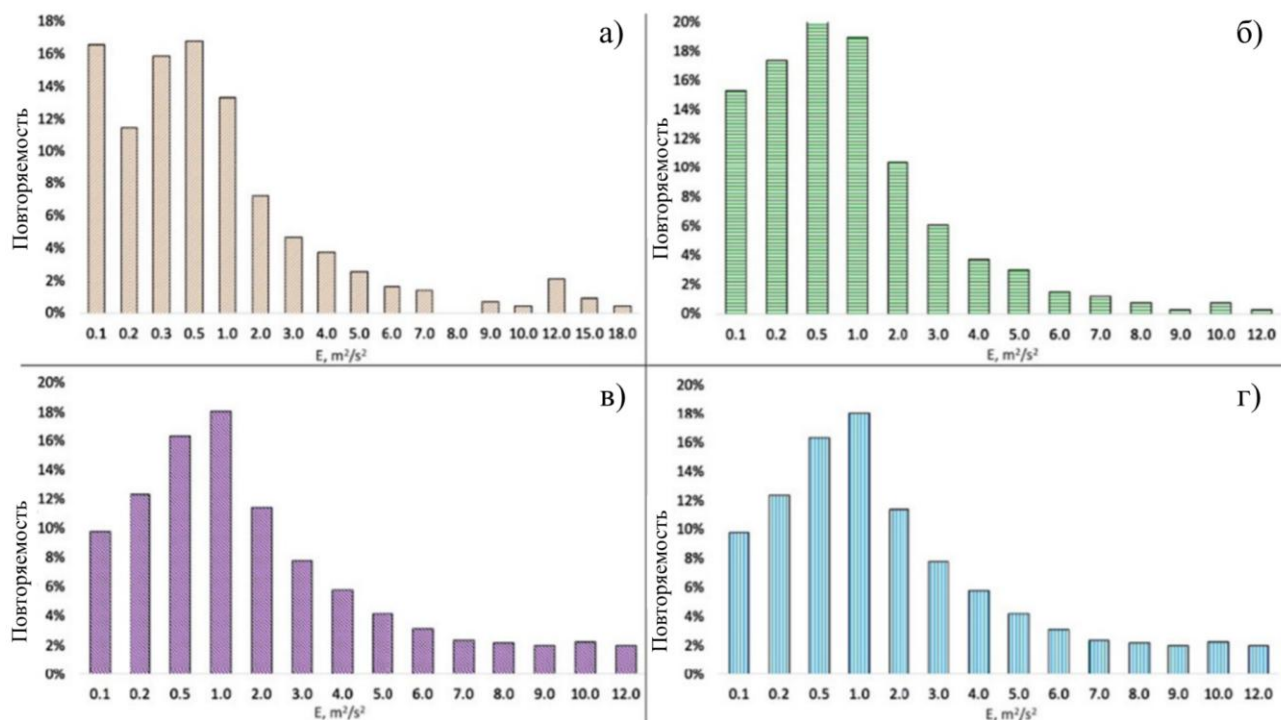


Рисунок 2.8 – Вероятностные функции повторяемости удельной кинетической энергии турбулентности в пограничном слое атмосферы в течение сезона: а) весна; б) лето; в) осень; г) зима.

Полученные распределения позволили численно охарактеризовать энергетическую структуру атмосферных течений в прибрежной зоне озера Байкал в различные сезоны года. Средние значения удельной кинетической энергии турбулентности составляют для лета $1,5 \text{ м}^2/\text{с}^2$, для осени $2,8 \text{ м}^2/\text{с}^2$, для зимы $2,4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, для весны $1,6 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Особенности регионального и трансграничного переноса воздушных масс

Исходя из вышесказанного, была выполнена оценка атмосферной циркуляции и рассеивания примесей в Прибайкалье за 2010–2023 гг. В процессе исследования решались две задачи. Первая – проследить процессы транспорта загрязняющих веществ и определить влияние региональных источников на формирование загрязнения над акваторией Байкала. Для решения данной задачи построены прямые траектории движения воздушных масс от крупных стационарных региональных источников загрязнения атмосферы. Вторая – оценить трансграничный и межрегиональный атмосферный перенос, используя обратные траектории движения воздушных масс.

Для выявления возможности воздействия удаленных источников на состояние воздушного бассейна над озером и определения влияния региональных источников на различные котловины была 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 GDAS, США. Для каждого дня построены обратные и прямые траектории движения воздушных масс. Все траектории моделировались на 00 часов UTC. Продолжительность прямых траекторий была выбрана равной 24 часам. Продолжительность обратных траекторий – 96 часам. Расчеты проводились для шести высотных уровней. Уровни 250, 500 и 800 метров над уровнем земли (AGL) были выбраны для построения прямых траекторий. Первый уровень (250 метров) был выбран как слой, отображающий поведение частицы в приземном слое атмосферы. Вторым (500 метров) и третьим (800 метров) уровни характерны для переноса дымовых шлейфов крупных стационарных источников. В качестве источников были выбраны промышленные города, расположенные на территории Иркутской области (Иркутск, Ангарск, Шелехов) и Республики Бурятия (Улан-Удэ, Селенгинск, Гусиноозерск). Расчеты обратных траекторий выполнялись для высот 1200, 3000 и 5000 метров. В качестве точки-рецептора была выбрана

станция мониторинга, расположенная на западном побережье озера Байкала, по направлению основного переноса – п. Листвянка. Рассчитанные траектории были разделены на шестнадцать типов атмосферного переноса (СЗ; З-СЗ; З; З-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.

Проведенный с помощью модели анализ переноса воздушных масс от основных крупных стационарных источников загрязнения атмосферы, расположенных на Байкальской природной территории, позволил разделить метеорологические ситуации за изучаемый период на пять различных групп влияния регионального переноса на оз. Байкал. При классификации ориентировались на расположение основных промышленных центров региона, на повторяемость различных траекторий, а также на различия в синоптических ситуациях.

Первая группа включает в себя траектории, которые возникают при развитии крупных антициклональных образований, формирующихся над территорией Восточной Сибири. Метеоситуация характеризуется стабильной атмосферой со слабыми потоками северо-западного направления. Основной перенос примесей на озеро наблюдается со стороны региональных источников загрязнения, расположенных в долине р. Ангары (Рисунок 2.9). В среднем за год наблюдается до 30 % траекторий данной группы.

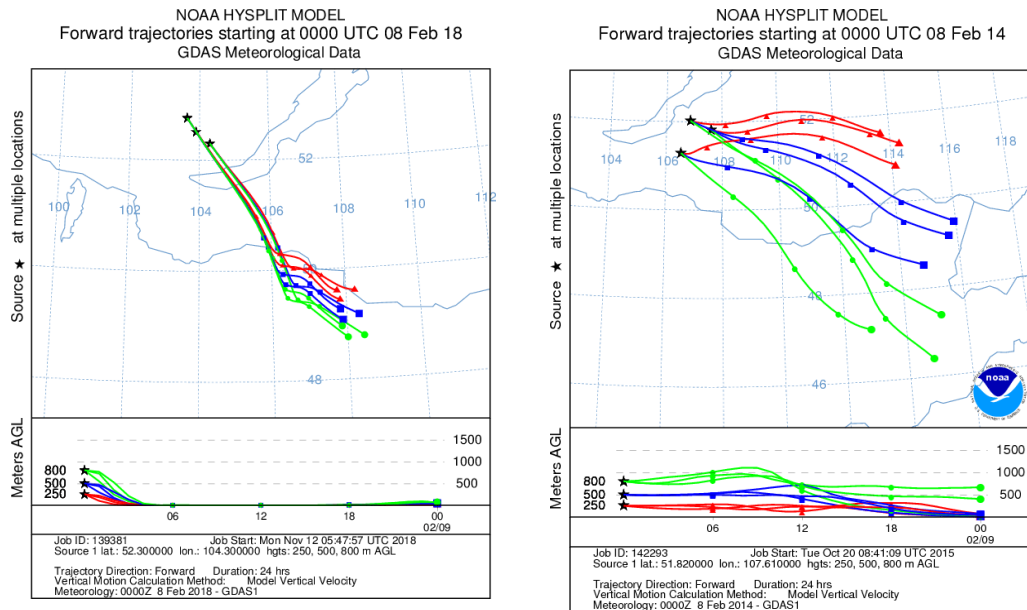


Рисунок 2.9 – Карта-схема прямых траекторий переноса воздушных масс, первой группы

Вторая группа включает себя траектории (Рисунок 2.10), когда над регионом преобладают слабые ветры южных и юго-западных направлений. При таких синоптических ситуациях происходит перенос на Среднюю и Северную котловины озера Байкал, в основном от крупных стационарных источников, расположенных на территории Бурятии. В среднем за год наблюдается до 29 % траекторий данной группы.

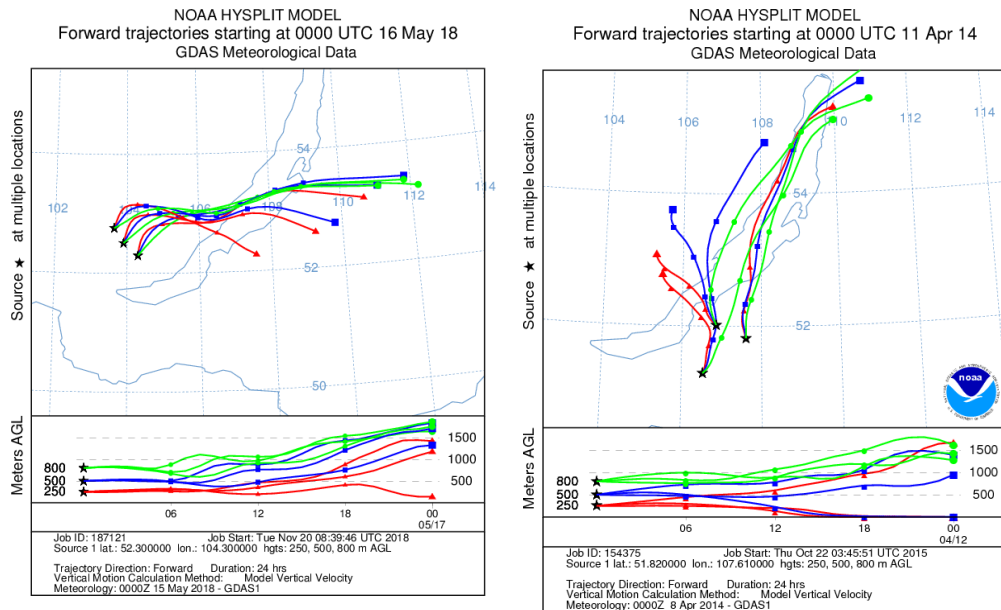


Рисунок 2.10 – Карта-схема прямых траекторий переноса воздушных масс, второй группы

В третью группу объединены траектории (Рисунок 2.11), характерные для весеннего и летнего периода года. Возникающие над регионом крупномасштабные северо-западные переносы воздушных масс охватывают всю Сибирь. Повторяемость траекторий данной группы достигает, в среднем за год, 28 %. Перенос от антропогенных источников Иркутской области осуществляется на Южную котловину озера.

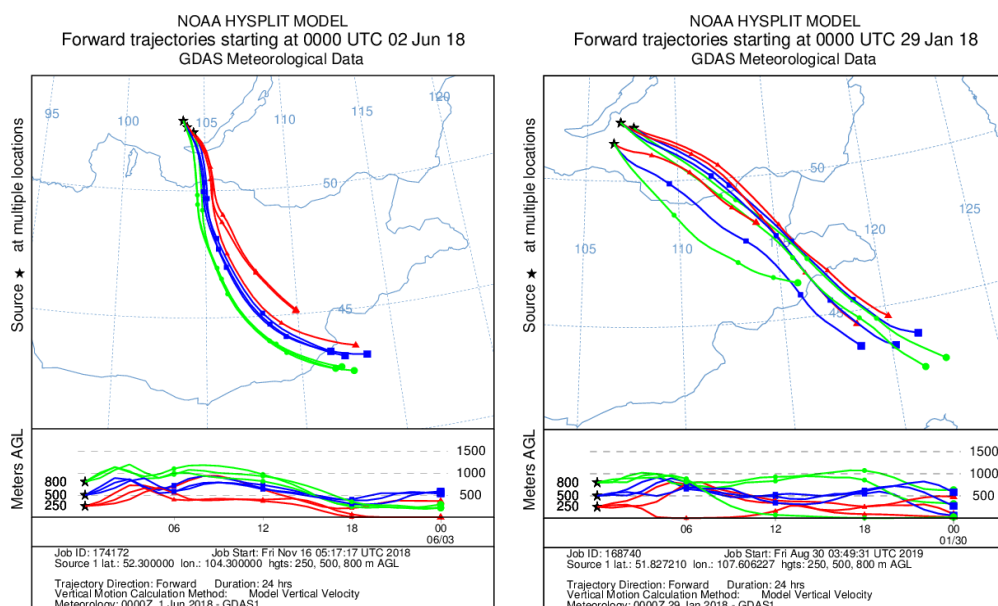


Рисунок 2.11 – Карта-схема прямых траекторий переноса воздушных масс, третьей группы

Четвертая группа чаще всего включает в себя траектории (Рисунок 2.12), когда регион находится под влиянием малоградиентного поля атмосферного давления со слабыми местными ветрами различных направлений или штилями. Чаще всего данная метеорологическая ситуация реализуется в теплый период года. При таких условиях перенос на Байкал осуществляется в основном от источников Республики Бурятия и составляет, в среднем за год, 13 %.

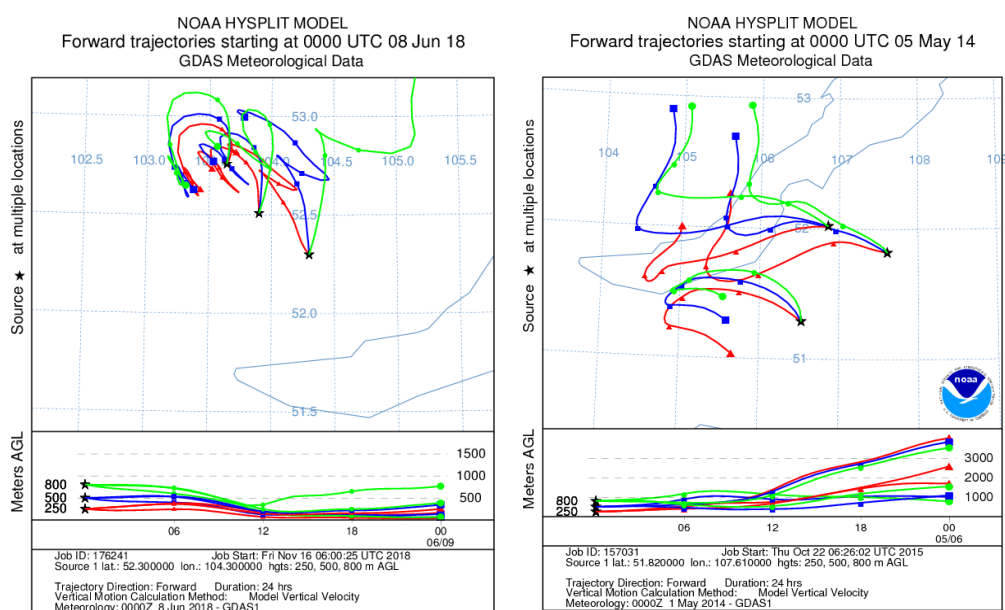


Рисунок 2.12 – Карта-схема прямых траекторий переноса воздушных масс, четвертой группы

Пятая группа включает себя траектории с ветрами юго-восточных направлений, в среднем в год, 10 % траекторий. Перенос от источников Иркутской области отсутствует, а от Республики Бурятия идет на Среднюю и Южную котловины озера, но при более сильных ветрах влияние источников можно наблюдать и в Северной котловине Байкала.

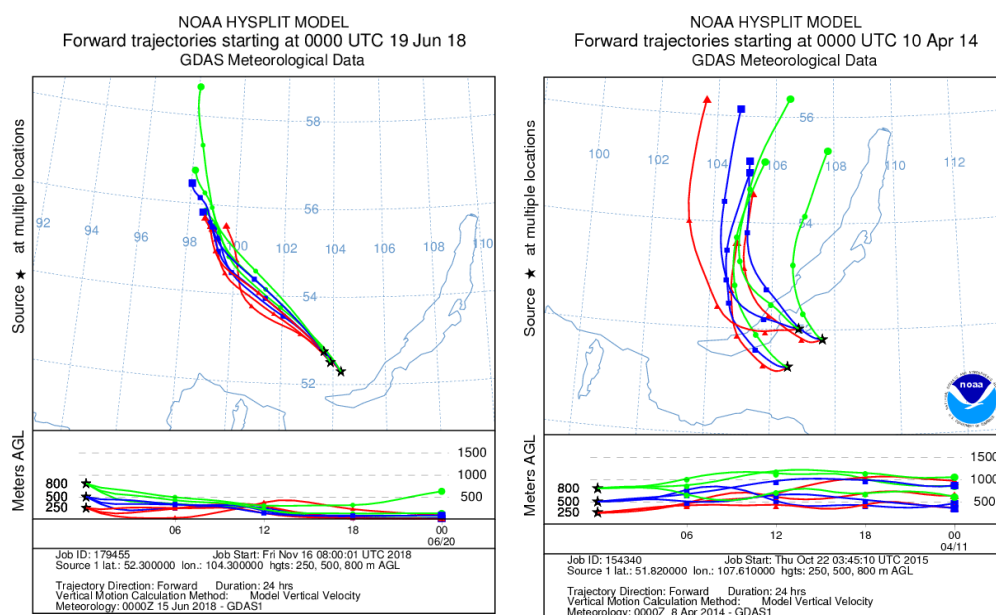


Рисунок 2.13 – Карта-схема прямых траекторий переноса воздушных масс, пятой группы

Проблема дальнего переноса антропогенных примесей представляет существенный интерес в связи с региональным и глобальным загрязнением воздушной среды. Чаще всего сформировавшиеся над промышленными районами воздушные массы могут содержать повышенные концентрации кислотообразующих соединений. Воздушные массы, пришедшие из аридных зон континента, вероятнее всего, будут содержать терригенную пыль, а сформировавшиеся над большими водными пространствами могут иметь в своем составе океанический аэрозоль. При образовании или прохождении над очагами лесных пожаров состав воздушных масс также видоизменится, в первую очередь, за счет значительного увеличения концентрации продуктов горения древесины.

При классификации траекторий ориентировались на общепринятые представления о том, что свойства воздушных масс определяются районом их формирования, а также на географическую классификацию [261]. Кроме того, учитывалось расположение крупных промышленных центров. Таким образом, все траектории были объединены в четыре сектора географического зонирования. Затем были рассчитаны повторяемости приходящих траекторий по секторам происхождения воздушных масс и выделен их процент принадлежности к дальнему переносу (Рисунок 2.14).

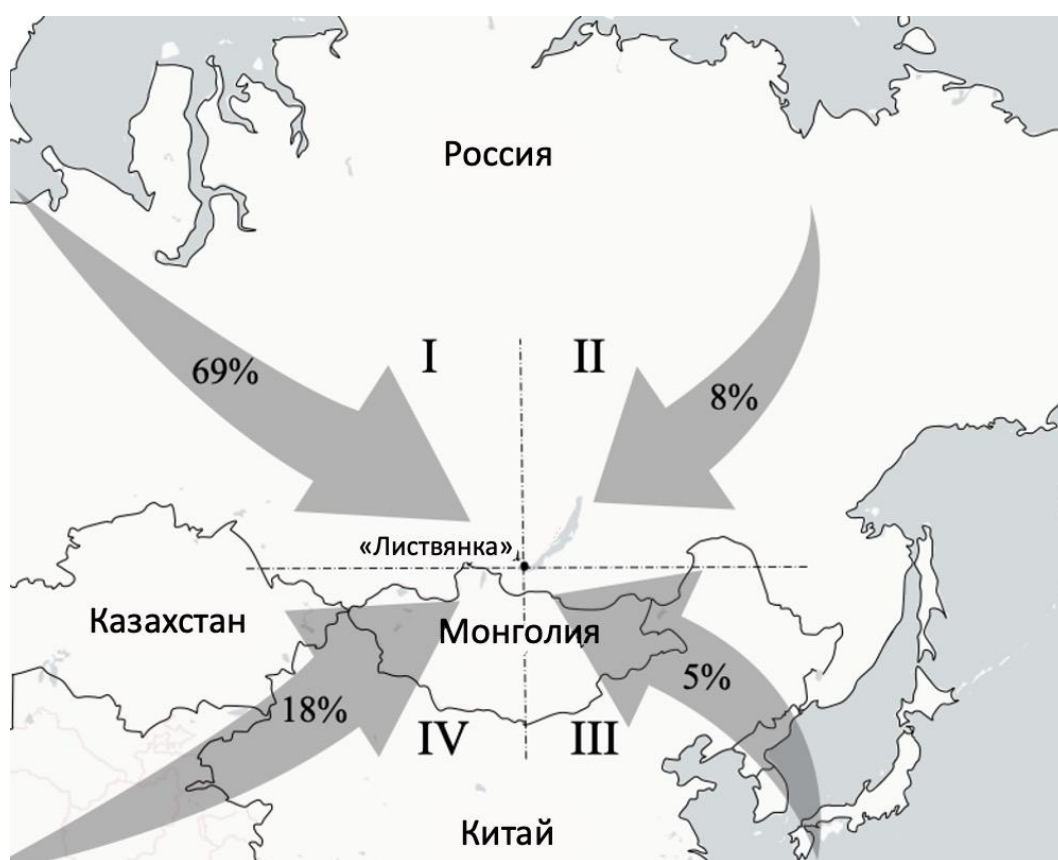


Рисунок 2.14 – Географическое зонирование для классификации обратных траекторий воздушных масс (I – СЗ; З-СЗ; З; С-СЗ; II – В; В-СВ; СВ; С-СВ; С; III – З-ЮЗ; ЮЗ; Ю-ЮЗ; Ю; IV – Ю-ЮВ; ЮВ; В-ЮВ; МЦ)

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. Именно эти воздушные массы переносятся над промышленными районами Западной и Восточной Сибири. В среднем, доля траекторий данного направления составляет 69 % (Рисунок 2.15-I). В случае возникновения синоптических ситуаций, способствующих дальнему переносу, данный тип воздушных масс способствует поступлению значительных объемов антропогенных примесей на акваторию озера. Согласно полученным данным, доля дальнего переноса из этого сектора составляет 23 % от всех случаев переноса по всем направлениям. 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. Поскольку воздушные массы образуются и проходят над районами, где отсутствуют антропогенные источники, и встречаемость данных траекторий составляет в среднем 8 %, влиянием единичных случаев дальнего переноса из второго сектора можно пренебречь (Рисунок 2.15-II). Третий сектор (III) состоит из траекторий юго-восточных направлений и включает в себя случаи «местной циркуляции». Повторяемость траекторий данного типа в среднем составляет 5 %. В связи с этим влияние дальнего переноса с районов Юго-Восточной Азии носит эпизодический характер и мало влияет на химический состав атмосферы над Байкалом (Рисунок 2.15-III). 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 (Рисунок 2.15-IV). 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, доля дальнего переноса на БПТ составляет около 7 %.

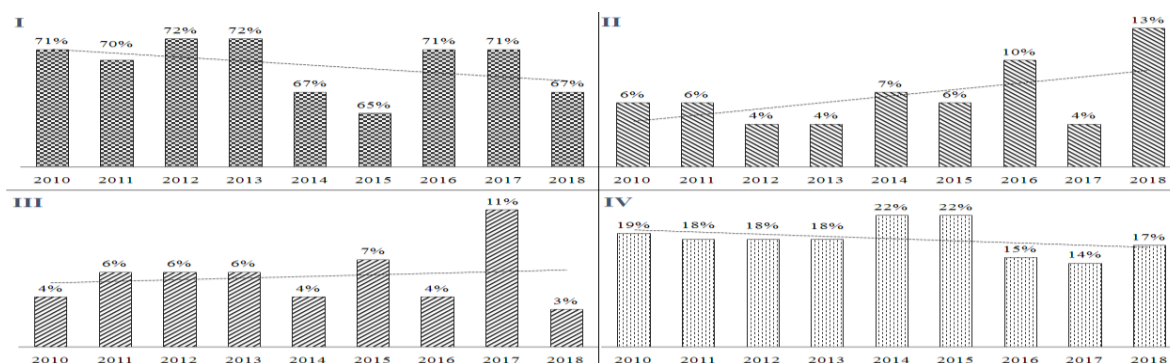


Рисунок 2.15 –Межгодовая динамика траекторий воздушных масс по районам их формирования (I – СЗ; З-СЗ; З; С-СЗ; II – В; В-СВ; СВ; С-СВ; С; III – Ю-ЮВ; ЮВ; В-ЮВ; МЦ; IV – З-ЮЗ; ЮЗ; Ю-ЮЗ; Ю;)

Из проведенного межгодового анализа не прослеживается отчетливого тренда изменения картины переноса воздушных масс за период исследования. Проведенные исследования подтверждают, что на юге Восточной Сибири также преобладают западный, северо-западный и юго-западный переносы. При рассмотрении межгодовых вариаций переноса воздушных масс произошло некоторое уменьшение повторяемости переноса западного направления и рост количества траекторий северо-восточного и юго-восточного направлений. Наиболее ярко это прослеживается при рассмотрении регионального переноса от источников Бурятии. Траекторный анализ показал увеличение повторяемости переноса воздушных масс в зимний период на акваторию Среднего Байкала с 20 % до 2014 года до 28 % в период 2015–2017 гг.

Перенос воздушных масс от высоких антропогенных источников загрязнения атмосферы региона

Процессы переноса атмосферных загрязнений в атмосферу озера Байкал, их осаждение на акваторию чрезвычайно изменчивы и зависят от региональных и глобальных синоптических и метеорологических процессов Сибири. В рамках

выполнения диссертационного исследования накоплена база данных ежедневных прямых траекторий переноса воздушных масс от региональных источников.

Анализ переноса воздушных масс от крупных стационарных источников, расположенных в пределах Байкальской природной территории, позволил получить долевым вклад неблагоприятных метеорологических ситуаций, при которых выбросы от региональных антропогенных источников достигали побережья озера Байкал. Из рисунков видно, что основной перенос от источников Иркутской области направлен на Южную котловину оз. Байкал, от 42 до 84 % (в среднем 58 %) от всех рассмотренных случаев за год, и только 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 %, в Среднюю около 26 %, в Северную не более 10 % за год. От источников из Иркутской области на Среднюю котловину переносится малая часть выбросов. Перенос от источников Республики Бурятия на озеро приходится в основном на дельту реки Селенги и Селенгинское мелководье. Наибольшая частота переноса примесей в воздушный бассейн озера зафиксирована в зимние месяцы, в это же время наблюдается и максимальный объем выбросов от региональных источников (Рисунок 2.16). Учитывая, что мощность антропогенных источников в Бурятии примерно в 10 раз ниже, чем в Иркутской области, атмосферные переносы загрязнений с восточной стороны озера менее заметны на прибрежных станциях мониторинга.

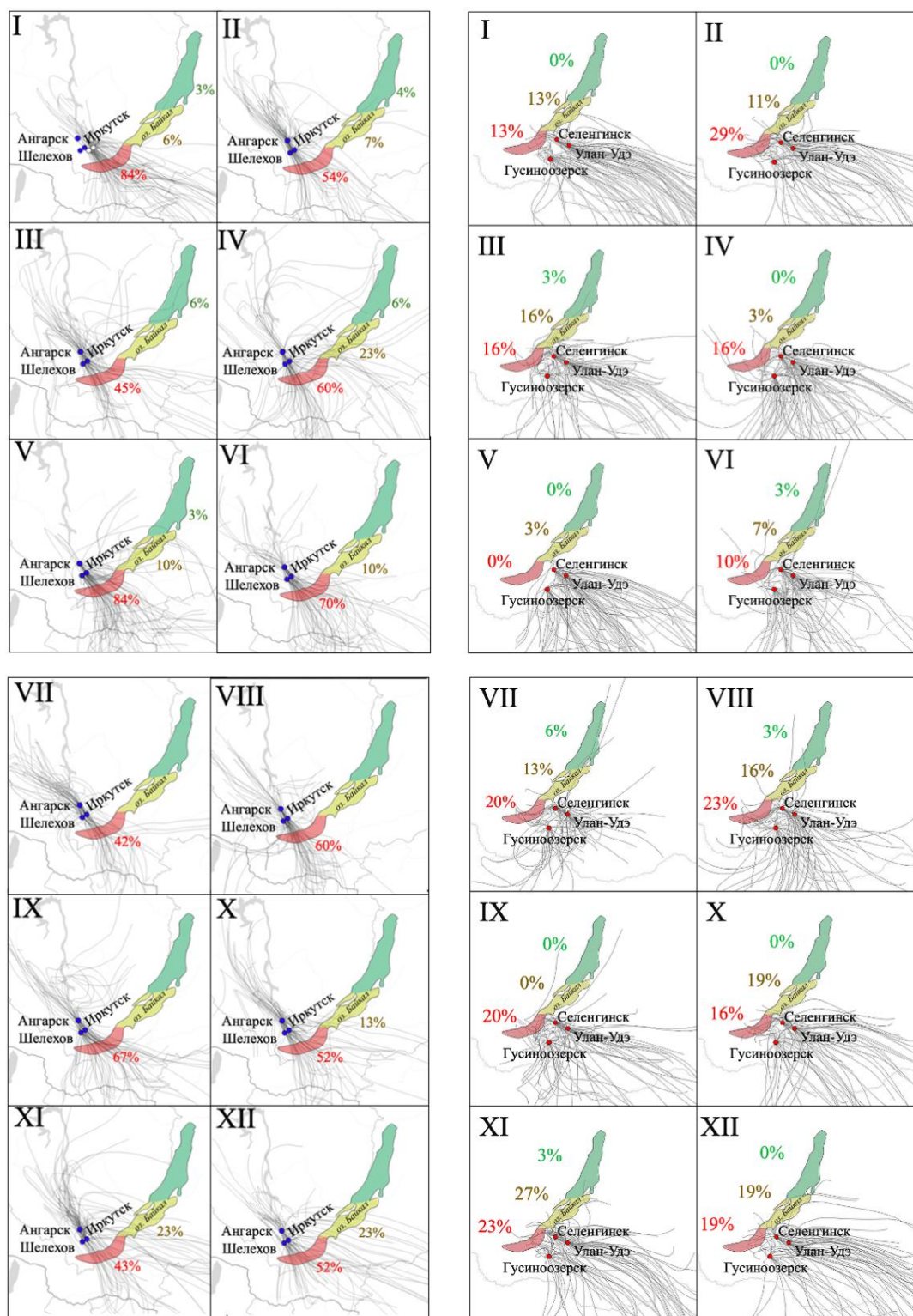


Рисунок 2.16 – Процентное распределение прямых траекторий движения воздушных масс (250 метров над уровнем земли (AGL)), рассчитанных от основных городов источников Байкальского региона за 2021–2022 гг. Цветом выделены три котловины Байкала и влияние (в процентах случаев) на каждую от промышленных источников

Оценка влияния синоптических процессов на уровень содержания примесей в атмосферных выпадениях воздушного бассейна Южного Байкала

В данной главе выполнено определение природных и антропогенных групп источников, оказывающих влияние на химический состав атмосферных выпадений в районе исследования. Для проведения работы были статистически проанализированы пробы атмосферных осадков, отобранные на станциях «Листвянка» и «Байкальская» (п. Танхой) в период с 2017 по 2021 гг.

Проведенный с помощью модели анализ переноса воздушных масс от основных крупных стационарных источников загрязнения атмосферы, расположенных на Байкальской природной территории, позволил разделить метеорологические ситуации за изучаемый период на пять различных групп влияния регионального переноса на оз. Байкал. При классификации ориентировались на расположение основных промышленных центров региона, на повторяемость различных траекторий, а также на различия в синоптических ситуациях.

При интерпретации результатов химического состава осадков на каждой станции выбрано по 3 основных фактора, суммарный вклад которых составил около 70–80 % общей дисперсии исходных данных. Результаты статистического анализа представлены на рисунке 2.17. Для каждого фактора показана нагрузка, определяющая интенсивность связи между фактором и компонентами. Оценка факторных нагрузок по ионному составу в атмосферных осадках в теплый период года, отобранных на ст. «Листвянка», показала, что наиболее значимый фактор, включает в себя ионы SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Поскольку одним из основных источников сульфатов в атмосфере является сжигание органического топлива объектами теплоэнергетики, то первый фактор можно отнести к антропогенным источникам. Кроме сульфат-иона, в первой группе присутствуют кальций и магний, являющиеся щелочными компонентами процессов горения органического топлива. Второй фактор ассоциирован с ионом аммония (NH_4^+) и в меньшей степени с ионом Cl^- , что можно связать с влиянием местного природного фона. В

третьем факторе наибольшая нагрузка определена для иона K^+ , являющегося трассером горения биомассы. Этот трассер может указывать как на сжигание топлива (дров), так и на влияние лесных пожаров.

Оценка факторных нагрузок по ионному составу в атмосферных осадках в теплый период года, отобранных на станции «Байкальская» (п. Танхой), показала следующее. Первый фактор характеризуется высокими положительными нагрузками ионов Cl^- , K^+ , Na^+ и представляет, вероятно, результат воздействия лесных пожаров и неоднородности подстилающей поверхности. Второй фактор объединяет ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- и отражает состав атмосферных осадков, сформировавшихся над территорией Казахстана и Монголии. Третий фактор определяет дополнительный вклад в атмосферную химию региона антропогенных источников аэрозоля при дальнем переносе и объединяет ионы NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} .

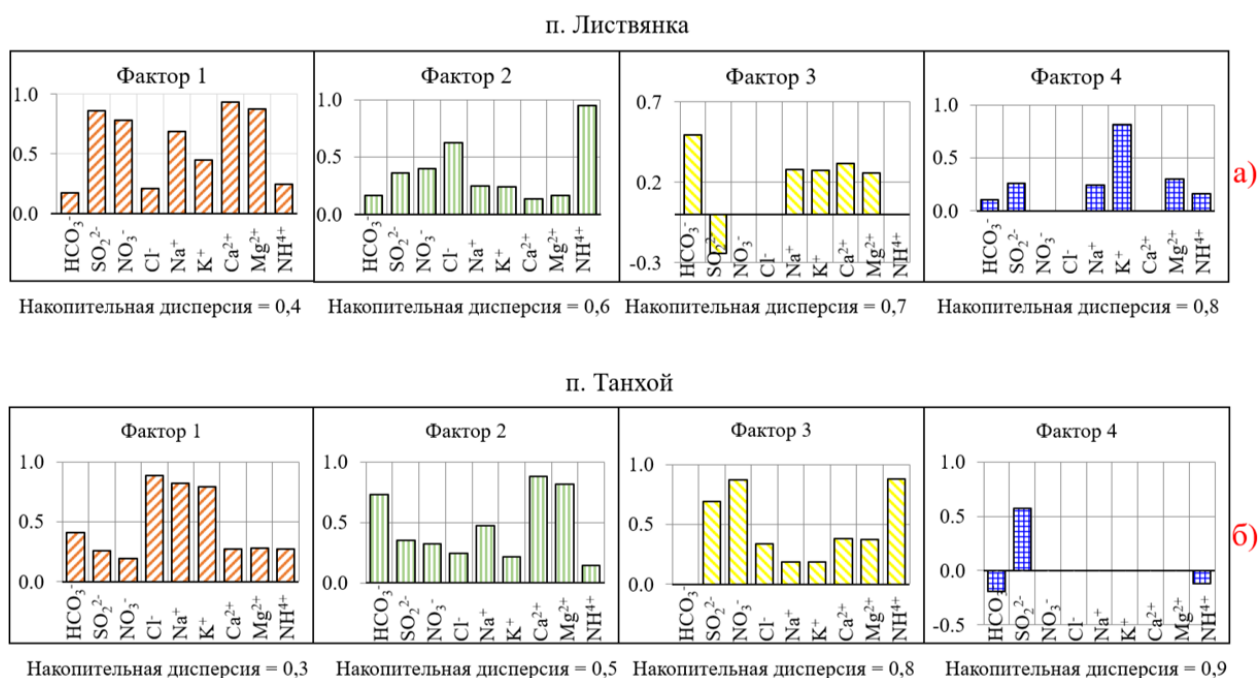


Рисунок 2.17 – Факторные нагрузки (по оси ординат), рассчитанные для атмосферных осадков, отобранных на ст. а) «Листвянка», б) «Танхой» в 2017–2021 гг.

Для определения взаимосвязи между изменением концентрации SO_4^{2-} в атмосферных осадках и регионом формирования воздушных масс использованы методы траекторного анализа и рецепторного моделирования.

Для определения регионов потенциальных источников, влияющих на концентрации SO_4^{2-} в атмосферных осадках, использован анализ траектории, взвешенной по концентрации (CWT), основанный на модели HYSPLIT. Метод, основанный на рецепторах CWT, подробно описан и широко применяется в исследованиях, посвященных выявлению потенциальных источников загрязнения атмосферы [262, 263]. Для анализа были смоделированы 72-часовые обратные траектории движения воздушных масс с опцией ансамбля траекторий. Метод CWT заключается в том, что каждая обратная траектория связана с концентрацией SO_4^{2-} в пробе атмосферных осадков, и каждое значение в ячейке сетки представляло собой средневзвешенную концентрацию данной пробы (Рисунок 2.18). Анализ обратных траекторий показал, что увеличение концентрации SO_4^{2-} до 3,58–5,52 мг/л происходит, когда воздушные массы, принесшие осадки, формируются над промышленными и крупными городами Западной и Восточной Сибири (Новосибирск, Томск, Красноярск, Братск, Иркутск). При поступлении атмосферных осадков с территории юга Восточной Сибири и Алтая содержание SO_4^{2-} снижается до 2,31–2,99 мг/л. Атмосферные осадки с наименьшим содержанием SO_4^{2-} формируются в районах севера Иркутской области и северной части Монголии (0,9–1,9 мг/л).

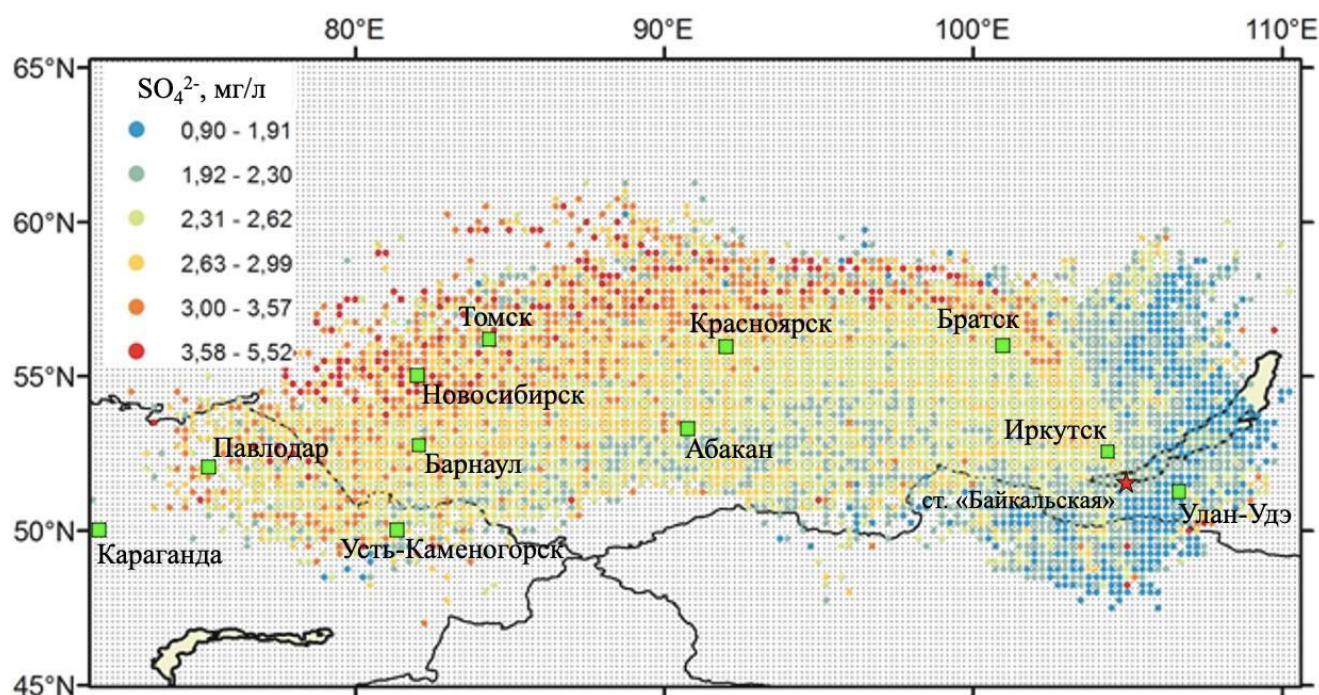


Рисунок 2.18 – CWT-анализ концентрации SO_4^{2-} , в атмосферных осадках на ст. «Листвянка»

2.8.5 Оценка пространственной картины распределения примесей в Южном Прибайкалье на основе данных о химическом составе снежного покрова

Геостатистика предоставляет средства для анализа и интерпретации пространственно-распределенных данных и является удобным методом оценки загрязнения и контроля экологических рисков на большой площади. Методы интерполяции широко применяются в процессах составления карт для оценки накопления трассерных веществ на тех участках, где не проводился отбор проб. В силу различных причин (труднодоступность мест или невозможность отбора проб на территории промышленных объектов) пробы отобраны не равномерно. Исходя из этого в качестве инструмента для построения карт выбран эмпирический Байесовский кригинг. Он отличается от других методов кригинга тем, что учитывает ошибку, связанную с оценкой основной вариограммы, и дает возможность точной интерполяции умеренно неоднородных данных. Тем самым этот метод позволяет сделать визуализацию данных максимально приближенной

к реальной картине. Карта-схема точек отбора проб снежного покрова отражена на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Карта-схема точек отбора проб снежного покрова за 2017–2022 гг. (красные точки)

Для понимания общей картины распределения растворимых веществ в снежном покрове Южного Прибайкалья построена карта пространственного распределения величины удельной электропроводности (Рисунок 2.20). Карта позволяет оценить область и площади рассеивания выбросов от промышленных предприятий, а также районировать регион по степени аэрозольной нагрузки. Как и ожидалось, повышенный уровень загрязнения снежного покрова аэрозолями отмечен в городах-источниках. Наиболее подверженным антропогенному загрязнению является город Ангарск. В городе расположена промышленная зона протяженностью более 30 километров, с суммарным выбросом в атмосферу более 94 тыс. тонн в год (Рисунок 2.3). 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 (отмечено звездочкой). А воздействие выбросов от источников Бурятии – Селенгинска и Каменска – визуализируется в дельте реки Селенги.



Рисунок 2.20 – Карта-схема пространственного распределения удельной электропроводности в снежном покрове бассейна озера Байкал

Для определения уровня загрязнения снежного покрова кислотными компонентами построена карта распределения рН снеговых вод в снежном покрове бассейна озера Байкал (Рисунок 2.21). Известно, что величина рН атмосферных осадков и снеговой воды обусловлена в основном присутствием в атмосфере оксидов азота, углерода и серы. Водородный показатель (рН) чистых атмосферных осадков, согласно [264], находится в интервале 5,5–6,5. В городах, где в атмосферу выбрасывается много золы, уровень рН варьируется от 6,25 до 7,75. Наиболее щелочные снеговые воды с величиной рН 11,05–11,07 определены

рядом с предприятиями по производству цемента (г. Ангарск, п. Каменск). Кислые атмосферные выпадения ($pH \sim 4-5$) измерены на юге Байкала, минимум, равный 4,44, определен в акватории озера на разрезе Кадильный – Мишиха. Низкое значение величины pH (4,73) зафиксировано на территории Байкальского биосферного заповедника, что можно связать с переносом оксидов серы и азота от крупных ТЭЦ, расположенных в долине реки Ангары, и, как следствие, повышением уровня антропогенной нагрузки на территории Байкальского заповедника.



Рисунок 2.21 – Карта-схема пространственного распределения pH в снежном покрове бассейна озера Байкал

Для количественной оценки поступления маркерных веществ на исследуемую территорию были рассчитаны величины накопления отдельных загрязняющих веществ (маркеров) в снежном покрове за период устойчивого снежного покрова. Величины накопления показывают количество веществ (мг, кг, т), поступающих на единицу площади подстилающей поверхности (m^2 , km^2). Расчет этой величины ведется по формуле:

$$Q = \alpha * C * W \text{ (1),}$$

где Q – накопление, мг/м²; C – концентрация, мг/дм³; W – влагозапас, см; α – коэффициент, учитывающий размерность.

Влагозапас – это количество влаги, определенной на месте отбора пробы. Его рассчитывают по формуле:

$$W = V / S \text{ (2),}$$

где V – объем пробы, см³; S – площадь отбора пробы, см² [265].

Визуализация результатов и районирование по экологическим нагрузкам представлены на рисунках 2.19-2.21.

При подробном рассмотрении Иркутской агломерации, включающей в себя три крупных промышленных центра и соединяющий их Иркутско-сельский район, мы видим, что высокие уровни накопления трассеров визуализируются рядом с источниками. Более подробный анализ пространственного распределения сульфатов, представленного на рисунке 2.22, позволил нам сделать ряд выводов. Видимые максимумы накопления сульфатов располагаются вблизи теплоисточников, что характерно как для городских центров, так и для сельских районов. Наибольший уровень накопления сульфатов отмечен в городе Ангарск и локализуется рядом с крупной ТЭЦ. В Иркутске максимумы определены не только вблизи ТЭЦ, расположенной на юго-западе города, но и вблизи коммунальных котельных, которые до сих пор в значительной мере участвуют в теплоснабжении города. Также локальные повышения сульфатов определены в районе крупного поселка Хомутово, рядом с расположенной в нем районной угольной котельной.

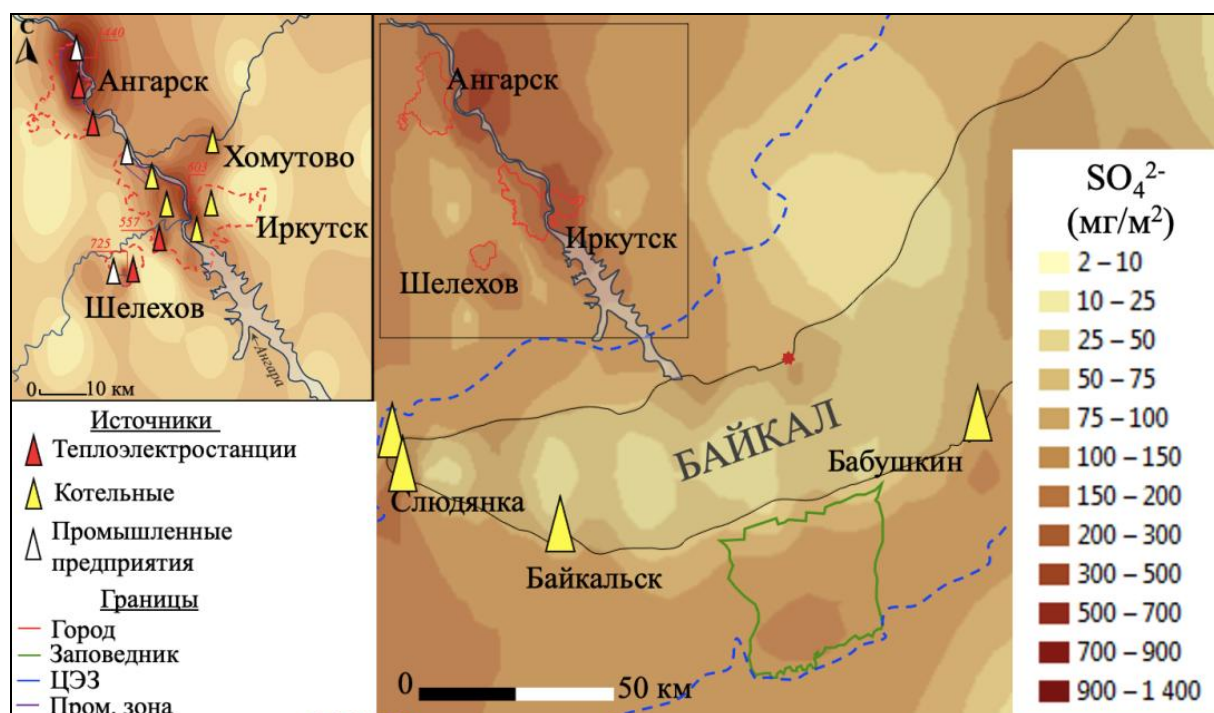


Рисунок 2.22 – Карта-схема пространственного распределения SO_4^{2-} в снежном покрове бассейна озера Байкал

На территории Байкальского природного биосферного заповедника, расположенного на удалении более 100 км от крупных антропогенных источников, отмечено еще одно повышение накопления сульфатов в снежном покрове. При этом концентрации в заповеднике малы. Данное явление объясняется высокой величиной влагозапаса в снеге в этом районе, которая превышает влагозапас в городах более чем в три раза.

Пространственное распределение нитратов представлено на рисунке 2.23. Основным антропогенным источником нитратов является высокотемпературное сжигание органического топлива – автотранспорт и промышленность. Нитраты, в отличие от других рассмотренных соединений, распределены на изучаемой территории более равномерно. Повышение величины накопления прослеживается по направлению основного переноса от крупных стационарных источников и вдоль автомобильных дорог. Максимум накопления нитратов зафиксирован в снежном покрове Байкальского природного биосферного заповедника. Поскольку

среднегодовое количество атмосферных осадков наибольшее на юго-восточном побережье озера, это способствует накоплению атмосферных примесей в снежном покрове.

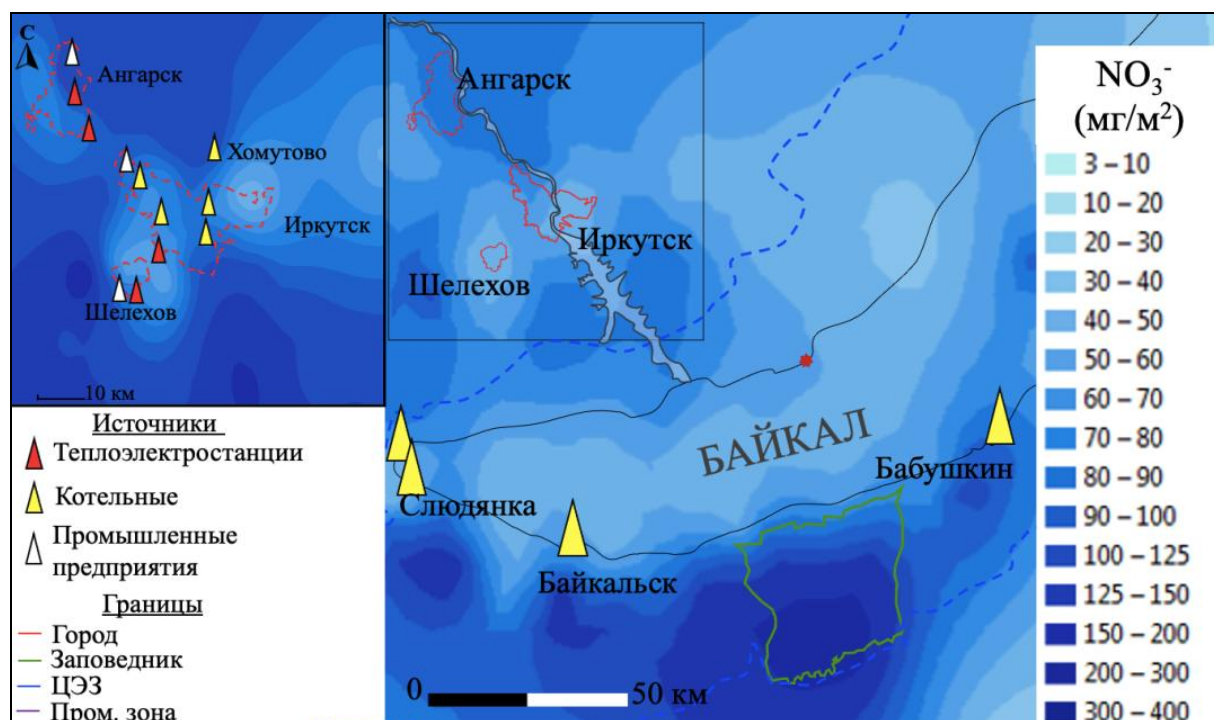


Рисунок 2.23 – Карта-схема пространственного распределения NO_3^- в снежном покрове бассейна озера Байкал

Накопление еще одного загрязняющего компонента в снежном покрове – аммония – представлено на рисунке 2.24. Известно, что источником атмосферного аммиака является почва, сельское хозяйство, бытовые отходы (свалки), в меньшей степени промышленность. Так же, как сульфаты и нитраты, аммоний является трассером дальнего газофазного переноса примесей. Из рисунка 2.24 видно, что распределение аммония достаточно однородно в Центральной Экологической зоне озера. Локальные максимумы величины его накопления определяются в промышленных центрах региона.



Рисунок 2.24 – Карта-схема пространственного распределения NH_4^+ в снежном покрове бассейна озера Байкал

Результаты геостатистического анализа показали, что факторы удаленности от промышленных предприятий, плотности населения, высоты снежного покрова являются наиболее важными факторами, влияющими на величины накопления трассеров в снежном покрове.

2.8.6 Оценка пространственной картины распределения примесей в Южном Прибайкалье на основе данных дистанционного зондирования атмосферы

Для получения картины распространения атмосферных примесей в атмосфере широко применяются методы спутникового зондирования. В главе представлен анализ источников выбросов дымового аэрозоля по спутниковым наблюдениям. Данные спутниковых измерений (Copernicus Sentinel-5P) получены в результате перерасчета на модели SILAM. Для расчетов скачивались снимки в режиме OFFL как содержащие более точные данные. При обработке снимков проводился отбор значений пикселей с учетом встроенного критерия `column_number_density_validity`, который брали больше 50–75 % (рекомендуемое значение параметра отличается для разных веществ), что позволило удалить

снимки, покрытые облаками/снегом/льдом, и ошибки измерения. Обработанные файлы сохраняли в каталоге системы хранения данных. По ним можно строить результатные изображения за разные периоды времени – ежедневные, еженедельные, ежемесячные.

Онлайн-мониторинг за слежением атмосферы на наземных станциях имеет один важный недостаток – измерения в одной точке недостаточно отражают пространственное (горизонтальное и вертикальное) распространение исследуемых примесей. Увеличение числа станций мониторинга ограничивается финансовыми возможностями. В этой связи в последние годы значительные успехи появляются в спутниковых методах мониторинга (<https://maps.s5pral.com/no2/>), а их комбинация с наземными данными дает более широкие возможности. На рисунках 2.25 и 2.26 приведены несколько примеров пространственного распространения NO_2 от антропогенных источников над Южным Байкалом. Хотя спутниковые данные также могут иметь пропуски (как правило, это связано с облачностью и прохождением спутника над станцией не более 3-4 раз в сутки), они дают неплохое представление об источниках и масштабах загрязнения атмосферы Байкала. В частности, из карт, построенных по спутниковым данным, видно, что выбросы таких прибрежных населенных пунктов как г. Байкальск, г. Слюдянка и п. Култук, не вносят существенного вклада в загрязнение атмосферы над озером по сравнению с выносами по долинам рек Ангары и Селенги. Также спутниковые данные дают возможность визуализировать перенос антропогенных примесей от объектов теплоэнергетики во время отопительного периода.

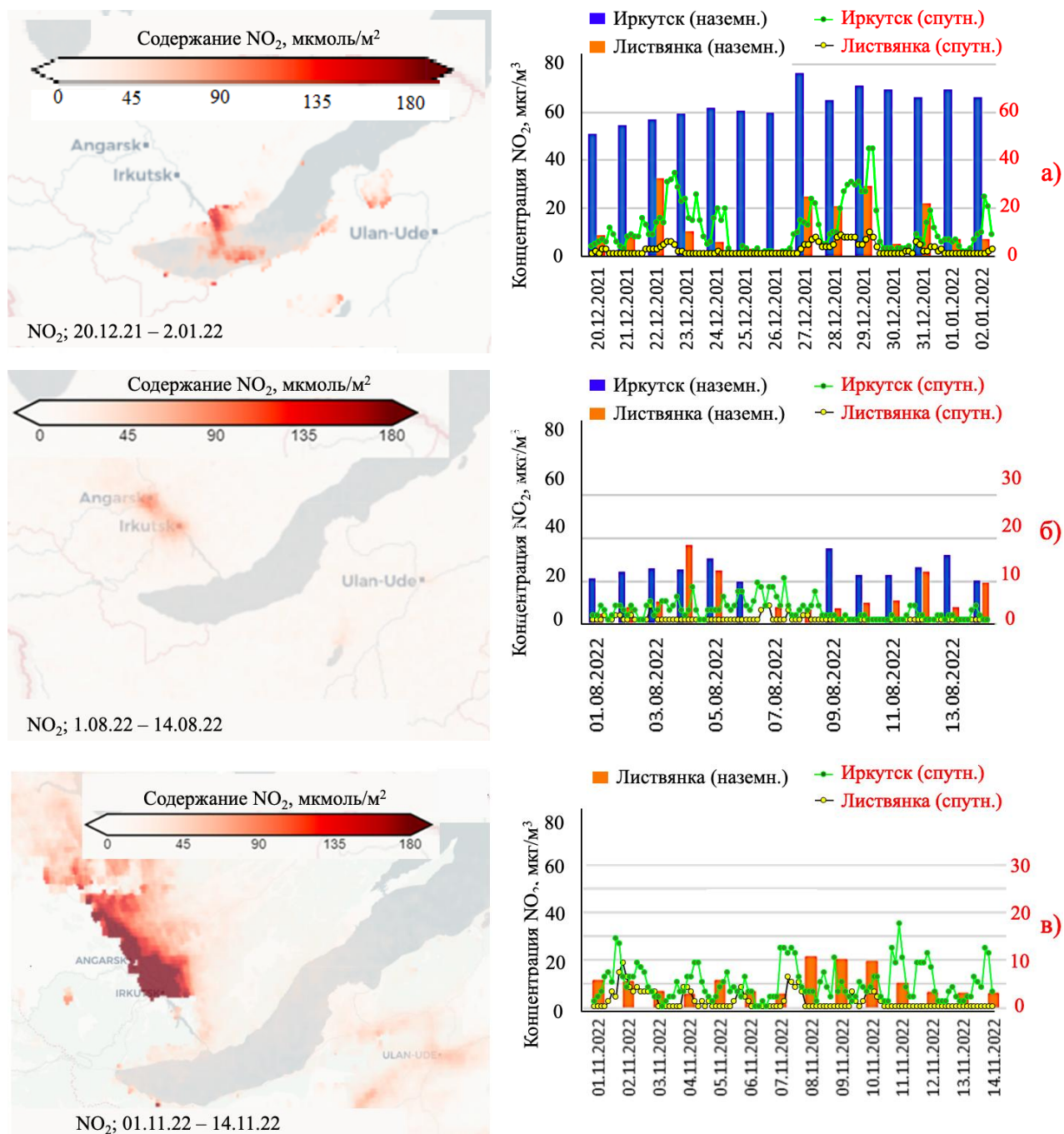


Рисунок 2.25 – Пример сопоставления спутниковых данных (Sentinel-5P [<https://maps.s5p-pal.com/no2/>]) о распределении NO_2 в тропосфере (мкмоль/м^2) и его концентрациях (мкг/м^3) в пунктах мониторинга в Иркутске и Листвянке

Как было сказано ранее, основными региональными источниками, способными оказывать влияние на акваторию озера, являются объекты теплоэнергетики, работающие на угле. Поэтому в качестве маркеров работы энергетических предприятий были выбраны оксиды серы и оксиды азота. Для

сравнения количественных характеристик были выбраны два периода 2021–2022 гг. Оба периода соответствуют максимальным выбросам ТЭЦ региона (с 1.01.21 по 31.03.21 и с 1.11.21 по 28.02.22). В ходе выполнения проекта были сопоставлены многоразовые значения, измеренные на станции «Листвянка», и данные в момент прохождения спутника над этим районом. При сравнении использовались данные, полученные со спутника Copernicus Sentinel-5P, пересчитанные на модели SILAM (<http://silam.fmi.fi/aqforecast.html?region=regional>).

Как видно из рисунков 2.25 и 2.26, оценки содержания оксидов серы и азота не очень хорошо согласуются между собой количественно (коэффициент корреляции составил около 0,43). При сравнении непосредственно распределений спутниковых оценок и данных автоматических измерений оксидов азота и серы на станции видно, что оба типа измерений демонстрируют схожий внутригодовой ход, но количественно данные могут отличаться в разы. Поэтому данные спутникового мониторинга можно использовать для описания масштабов распространения примесей. Они позволяют визуализировать масштабы распространения газовых примесей от природных и антропогенных источников, а получать реальные концентрации газовых и аэрозольных примесей в конкретных точках можно только путем непрерывного мониторинга на наземных станциях.

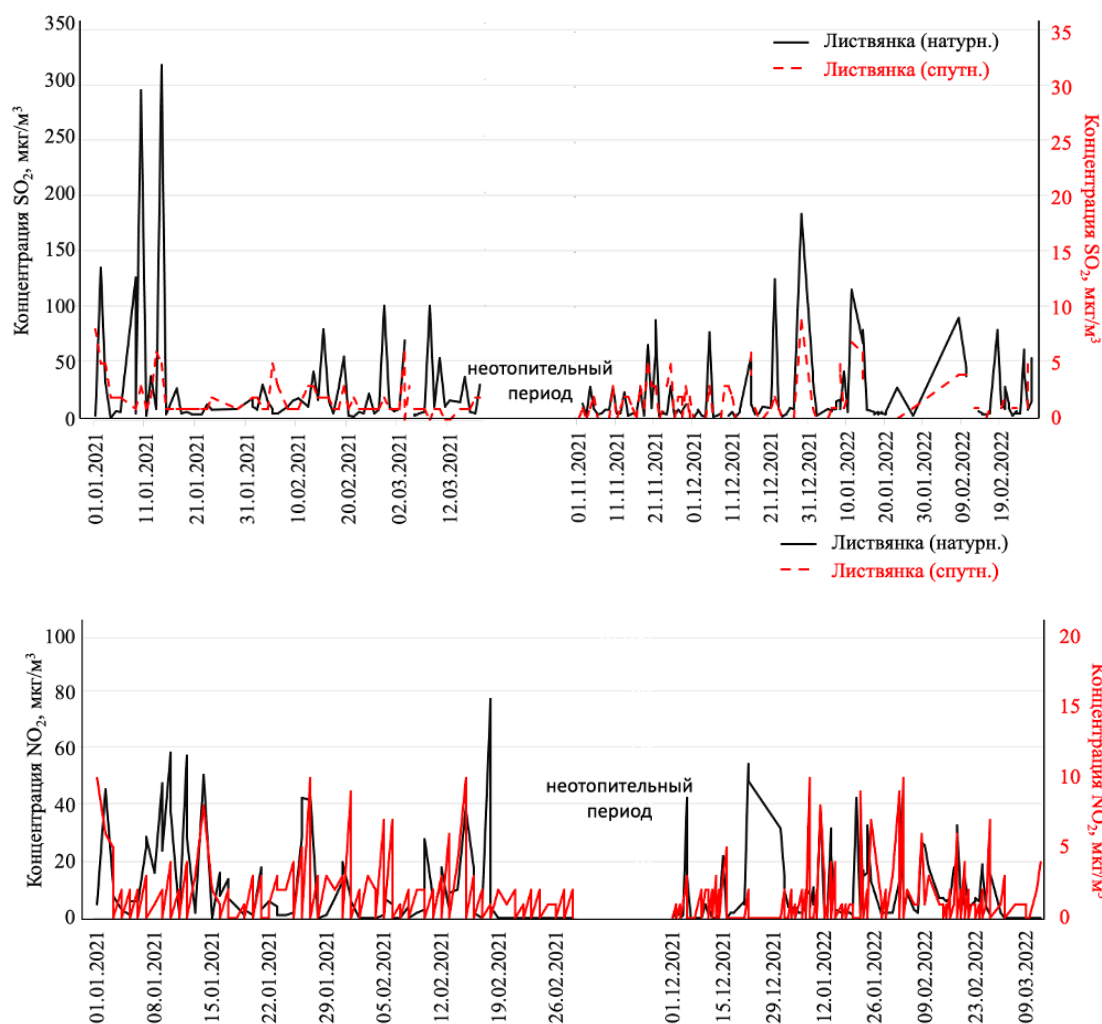


Рисунок 2.26 – Годовой ход приземных концентраций газовых примесей: а) SO_2 ; б) NO_2 по данным автоматического мониторинга на станции «Листвянка» за отопительный период 2021 и 2022 года и данным, полученным со спутника Copernicus Sentinel-5P, пересчитанным на модели SILAM (<http://silam.fmi.fi/aqforecast.html?region=regional>)

2.8.7 Описание станций наблюдения и установленного оборудования

Для исследования состояния атмосферы в ЦЭЗ Южного Байкала, изменчивости метеорологических параметров, газовых и аэрозольных примесей, определения основных факторов, влияющих на их содержание, проведены

непрерывные измерения в течение нескольких лет на выбранных станциях наблюдения.

В качестве постов наблюдения на побережье Южной котловины озера выбраны опорные станции «Листвянка», «Танхой» и дополнительно параллельно в летний период проведены наблюдения на стационаре «Боярский» (принадлежащем Институту физического материаловедения СО РАН). В дополнение к обозначенным постам использовались данные государственного мониторинга за состоянием атмосферы, ведущиеся на ст. «Байкальск» и доступные по адресу: <https://www.feerc.ru/baikal/ru/monitoring/air>. Для получения более полной картины загрязнения атмосферы на исследуемой территории в качестве опорной станции были взяты данные наблюдений по урбанизированной станции «Иркутск», а также сельской станции «Патроны» расположенной на удалении в 21 км от крупного источника загрязнения атмосферы г. Иркутска и в 39 км от озера. В качестве измерительного оборудования для ведения непрерывного мониторинга с высоким временным разрешением использованы газоанализаторы, лазерные фотометры, счетчики частиц, ультразвуковые метеокомплексы. Характеристики станций и используемого оборудования приведены ниже.

Ст. «Листвянка» расположена на западном побережье Южного Байкала (51,84 с.ш., 104,89 в.д.), на удалении ~ 60 км к юго-востоку от г. Иркутск, вблизи одноименного поселка. Станция находится на вершине прибрежного холма, на высоте 205 метров от уреза воды (662 м над уровнем моря) и расстоянии ~ 1 км от п. Листвянка.

Согласно результатам модельных расчетов воздушных течений от стационарных источников загрязнения атмосферы, расположенных в поселке, в 54 % случаев перенос направлен на юго-восток, и в 24 % на северо-запад. Перенос в направлении станции осуществляется в 11 % случаев (Рисунок 2.27 а). На рисунке 2.27 в показан пример переноса воздушных масс от котельной на станцию 15.01.2021 г. в 8:00 местного времени. Однако, несмотря на это, всплеска

концентраций SO_2 и PM_{10} на станции зафиксировано не было (Рисунок 2.27 б). Произошедшее вечером того же дня повышение концентрации диоксида серы до $0,38 \text{ мг/м}^3$ и PM_{10} до $0,14 \text{ мг/м}^3$ было вызвано привнесением в район станции воздушных масс, оказавшихся под влиянием промышленных источников города Шелехов (Рисунок 2.27 г).

Это позволяет говорить о том, что станция мониторинга достаточно репрезентативна, влияние локальных источников загрязнения атмосферы, находящихся в поселке, на получаемые результаты в этом районе сведено к минимуму. На этой станции возможно отслеживать влияние региональных источников, шлейфы от которых могут подниматься на высоту более 200 метров и фиксироваться в атмосфере на станции, что было подтверждено в предыдущих работах [266, 267].

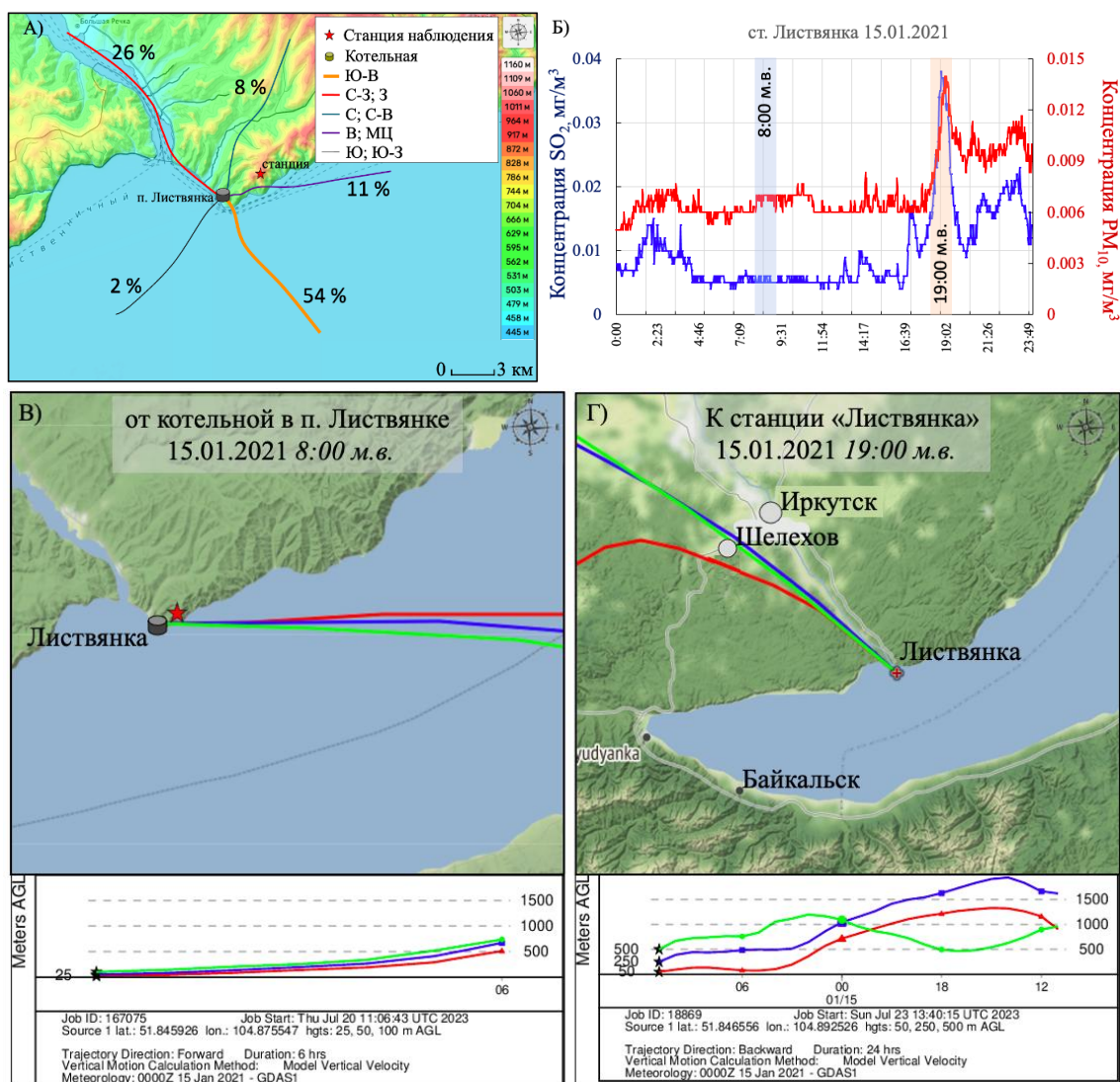


Рисунок 2.27 – а) повторяемость переноса воздушных масс от котельной п. Листвянка за отопительный период 2021 г.; б) концентрации SO_2 и PM_{10} на станции «Листвянка», зафиксированные 15.01.2021 г.; в) перенос воздушных масс от котельной п. Листвянка 15.01.2021 г. (в 8:00 м.в) на высотах 25 (красный), 50 (синий), 100 метров (зеленый) над поверхностью земли; г) перенос воздушных масс на станцию «Листвянка» 15.01.2021 г. (в 19:00 м.в) на высотах 50 (красный), 250 (синий), 500 метров (зеленый) над поверхностью земли;

Расположение, внешний вид станции и оборудования представлены на рисунке 2.28.



Рисунок 2.28 – 1) местоположение станции «Листвянка» на вершине холма; 2) фотография основного модуля опорной станции; 3) температурный профилемер МТП-5; 4) метеорологический комплекс «Сокол-М1»; 6) газоанализатор «Ф-105» (O₃); 7) газоанализатор «Р-310А» (NO₂ и NO); 8) газоанализатор «СВ-320» (SO₂); 12) анализатор пыли «DUSTTRAK 8533» (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁)

Опорная станция «Листвянка» оборудована:

- Лазерным фотометром «DUSTTAK 8533», фирмы TSI Incorporated, USA, для определения для определения счетной и массовой концентрации твердых частиц в диапазоне от 1 мкм до 10 мкм. (PM₁ – PM₁₀). Измерения проводятся с временным разрешением 5 минут и пределом обнаружения 0,001 мг/м³. Относительная ошибка измерений ± 20% в диапазоне измерений от 0,001 до 150 мг/м³.

- Хемилюминесцентным газоанализатором «СВ-320» для определения SO_2 и H_2S . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,05 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,05 \text{ мг/м}^3$ до $2,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Хемилюминесцентным газоанализатором «РА-310А» для определения NO и NO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,08 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,08 \text{ мг/м}^3$ до $1,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Метеорологической станцией «Сокол-М1», для определения метеорологических параметров (температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажность). Производитель – Sokol Meteo, Казань, Россия.

- Метеорологическим температурным профилометром МТП-5, для исследования вертикальной термической стратификации атмосферы до высоты 1000 м, с пространственным разрешением от 25 до 50 метров. Производитель – ЦАО, Москва, Россия.

Стационар «Боярский», принадлежащий Институту физического материаловедения СО РАН, расположен в 450 метрах от восточного берега озера, на окраине п. Боярск (51,84 с. ш., 106,07 в. д.). Как описывалось [268], станция не является «фоновой» для региона, поскольку подвержена косвенному воздействию ряда близлежащих промышленных источников (г. Бабушкин, п. Каменск, п. Селенгинск). Также на небольшом удалении от станции проходит Транссибирская железная дорога (350 метров) и автомагистраль Москва – Владивосток (80 метров). Из-за особенностей расположения стационара в лесной зоне его, как и станцию «Листвянка», можно отнести к категории «сельских» – слабо подверженных антропогенному влиянию.

Ст. «Боярский» оборудован:

- Лазерным фотометром «DUSTTAK 8533», фирмы TSI Incorporated, USA, для определения для определения счетной и массовой концентрации твердых частиц в диапазоне от 1 мкм до 10 мкм. ($PM_1 - PM_{10}$). Измерения проводятся с временным разрешением 5 минут, и пределом обнаружения $0,001 \text{ мг/м}^3$. Относительная ошибка измерений $\pm 20 \%$ в диапазоне измерений от $0,001$ до 150 мг/м^3 .

- Хемилюминесцентным газоанализатором «СВ-320А» для определения SO_2 и H_2S . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,05 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,05 \text{ мг/м}^3$ до $2,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Хемилюминесцентным газоанализатором «РА-310А» для определения NO и NO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,08 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,08 \text{ мг/м}^3$ до $1,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Ультразвуковым метеокомплексом АМК-03. Производитель – ИМКЭС СО РАН, Томск, Россия.

Ст. «Танхой» расположена на юго-восточном побережье озера Байкал (51,33 с. ш.; 105.08 в. д.), на высоте 455 метров над уровнем моря. Согласно модельным расчетам [269], выбросы от источников Иркутской агломерации часто достигают юго-восточного берега озера в слаборассеянном виде. Это вместе с большим количеством осадков ($> 1500 \text{ мм/год}$) обуславливает высокий уровень антропогенного воздействия на данный участок и может привести к экосистемным изменениям [270, 271, 272].

Станция оборудована:

- Хемилюминесцентным газоанализатором «С-310А» для определения SO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,05 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью

$\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,05 \text{ мг/м}^3$ до $2,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Хемилюминесцентным газоанализатором «P-105» для определения NO и NO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,08 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,08 \text{ мг/м}^3$ до $1,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Станцией «WoMaster ES-104», предназначенной для измерения температуры, относительной влажности воздуха, содержания $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} в окружающей среде. Диапазон измерений твердых частиц находится в пределах от $0,001$ до 1 мг/м^3 , с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, и относительной ошибкой 10% . Проведенный сравнительный анализ измерений «WoMaster ES-104» и лазерного фотометра «DUSTTAK 8533» показал хорошую сходимость, что позволяет с достаточной степенью достоверности использовать эти устройства для выявления «переходных моментов» – ситуаций, когда регистрируется повышение концентраций, определяя таким образом повторяемость переноса загрязненных воздушных масс от источников к реципиенту.

Расположение, внешний вид станции и оборудования представлены на рисунке 2.29.



Рисунок 2.29 – 1) местоположение станции «Танхой»; 2) «Womaster ES-104»; 3) газоанализатор «C-310A» (SO_2); 4) газоанализатор «P-105» (NO_2 и NO);

Ст. «Иркутск» расположена в юго-западной части города, на левом берегу р. Ангара, на территории Лимнологического института СО РАН (52,24 с. ш; 104,26 в. д.). Забор проб организован на высоте 12 метров над уровнем земли.

Станция оборудована:

- Счетчиком частиц Handheld 3016 IAQ, для определения концентрации аэрозольных частиц, производства Lighthouse, США. Точность измерений для частиц с размером более 0,3 мкм равна 5 %

- Хемилюминесцентным газоанализатором «С-310А» для определения SO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,05 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,05 \text{ мг/м}^3$ до $2,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

- Хемилюминесцентным газоанализатором «Р-105» для определения NO и NO_2 . Измерения ведутся с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$, приведенной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от 0 мг/м^3 до $0,08 \text{ мг/м}^3$ и относительной погрешностью $\pm 25 \%$ в диапазоне от $0,08 \text{ мг/м}^3$ до $1,0 \text{ мг/м}^3$. Производитель – ОПТЭК, С.-Петербург, Россия.

Ст. «Патроны» расположена на окраине одноименного поселка в долине р. Ангара, на высоте 462 метра над уровнем моря (52,15 с. ш; 104,463 в. д.). Поселок удален на расстояние 17 км к юго-востоку от г. Иркутска и является наиболее близко расположенным к источникам загрязнения атмосферы пунктом измерения, представленным в данной работе. На станции установлена «WoMaster ES-104», предназначенная для измерения температуры, относительной влажности воздуха, содержания $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} в окружающей среде. Диапазон измерений твердых частиц находится в пределах от $0,001$ до 1 мг/м^3 , с разрешением $0,001 \text{ мг/м}^3$ и относительной ошибкой 10 %.

Измерения концентрации диоксидов серы и азота на станции государственного мониторинга «Байкальск» осуществляются с помощью

газоанализаторов AF22 (SO₂) и AC32м (NO₂) (Environnement SA, Франция).

Погрешность при измерениях составляет $\pm 10 \%$.

3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ

3.1 Особенности пространственно-временного распределения примесей в атмосфере Южной части Центральной Экологической зоны оз. Байкал

Несмотря на множество проведенных исследований, регион неравномерно и недостаточно изучен в вопросе загрязнения атмосферы. Определение качественного и количественного состава примесей в воздухе как в городах-источниках, так и в воздушном бассейне озера, выявление механизмов переноса поллютантов и исследование закономерностей формирования полей загрязненности являются одними из важнейших задач охраны окружающей среды.

3.1.1 Массовая концентрация частиц PM_1 – PM_{10} в атмосфере на станции «Листвянка»

Измерения численной концентрации аэрозольных частиц размерных фракций 1 мкм, 2,5 мкм и 10 мкм на станции «Листвянка» начаты в 2021 г. Измерения велись с пределом обнаружения $0,001 \text{ мг/м}^3$, относительной ошибкой 20 % с временным разрешением 5 минут с помощью лазерного фотометра «DustTrak 8533» (TSI Incorporated, США).

На рисунке 3.1 представлены гистограммы распределения осредненных за 1 час концентраций PM_{10} на станции «Листвянка» в отопительный период (с октября по апрель, слева) и неотопительный сезон (май-сентябрь, справа). Гистограммы характеризуются одномодальным распределением с ярко выраженной правосторонней асимметрией и большим эксцессом. По мере возрастания концентраций частота быстро уменьшается.

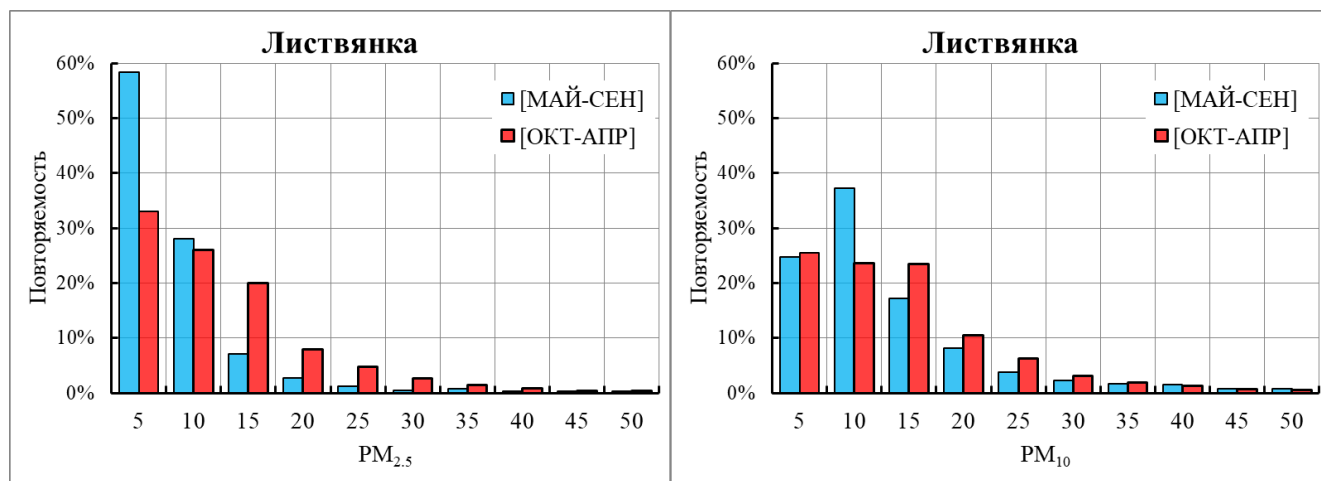


Рисунок 3.1 – Гистограмма распределения массовой концентрации частиц PM_{2,5} и PM₁₀ на станции «Листвянка» в различные сезоны, 2021–2023 гг.

На рисунках 3.2–3.4 представлены диаграммы размаха, на которых показана временная изменчивость среднечасовых концентраций PM₁, PM_{2,5} и PM₁₀. На диаграммах отражены медиана, первая (Q₁) и третья (Q₃) квартиль, минимальное и максимальное значения, в пределах 1,5 произведения межквартильной разницы (IQR = Q₃ – Q₁).

При анализе динамики содержания PM₁₀ в атмосфере на станции «Листвянка» (Рисунок 3.2) определено, что концентрации частиц претерпевали значительные изменения как в течение года, так и между годами. В 2021 г. среднемесячные концентрации изменялись в пределах от 6 до 36 мкг/м³, при этом медианные значения были существенно ниже среднего арифметического и изменялись в пределах от 5 до 13 мкг/м³. Среднемесячные значения PM₁₀ в 2022 и 2023 гг. изменялись в пределах от 5 мкг/м³ (в апреле) до 34 мкг/м³ (в феврале), при этом медианные значения изменялись от 3 до 21 мкг/м³ и были выше, чем в 2021 г. Из рисунка 3.2 видно, что в августе 2021 г. зафиксировано наибольшее количество выбросов концентрации PM₁₀ (т. е. нетипичных для массива значений) с максимальным за весь период наблюдения значением = 241 мкг/м³. Это было связано с экстремальным загрязнением атмосферы в результате лесных пожаров в Якутии, представленных в [273, 274]. Как видно из таблицы 3.1, площадь лесных

пожаров в 2021 г. была значительно больше, чем в 2022 и 2023 гг. Можно предположить, что уменьшение максимальных концентраций до 85 мкг/м^3 в летний период 2022 и 2023 гг. связано с уменьшением площади лесных пожаров в эти годы (Табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Площадь лесных пожаров в России в 2021–2023 гг. (по данным <https://rosleshoz.gov.ru>)

Год	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Площадь лесных пожаров	18,6 млн га	3,5 млн га	4,3 млн га

Кроме летних максимумов концентрации частиц PM_{10} , повышения концентраций также зафиксированы в январе и феврале. Это, как и в случае с кислотообразующими газами, связано, прежде всего, с температурным режимом и увеличением повторяемости переноса шлейфов от высоких труб крупных объектов теплоэнергетики.

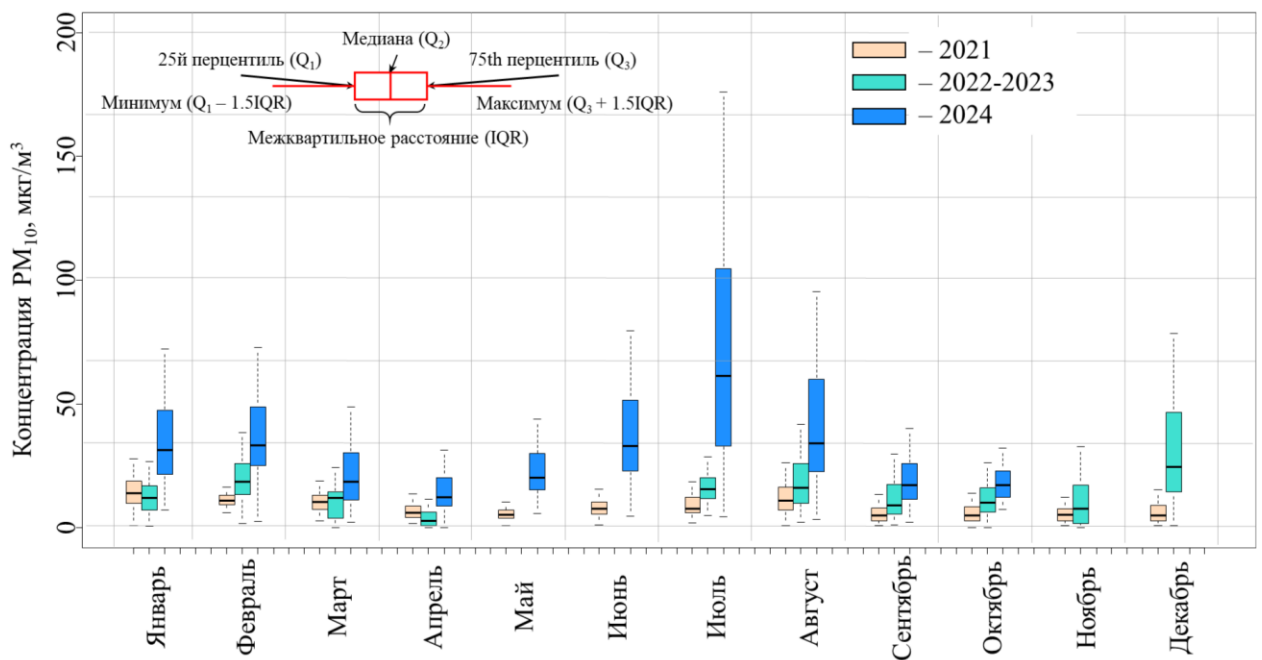


Рисунок 3.2 – Динамика концентрации частиц PM_{10} в атмосфере на ст. «Листвянка» в 2021–2023 гг.

При анализе частиц $\text{PM}_{2.5}$ (Рисунок 3.3) отмечена схожая картина распределения среднемесячных значений их концентраций. В 2021 г. концентрации изменялись в пределах от 4 до 32 мкг/м^3 (медианные значения в

пределах от 4 до 12 мкг/м³), в 2022–2023 гг. от 3 до 17 мкг/м³ (медианы 2–15 мкг/м³).

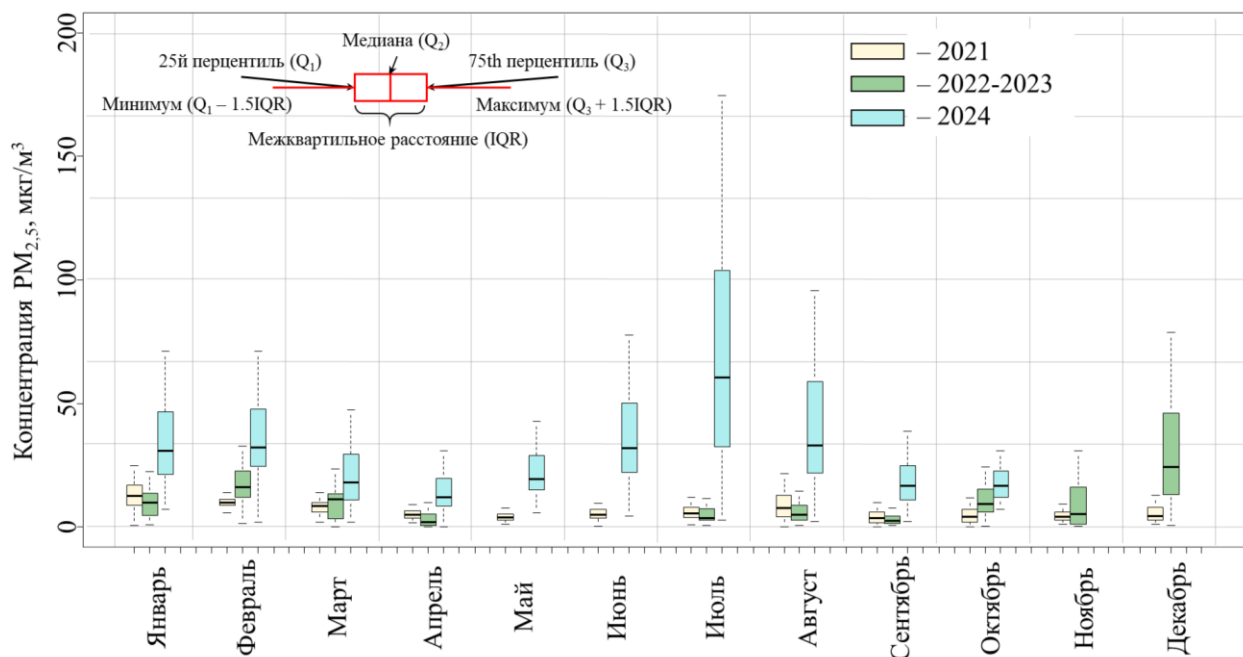


Рисунок 3.3 – Годовая динамика концентрации частиц PM_{2,5} в атмосфере на ст. «Листвянка» в 2021–2023 гг.

На рисунке 3.4 представлено межгодовое распределение концентрации частиц PM₁ на станции «Листвянка», схожее с концентрациями с PM_{2,5} и PM₁₀. В 2021 г. концентрации PM₁ изменялись в пределах от 4 мкг/м³ (в сентябре) до 31 мкг/м³ (в августе), с медианами в пределах от 3 до 12 мкг/м³, в 2022–2023 гг. от 2 до 12 мкг/м³ (медианы 1–9 мкг/м³).

Проанализирован вклад концентраций частиц PM₁ в суммарное загрязнение воздуха на станции «Листвянка». Из анализа данных за 2021–2023 года получено, что в отопительный период масса частиц PM₁ (среднее значение 5,6 мкг/м³) вносит основной вклад в общую массовую концентрацию частиц PM₁₀ (8,9 мкг/м³) и составляет 67 % от массы PM₁₀. В летний период отмечается увеличение доли крупной фракции в составе аэрозоля, и отношение PM₁/PM₁₀ составляет 50 %. Данная закономерность с увеличением PM₁/PM₁₀ в зимние месяцы проявляется как в отдельные годы в Байкальском регионе [275], так и в других регионах мира [276, 277].

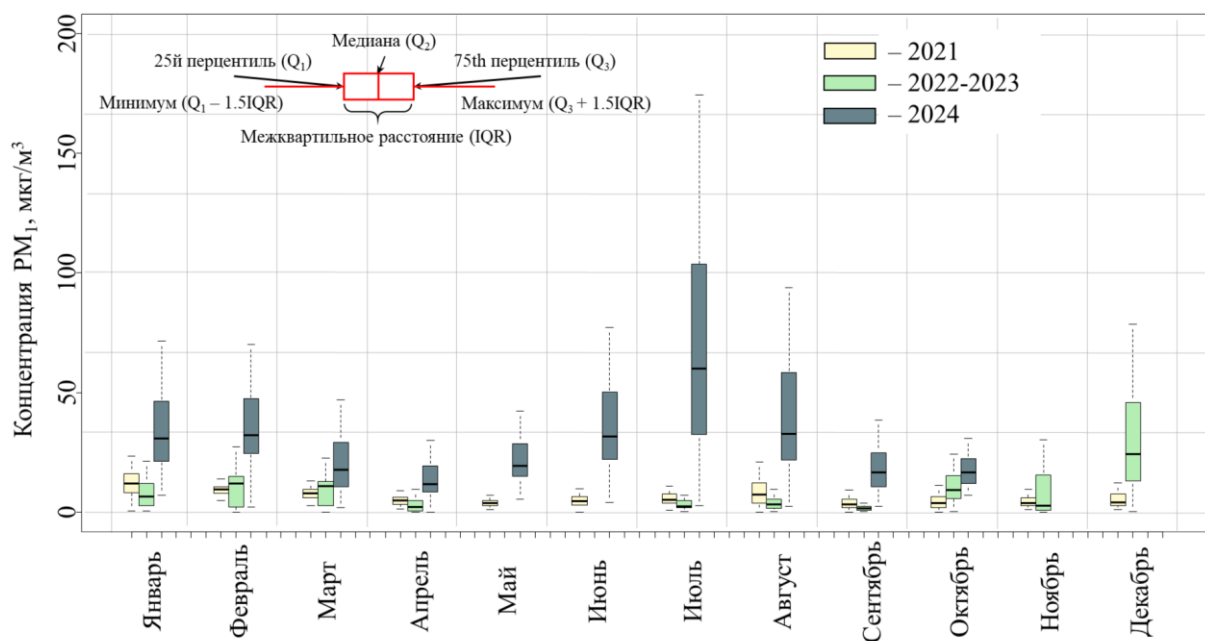


Рисунок 3.4 – Годовая динамика концентрации PM₁ в атмосфере на ст. «Листвянка» в 2021–2023 гг.

3.1.2. Применение современных low-cost сенсоров для определения концентрации аэрозольных примесей в атмосфере Южного Прибайкалья

Анализ пространственного распределения химических веществ в снежном покрове Южного Прибайкалья, представленный выше, по результатам снегогеохимической съемки показал крайне неоднородный уровень антропогенной нагрузки в различных районах исследуемой территории. Для уточнения представлений о процессах, протекающих в атмосфере изучаемой территории, была дополнена и расширена существующая сеть мониторинга за счет дополнительного размещения современных low-cost сенсоров по анализу аэрозольных частиц.

Увеличение плотности станций мониторинга РМ за счет low-cost сенсоров имеет хорошие перспективы и уже применяется во многих регионах мира [278, 279, 280, 281, 282]. Это стало возможным благодаря простоте установки и эксплуатации, в сравнении с профессиональным оборудованием, меньшим потреблением энергии, низкой стоимостью приборов. Это позволяет

одновременно установить множество приборов, в том числе и в удаленных, труднодоступных районах [283, 284, 285].

Несмотря на преимущества устройств, описанные выше, low-cost сенсоры имеют важные недостатки, которые ограничивают их потенциал, и должны быть учтены прежде широкомасштабного использования. К недостаткам относятся: сильная зависимость от параметров окружающей среды – в первую очередь, влажности и температуры; невозможность измерить непосредственно массовую концентрацию PM; отсутствие чувствительности к частицам с аэродинамическим диаметром менее 0,3 мкм; различная реакция на частицы в зависимости от их состава [286]. Однако их использование вполне подходит для расширения сетей мониторинга на качественном уровне, предоставляя данные хотя и худшего качества, чем эталонные приборы, но, за счет высокого пространственно-временного разрешения, упрощающие поиск наиболее напряженных точек, выявление источников загрязнения атмосферы и паттерн загрязнения атмосферы [287, 288, 289].

Первым делом, при использовании «WoMaster ES-104» нами был поставлен эксперимент по сличению результатов с эталонными приборами «DustTrak 8533» (PM_x) и «Сокол-М1» (температура воздуха). На рисунке 3.5 продемонстрирована корреляционная матрица между концентрациями PM_{2,5}, PM₁₀ и температурой воздуха, измеренными на ст. «Листвянка» с октября 2023 по январь 2024 г. Как видно из рисунка, значения, зафиксированные станцией «WoMaster ES-104», хорошо согласуются с измерениями «DustTrak 8533», как для PM_{2,5}, так и для PM₁₀. В обоих случаях отмечена сильная линейная связь, с коэффициентом корреляции 0,72. По мере увеличения интервала осреднения коэффициенты корреляции незначительно возрастают: до 0,76, при времени, равном 1 час. Связь между результатами измерений метеокомплекса «Сокол-М1» и «WoMaster ES-104» сильна и устойчива к изменению масштаба времени осреднения. При увеличении времени осреднения с 5 минут до 1 часа она остается неизменной и равняется 0,92. Несмотря на доказанную зависимость повышения концентрации

аэрозолей в атмосфере Южного Прибайкалья при понижении температуры воздуха в регионе, нами, в данном исследовании, подобной связи выявлено не было. Это обусловлено небольшим по продолжительности периодом, захватывающим только месяцы, относящиеся к отопительному периоду. Связь, выявляемая ранее, возникает, во многом, благодаря контрасту между летними и зимними месяцами, когда регистрируется наименьший и наибольший объем выбросов от предприятий теплоэнергетики. При анализе взаимосвязи между аэрозольными частицами различных размерных фракций виден практически функциональный уровень линейной зависимости, что свидетельствует об одном и том же источнике поступления аэрозольных частиц в атмосферу в зимний период.

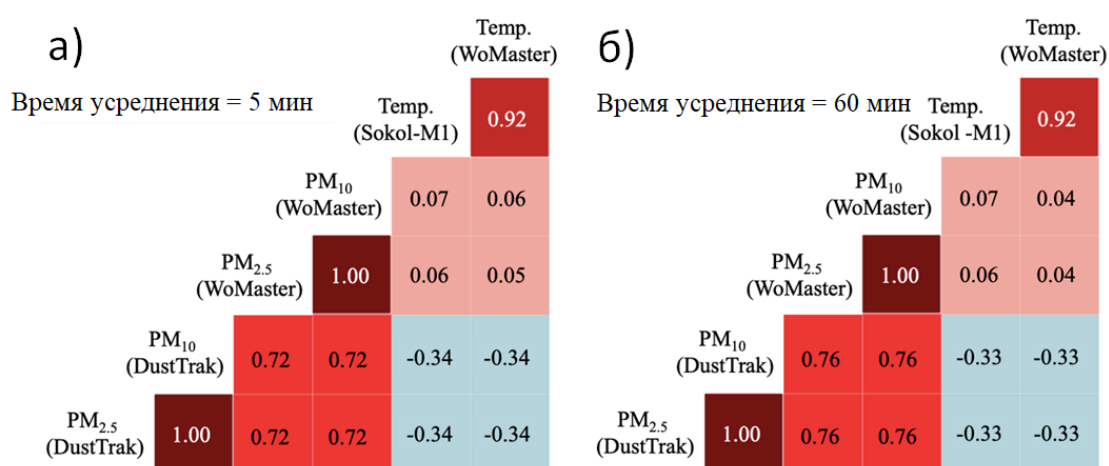


Рисунок 3.5 – Корреляционная матрица между концентрациями PM_{2.5}, PM₁₀ и температурой воздуха на ст. «Листвянка», усредненными по времени: А) 5 минут; Б) 60 минут

На рисунке 3.6 продемонстрировано сравнение концентрации аэрозольных примесей в атмосфере ст. «Иркутск» в феврале 2024 г. Из графика видно, что пятиминутные концентрации PM_{2.5}, измеренные приборами «DustTrak 8533», «WoMaster ES-104» и «Lighthouse 3016», показывают адекватную сходимость во временной изменчивости массовой концентрации. Коэффициент корреляции в данном эпизоде составляет более 0,92. Однако в абсолютных значениях массовой концентрации аэрозоля могут возникать различия, в особенности при концентрациях свыше 100 мкг/м³. Одной из причин этого является различие

методов анализа и зависимость от метеорологических условий – относительной влажности и температуры [290, 291].

Таким образом, рассмотренные в работе приборы «WoMaster ES-104» пригодны для выявления «переходных моментов» – ситуаций, когда регистрируется резкое повышение концентраций, позволяя достоверно определить повторяемость и количественно оценить перенос загрязненных воздушных масс от источников на побережье озера.

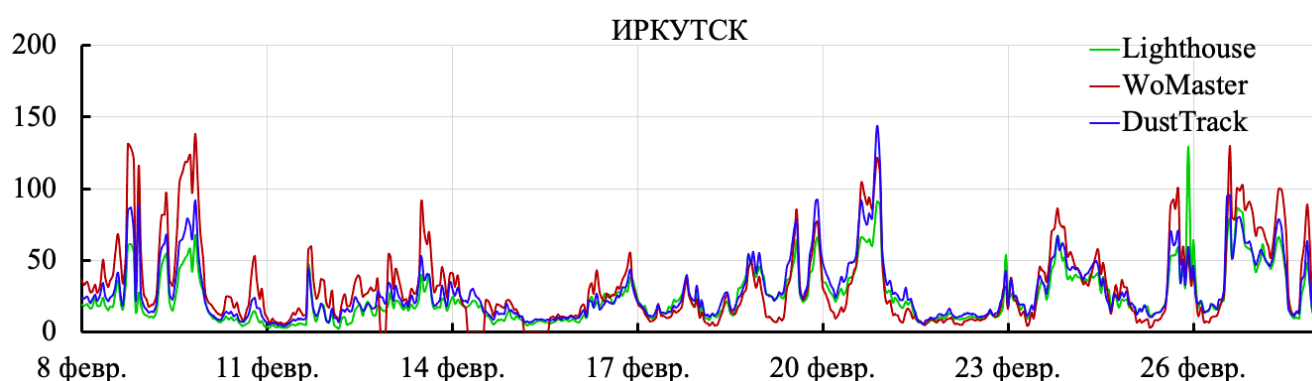


Рисунок 3.6 – Временная изменчивость концентрации $PM_{2.5}$ на станции «Иркутск» (красная кривая – «WoMaster ES-104» / синяя – «DustTrak 8533» / зеленая – «Lighthouse 3016»)

С 1 октября 2023 по 31 марта 2024 г. на станциях: «Патроны», «Листвянка» и «Танхой» синхронно проводились измерения концентраций $PM_{2.5}$, PM_{10} . Наибольшие концентрации РМ фиксировались на ст. «Патроны» и изменялись в пределах от 10 до 29 $мкг/м^3$, для $PM_{2.5}$ и от 13 до 37 $мкг/м^3$, для PM_{10} . Это в 4 раза выше, чем было зарегистрировано на ст. «Листвянка», и в 14 раз выше, чем на ст. «Танхой». Столь высокие концентрации на ст. «Патроны» можно объяснить ее близостью к крупному промышленному центру г. Иркутску (21 км). Максимальные концентрации РМ на всех станциях были зафиксированы в декабре. Этому способствовало установление антициклонального типа погоды начиная со второй недели декабря. В период действия антициклона преобладала малооблачная, безветренная, морозная погода, со снижением температуры

воздуха до -39°C . Понижение среднесуточной температуры на $11\text{--}17^{\circ}\text{C}$ ниже климатической нормы послужило причиной увеличения интенсивности работы объектов теплоэнергетики и хозяйственно-бытовых котельных, расположенных в городах исследуемого региона и их окрестностях, а также активизации печного отопления жителями поселков. Это, в совокупности с ухудшением процессов рассеивания и самоочищения атмосферы, привело к росту концентраций РМ на всех станциях наблюдения. Несмотря на малые медианные распределения концентраций РМ в Танхое и Листвянке, на этих станциях часто регистрируются эпизоды, когда концентрации на станциях на порядок выше средних значений. Данные эпизоды связаны с переносом шлейфов от крупных теплоэнергоисточников, расположенных в Иркутской агломерации, что неоднократно фиксировалось ранее на ст. «Листвянка» [292, 293].

Результаты измерений представлены в виде боксплотов на рисунке 3.7. На графиках отражена медиана распределения (красная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика»), третья квартиль (верхняя граница «ящика»), а также нетипичные значения, выходящие за пределы тройного произведения разницы между Q_3 и Q_1 (кружки) на основании среднечасовых концентраций.

Анализ автоматических измерений показывает, что существует четкая тенденция к понижению средних концентраций аэрозольных частиц с северо-запада на юго-восток. Однако на удаленных от антропогенных источников станциях часто возникают эпизоды, когда концентрации на порядок выше средних. Данные эпизоды связаны с переносом шлейфов от крупных теплоэнергоисточников, расположенных в Иркутской агломерации, и неоднократно фиксировались ранее на ст. «Листвянка».

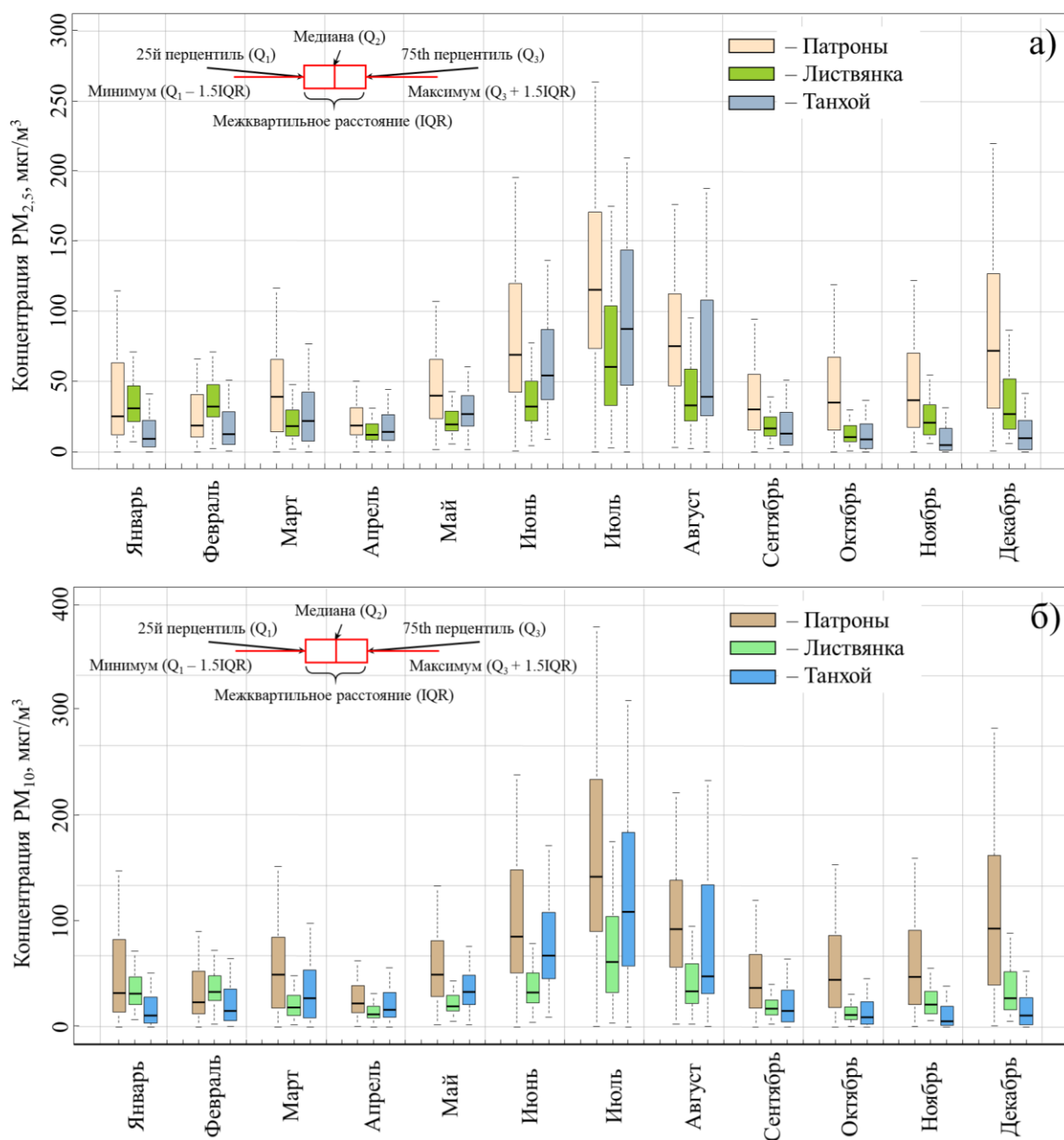


Рисунок 3.7 – Пространственно-временная изменчивость среднечасовых концентраций а) $PM_{2.5}$; б) PM_{10} на ст. «Патроны», «Листвянка» и «Танхой». На графиках отражена медиана распределения (жирная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика»), третья квартиль (верхняя граница «ящика»).

3.1.3. Суточная изменчивость РМ в атмосфере ст. Листвянка

Содержание аэрозолей в приземном слое атмосферы в значительной степени зависит от процессов их образования (эмиссия, седиментация, коагуляция, фотохимические реакции и др.) и метеорологических условий,

которые обуславливают пространственно-временную изменчивость и суточную цикличность параметров аэрозолей. На рисунке 3.8 представлен суточный и сезонный ход массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} на ст. «Листвянка» по данным наблюдений за 2021–2023 гг., осредненных по времени за 10 минут. Как видно из рисунка, эти вариации характеризуются наличием двух выраженных максимумов в полдень и ночью и разделяющих их периодов с пониженными значениями (в середине дня и предутренние часы). Максимум, возникающий с 20 до 6 утра, возникает главным образом вследствие развития температурной инверсии, которая приводит к накоплению аэрозоля в приземном слое атмосферы. В полдень, в связи с увеличением инсоляции, развитием конвективного перемешивания воздуха, концентрации аэрозоля вблизи земли убывают.

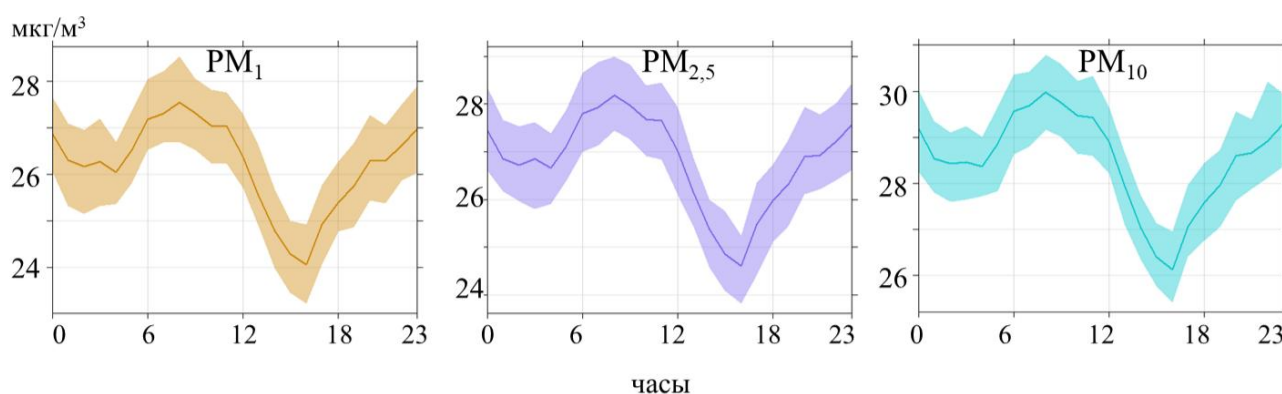


Рисунок 3.8 – Суточные вариации концентраций PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} на ст. «Листвянка» по данным наблюдений за 2021–2024 гг. Затененная область обозначает 95 % доверительный интервал.

4 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ

В этом разделе главы представлен анализ четырехлетних непрерывных измерений SO_2 , NO и NO_2 , с осреднением по времени = 20 минут на двух опорных станциях наблюдения «Иркутск» и «Листвянка». Ниже представлены и проанализированы особенности ежемесячных, недельных и суточных характеристик этих малых газовых примесей.

На рисунке 4.1 приведены графики частотного распределения концентраций газов на станциях «Иркутск» и «Листвянка». Расчет проводился для двух периодов: отопительного (с октября по апрель) и неотопительного (с мая по сентябрь). В основном гистограммы характеризуются одномодальным распределением с ярко выраженной правосторонней асимметрией и большим эксцессом. По мере возрастания концентраций частота быстро уменьшается. В отопительный период частотное распределение как на урбанизированной, так и на сельской станциях – расширяется. Следует отметить, что во время отопительного периода с частотой от 4 до 6 %, в зависимости от компонента и станции наблюдения, возникают ситуации, при которых происходят увеличения концентрации свыше 85 мкг/м^3 . Следует отметить, что вне зависимости от сезона года концентрации диоксида серы в основном изменяются в диапазоне от 0 до 15 мкг/м^3 , оксида азота от 0 до 15 мкг/м^3 в Иркутске и от 0 до 5 мкг/м^3 в Листвянке. Это свидетельствует о том, что обе станции находятся под влиянием крупных внешних источников загрязнения атмосферы только периодически, в большинстве ситуаций описывают общий уровень загрязнения атмосферы на периферии городской агломерации и в сельской местности.

В отличие от SO_2 и NO , содержание NO_2 для урбанизированной территории в отопительный период распределено явно двумодально, что может свидетельствовать о нескольких крупных источниках поступления газа в

атмосферу на станции. Поскольку основными источниками для NO_2 являются автотранспорт и предприятия теплоэнергетики [294], вероятно, график показывает преобладающее воздействие теплоэнергетики на выбросы двуокиси азота в атмосферу в зимний период.

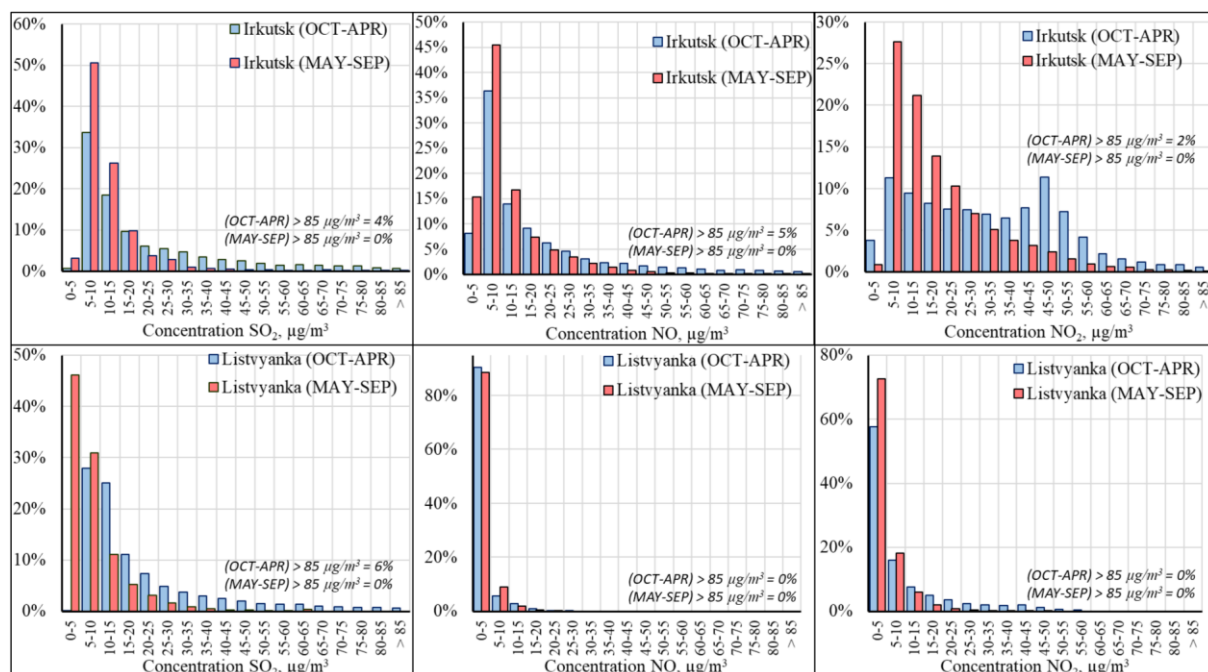


Рисунок 4.1 – Графики частотного распределения двадцатиминутных усредненных концентраций SO_2 , NO , NO_2 на станциях мониторинга: «Иркутск» и «Листвянка» в отопительный период (голубой) и неотопительный сезон (красный). По оси ординат представлена повторяемость концентраций, определенного диапазона. По оси абсцисс – диапазоны концентрации примеси.

В таблице 4.1 представлены некоторые статистические параметры для проведения сравнительного анализа содержания газовых примесей в атмосфере на станциях «Иркутск» и «Листвянка». Как видно из таблицы, наибольшее количество газообразных оксидов серы и азота поступает в атмосферу региона в отопительный период – с октября по апрель. Это связано с рядом факторов: во-первых, увеличением количества сжигаемого на теплоэлектростанциях угля (справедливо для обеих станций); во-вторых увеличением интенсивности зимних переносов по долине р. Ангары в сторону озера [295] (более значимо для ст. «Листвянка»), и ухудшением условий рассеивания примесей в холодный

период, по сравнению с теплым и, следовательно, накоплением примесей вблизи источника (более значимо для ст. «Иркутск»).

При анализе таблицы выделяется несколько интересных особенностей. Первая – высокая изменчивость концентраций примесей как на ст. «Иркутск», так и на ст. «Листвянка», а также высокие абсолютные максимальные значения, превышающие средние оценки в случае среднего арифметического на один, а в случае медианного на два порядка. Подобные ситуации, вероятно, вызваны натеканием шлейфов от ТЭЦ на станции и/или возникновением условий, затрудняющих процессы рассеивания примесей в атмосфере. Подобные ситуации будут рассмотрены ниже в качестве отдельных примеров.

Вторая – согласно средним и медианным оценкам, концентрации диоксида серы (SO_2) на удаленной от городов ст. «Листвянка» – высоки, и часто превышают значения, фиксируемые на урбанизированной станции. Это обусловлено, во-первых, тем, что горячие выбросы SO_2 практически целиком происходят на высотах труб ТЭЦ (более 150 м) и, поднимаясь выше, без сопротивления уносятся за пределы города. При этом важно отметить, что в среднем уровень загрязнения, измеренный на постах Росгидромета в г. Иркутск, вдвое выше, чем зафиксировано на станции Лимнологического института [296, 297]. Это связано с тем, что станция института расположена на приподнятой форме рельефа в одной из «чистых» зон города и в стороне от наиболее вероятного пути переноса шлейфов от крупных теплоисточников [298].

Третьей особенностью является различие в концентрациях оксидов азота, регистрируемых на сельской и городской станциях. Ожидаемо в городе концентрации оксидов азота, как в форме монооксида, так и в виде двуокси азота, в 5–10 раз выше, чем на ст. «Листвянка». При этом монооксид азота на ст. «Листвянка» регистрируется редко, что означает, что влияние местных источников либо отсутствует, либо минимально (поскольку время жизни NO – около 2–3 часов).

Четвертая особенность заключается в том, что при использовании медианы распределения, в качестве меры усреднения, абсолютная величина сокращается. Это свидетельствует о наличии множества нетипичных значений – «выбросов», искажающих общую картину в сторону завышения концентраций газов, особенно на сельской станции.

Таблица 4.1 – Сравнение 20-минутных концентраций газов (мкг/м³) на урбанизированной и сельской станциях в 2020–2023 гг. В числителе: «июнь-сентябрь» – «октябрь-апрель», в знаменателе – среднее за весь период наблюдения

мкг/м ³	ст. «Иркутск»			ст. «Листвянка»		
Время усреднение = 20 мин	SO ₂	NO	NO ₂	SO ₂	NO	NO ₂
Среднее	7,0–19,8	7,8–19,3	14,9–28,3	7,2–22,1	1,4–1,3	3,3–8,1
	12,2	13,6	21,6	16,4	1,3	5,7
Максимум	224,6– 237,7	206,0– 503,0	114,3–150,4	289–754	34–82	94,4–94,8
СКО	10,1–25,8	12,6–32,6	14,5–20,8	9,0–37,8	2,6–3,8	4,8–11,1
	19,3	26,5	19,4	23,4	3,2	8,0
Медиана	4,5–9,0	3,6–7,0	10,1–26,7	4,5–9,2	0,0–0,0	1,4–3,0
	5,7	5,3	17,1	6,8	0,0	2,2

4.1.1.1 *Сезонная изменчивость газовых примесей в городских и сельских условиях*

На графиках 4.2–4.4 продемонстрирована более подробная среднемесячная вариация концентраций оксидов азота и серы на станциях «Иркутск» и «Листвянка» за весь период наблюдения (с 2020 по 2023 гг.). По оси ординат на

рисунках отложены значения концентраций (в мкг/м^3), а по оси абсцисс – месяц. На диаграмме отражены медиана распределения (жирная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика») и третья квартиль (верхняя граница «ящика»). Нетипичные значения, выходящие за пределы полуторного произведения разницы между Q_3 и Q_1 (выбросы), – не указывались. Как видно из рисунков, газовые примеси, в основном, имеют схожий характер с максимумом в феврале и декабре и депрессией с июня по август. Наибольшие медианные концентрации были зафиксированы в феврале. Согласно многолетней оценке внутригодового хода температуры воздуха и количества атмосферных осадков, выполненной в регионе исследования [299], февраль является одним из наиболее холодных и засушливых месяцев в году (~ 10 мм). Это, в совокупности с наименьшей средней глубиной пограничного слоя атмосферы [300], увеличением интенсивности источников загрязнения атмосферы и повышением частоты развития приземных инверсий, определяет данный зимний максимум. Летнее понижение концентраций, напротив, связано с повышением температуры воздуха, увеличением объема выпавших осадков (в среднем ~ 270 мм за летний сезон), увеличением глубины пограничного слоя атмосферы до 800–1000 метров и уменьшением объема выбросов от основных сезонно-зависимых источников загрязнения атмосферы в регионе (теплоэнергетики).

Несмотря на схожую внутригодовую изменчивость, в измерениях отмечались существенные различия в абсолютных значениях. Среднемесячные концентрации оксидов азота на станции «Иркутск» варьировали в пределах от 4 до 70 мкг/м^3 для NO , и от 4 до 82 мкг/м^3 для NO_2 , при средних 15 и 21 мкг/м^3 соответственно. На ст. «Листвянка» концентрации изменялись в пределах от 1 до 5 мкг/м^3 для NO и от 1 до 15 мкг/м^3 для NO_2 (средние – 2 и 5 мкг/м^3). Подобные различия в абсолютных значениях связаны с тем, что основными источниками этих компонентов в атмосфере являются выбросы автомобильного транспорта, загрязнения от которых в большей мере распространяются вблизи от источника [301]. Иркутск с более 600 тыс. населением имеет на несколько

порядков большее количество транспортных средств, чем п. Листвянка, хотя и в этом большом туристическом поселке, ограниченном горами и озером, их достаточно много. Еще одной особенностью является то, что в п. Листвянке содержание NO_2 значительно выше, чем NO , что связано с трансформацией оксида азота в диоксид в результате реакций с атмосферным озоном в процессе переноса от источников в ЦЭЗ оз. Байкал.

Разница между концентрациями диоксида серы менее существенна: концентрации изменяются в пределах от 3 до 44 мкг/м^3 (со средним значением 13 мкг/м^3) на ст. «Иркутск», и от 4 до 38 мкг/м^3 , при средней величине 18 мкг/м^3 на ст. «Листвянка».

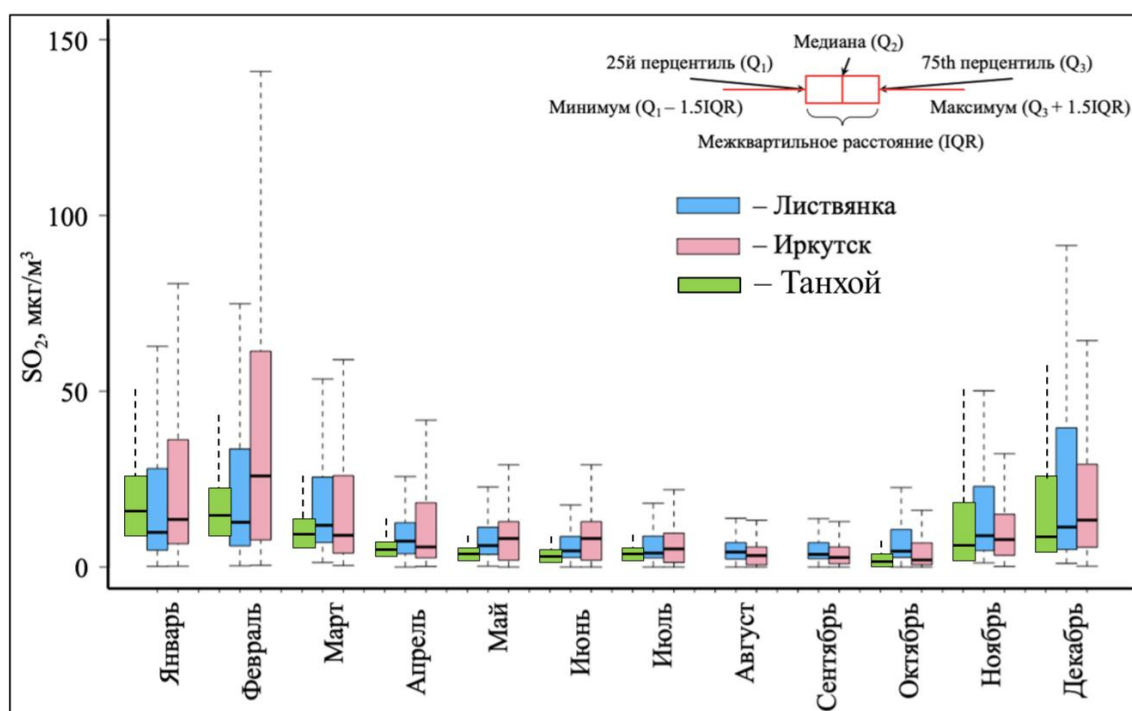


Рисунок 4.2 – Внутригодовая изменчивость концентраций диоксида серы (SO_2) на станциях «Иркутск» и «Листвянка» в 2020–2023 гг., без нетипичных значений (выбросов). По оси ординат отложены значения концентраций (в мкг/м^3), по оси абсцисс – месяц. На диаграмме отражены медиана (жирная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика») и третья квартиль (верхняя граница «ящика»)

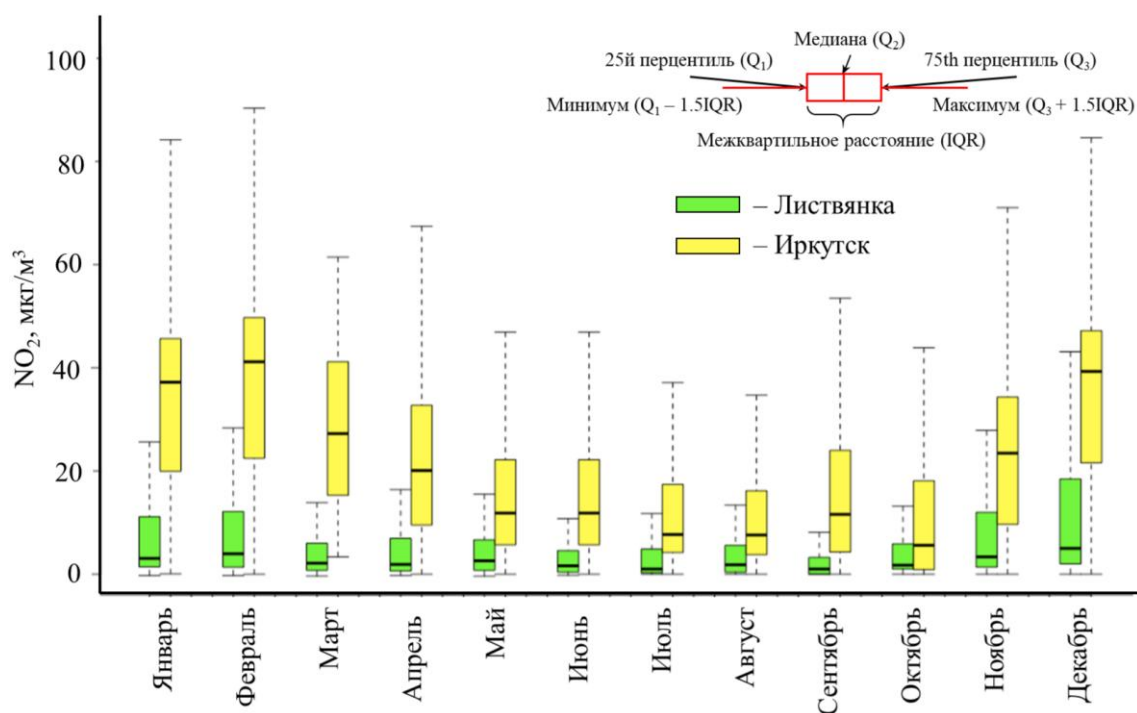


Рисунок 4.3 – Внутригодовая изменчивость концентраций диоксида азота (NO_2) на станциях «Иркутск» и «Листвянка» в 2020–2023 гг., без нетипичных значений (выбросов). По оси ординат отложены значения концентраций (в мкг/м^3), по оси абсцисс – месяц. На диаграмме отражены медиана (жирная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика») и третья квартиль (верхняя граница «ящика»)

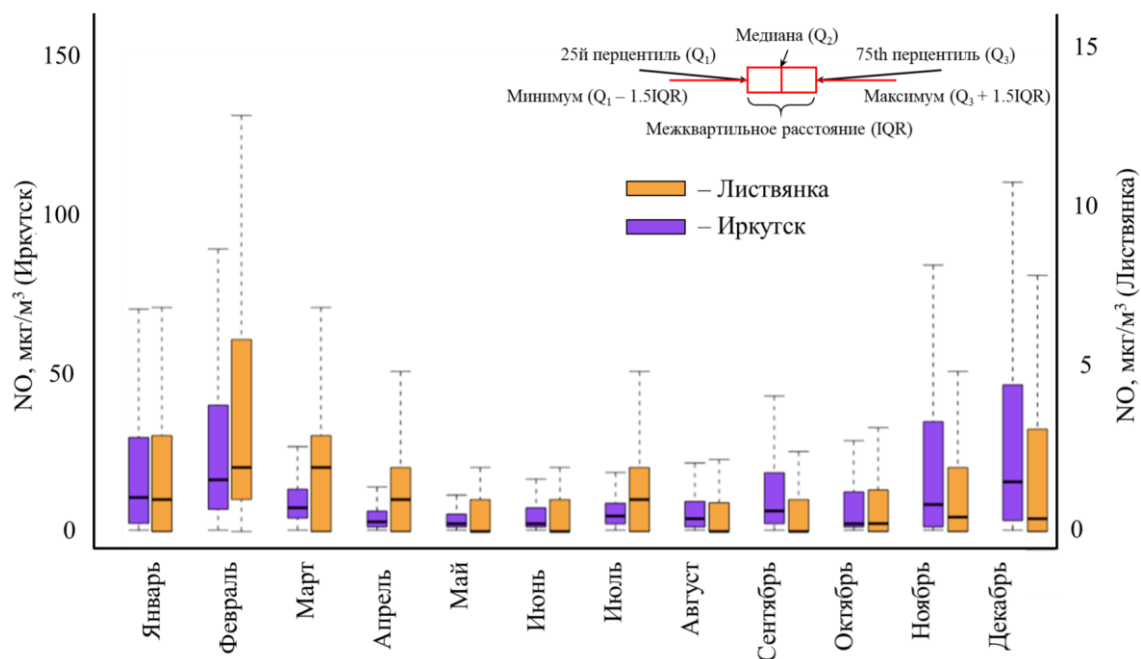


Рисунок 4.4 – Внутригодовая изменчивость концентраций оксида азота (NO) на станциях «Иркутск» и «Листвянка» в 2020–2023 гг., без нетипичных значений (выбросов). По оси ординат отложены значения концентраций (в мкг/м^3), по оси абсцисс – месяц. На диаграмме отражены медиана (жирная линия), первая квартиль (нижняя граница «ящика») и третья квартиль (верхняя граница «ящика»)

4.1.1.2 *Еженедельные и суточные вариации SO_2 , NO и NO_2*

На рисунке 3.14 показаны суточный и недельный ход концентраций оксидов серы и азота на опорных станциях мониторинга «Иркутск» и «Листвянка». В суточном и недельном ходе также имеется ряд существенных отличий между станциями. На суточную изменчивость газовых примесей в основном влияют пространственно-временная динамика пограничного слоя атмосферы и интенсивность выбросов из источников. Глубина пограничного слоя атмосферы обладает характерной суточной изменчивостью и тесно связана с нагревом поверхности солнечным излучением. На ст. «Иркутск» отмечается два характерных повышения концентрации оксидов азота, регулярно проявляющихся с понедельника по пятницу: утренний, в промежутке с 8 до 10, и вечерний, с 18 до 19 часов. Утренний пик концентрации оксидов азота в крупных городах хорошо объясняется глубиной пограничного слоя атмосферы и наибольшей загруженностью транспортной сети города в утренние часы. После 11–12 часов наблюдается дневное снижение концентраций оксидов азота, связанное с увеличением глубины пограничного слоя атмосферы, что приводит к более быстрому рассеиванию примесей в атмосфере, и уменьшением объема антропогенных выбросов от автотранспорта. Второй суточный пик (с 18 до 19 часов) также связан с ростом количества автотранспорта на улицах города во время вечерних пробок.

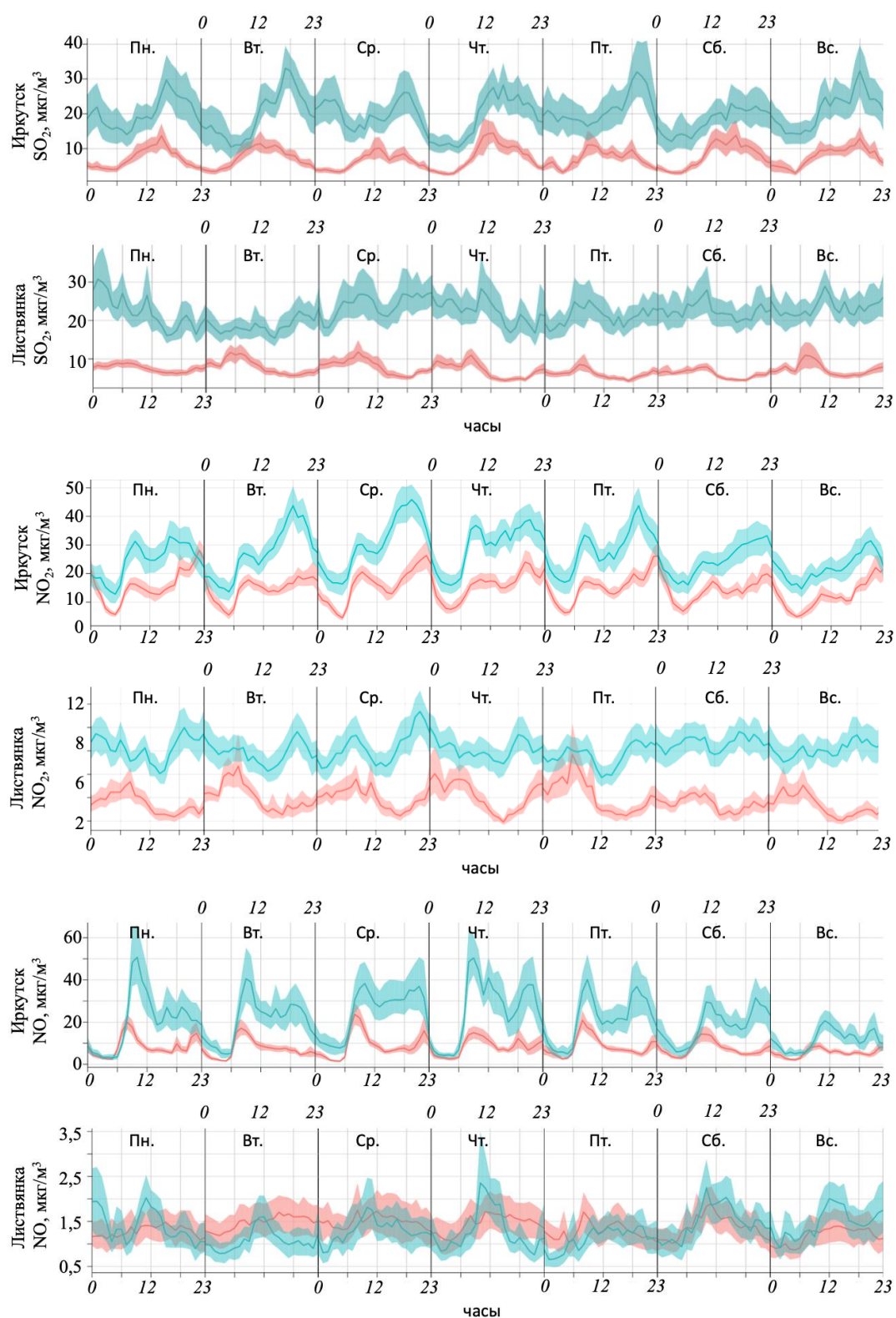


Рисунок 4.5 – Недельный и суточный ход концентраций оксидов азота и серы в отопительный (октябрь–апрель, синий) и неотопительный (май–сентябрь, красный) периоды в Иркутске и Листвянке. Затенение показывает 95 % доверительный интервал среднего значения.

На ст. «Листвянка» наблюдается обратная картина – повышение концентраций оксидов азота регистрируется в нерабочие дни. Возрастание концентраций оксидов азота в выходные дни, по сравнению с рабочими днями, связано с резким увеличением числа автомобильного транспорта в самом крупном туристическом поселке на побережье Южного Байкала. Поскольку в поселке нет крупных промышленных объектов, и в нем проживает небольшое количество населения (менее 2 тыс. человек, по состоянию на 2021 г.), то, вероятно, основной вклад в загрязнение атмосферы п. Листвянка оксидами азота круглогодично вносит автомобильный транспорт, с добавлением летом выбросов от многочисленных судов, фрахтуемых в Лиственничном заливе, и региональный перенос загрязненных воздушных масс [302].

4.2 Влияние структуры воздушных движений на микрофизические свойства атмосферы над ст. Листвянка

В настоящей главе приведены результаты анализа данных измерений приземных концентраций SO_2 на ст. «Листвянка», выполненных с 12.08.2023 г. по 20.10.2023 г. Время усреднения концентраций SO_2 составило 10 мин. Для определения вертикальных профилей метеорологических характеристик мы использовали ассимилированные ежечасные данные реанализа ERA-5 на различных изобарических поверхностях. Переход от уровней давления к высотам выполнялся в приближении модели стандартной атмосферы. Помимо полуэмпирических ассимилированных данных реанализа ERA-5 для анализа структуры приземной турбулентности использовались данные мачтовых измерений акустической метеосистемы «Метео-2». Частота записи метеорологических характеристик составила 10 Гц. В результате обработки «мгновенных» значений температуры и скорости ветра получены усредненные по времени за 10 минутные интервалы, статистические оценки кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока температуры.

До настоящего времени отсутствуют детальные исследования структуры атмосферных движений с высоким временным и вертикальным разрешением над ст. «Листвянка», которые основывались бы на синхронных данных измерений вертикальных профилей скорости ветра, оптических и турбулентных атмосферных характеристик, а также концентраций атмосферных примесей. С целью определения вертикальных профилей скорости ветра над ст. «Листвянка» мы использовали ежечасные данные реанализа пятого поколения ERA-5, обладающего сравнительно высоким пространственным разрешением. Разрешение реанализа ERA-5 по горизонтали составляет порядка 30 км по вертикали, данные о метеорологических характеристиках доступны для 37 изобарических уровней. На рисунке 4.6 продемонстрированы вертикальные профили скорости ветра за исследуемые сутки, 21 и 22 августа 2023 г.

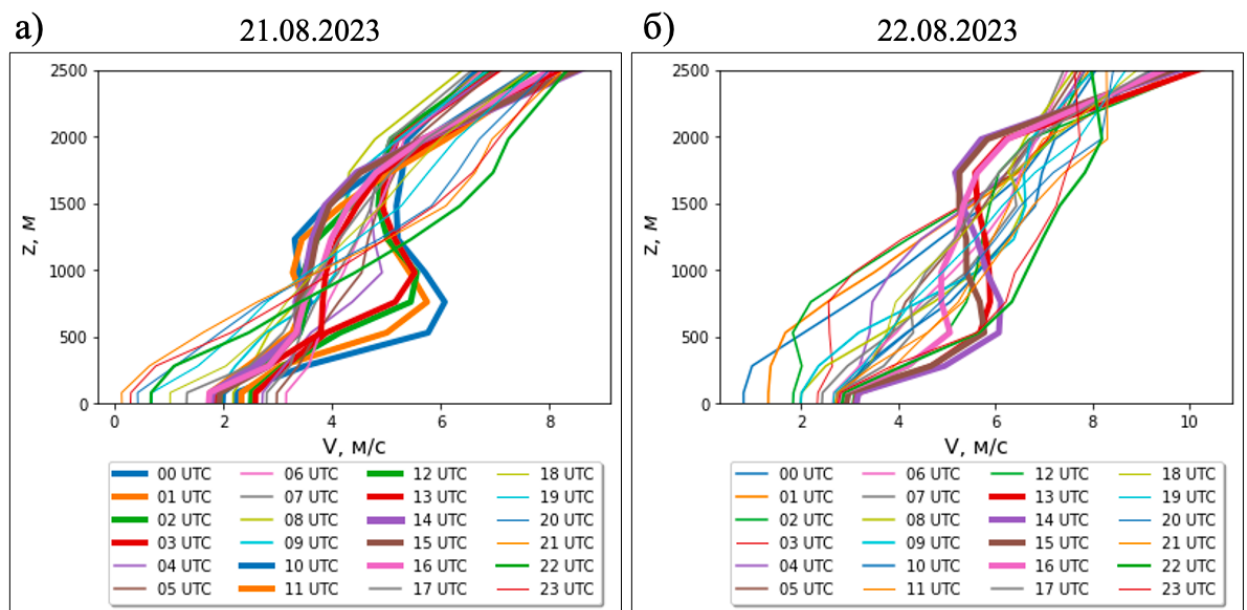


Рисунок 4.6 —. Пример вертикальных профилей скорости ветра над ст. «Листвянка», а) 21.08.2023 г.; б) 22.08.2023 г.

Для минимизации влияния термических инверсий на результаты расчетов были выбраны атмосферные ситуации, близкие к безразличной термической стратификации (Рисунок 4.7). Анализ вертикальных профилей температуры воздуха указывает на ее уменьшение с высотой над подстилающей поверхностью

в дневное время. В ночное время также наблюдалось слабое термическое выхолаживание нижних атмосферных слоев и отсутствие термических инверсий. Структура воздушных течений над ст. «Листвянка» сложна. В вертикальных профилях скорости ветра выделяются определенные пики, соответствующие положениям струйных мезомасштабных течений. Примечательно, что по данным реанализа ERA-5, время существования струйных течений в августе 2023 г. изменялось от 3 до 8 часов, а их высотные положения соответствовали уровням 400–700 м. Это в достаточной степени согласуется с телескопическими и лидарными исследованиями, проводимыми ранее в летнее время [303, 304].

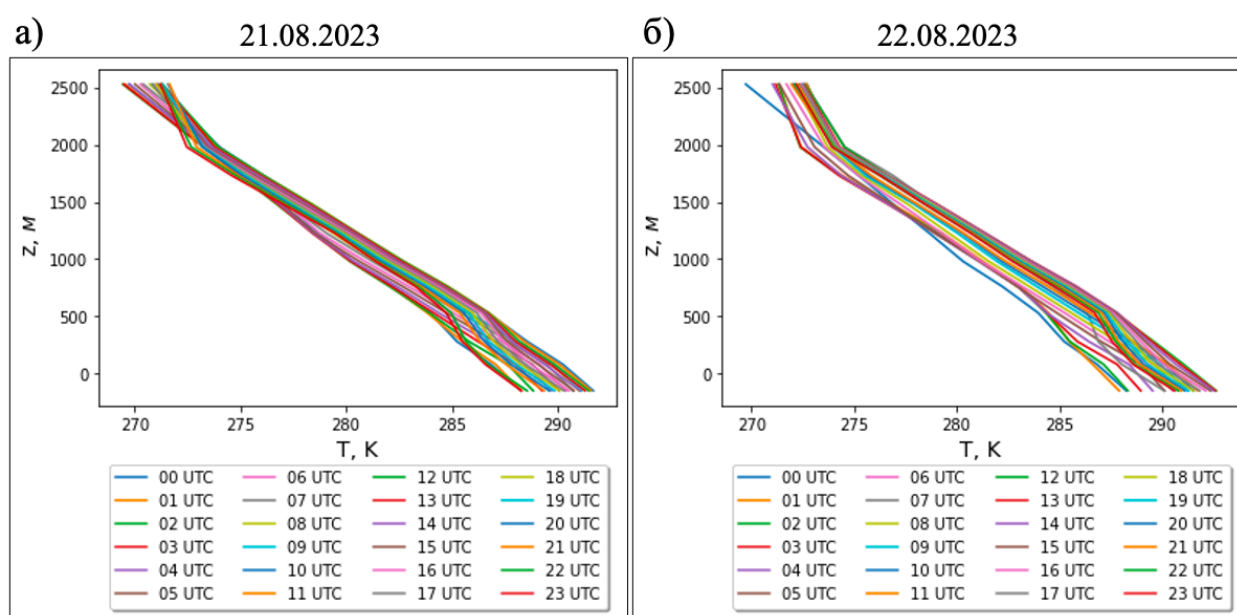


Рисунок 4.7 – Пример вертикальных профилей температуры воздуха над ст. «Листвянка», а) 21.08.2023 г.; б) 22.08.2023 г.

В рамках настоящих исследований выполнен анализ характеристик струйных течений, атмосферной завихренности в области под струйными течениями и приземной концентрации SO_2 . Однозначной связи между интенсивностью воздушного потока на оси струи и концентрацией SO_2 фактически не наблюдается. Как мы увидим ниже, концентрация в приземном слое в большей степени связана с состоянием развитости турбулентности под

струйным течением в периоды преобладания отрицательных вертикальных турбулентных потоков температуры воздуха.

Для сопоставления временных измерений концентраций SO_2 с другими атмосферными характеристиками на рисунках 4.8 а и 4.9 а показаны примеры изменений концентрации, полной кинетической энергии турбулентности и вертикальных турбулентных потоков температуры воздуха, соответственно, за 21 и 22 августа 2023 г. Анализ рисунков показывает, что, на первый взгляд, зависимость между концентрацией SO_2 и атмосферной турбулентностью отсутствует. Тем не менее, в атмосфере часто наблюдаются атмосферные ситуации, когда такую связь можно установить. Проведенный анализ поля ветра (рисунки 4.8 б и 4.9 б) указывает на то, что в обоих случаях повышения концентраций диоксида серы связаны с привнесением в атмосферу ст. «Листвянка» воздушных масс, оказавшихся под влиянием источников Иркутской агломерации. Из рисунка 4.8 в видно, что 21 августа воздушные массы сформировались над промышленными районами Иркутской области и, попав в котловину Южного Байкала, затянулись на станцию благодаря внутрикотловинной циркуляции. Поэтому, несмотря на район формирования воздушных масс, максимум концентрации оксидов серы (Рисунок 4.8 а) был зафиксирован при слабых ветрах юго-западного направления, а полная кинетическая энергии турбулентности находилась в околонулевом диапазоне значений.

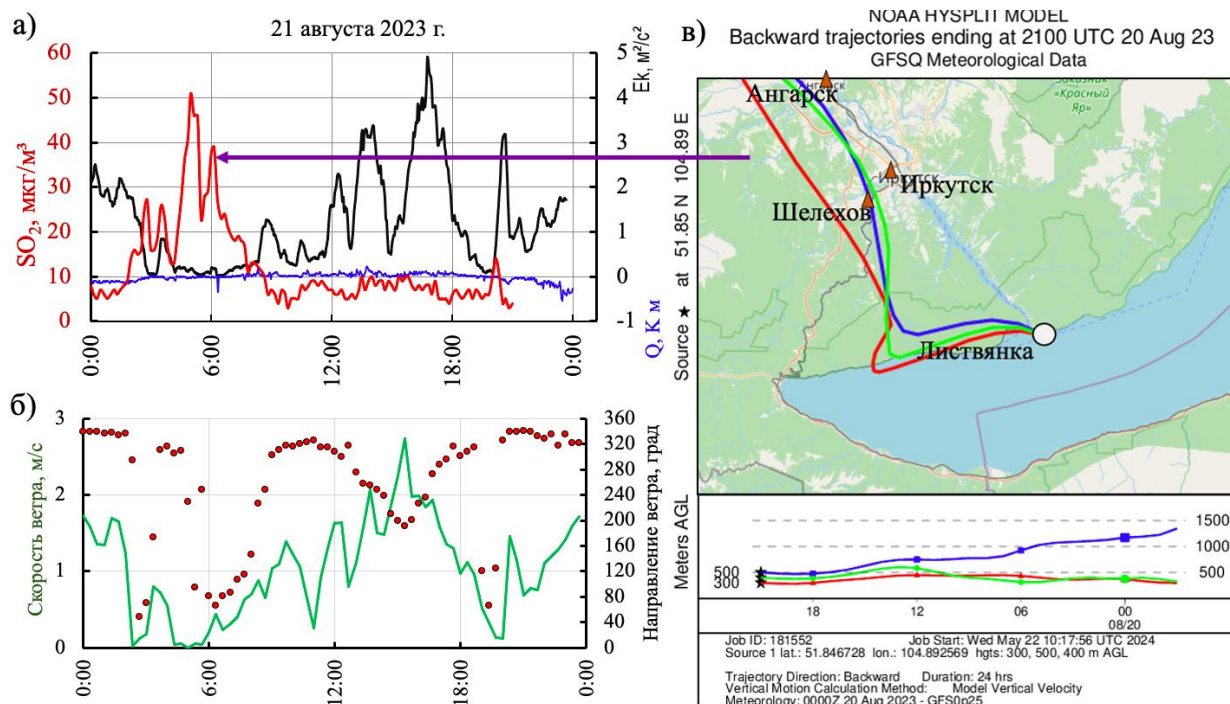


Рисунок 4.8 – а) Пример изменений концентрации SO_2 (красная линия) и полной кинетической энергии турбулентности E_k (черная линия) при положительных и близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры воздуха Q_T (синяя линия) 21.08.2023 г.; б) изменчивость приземной скорости (зеленая линия) и направления ветра (красные круги) 21.08.2023 г.; в) обратная траектория движения воздушных масс 21.08.2023 г. в 5:00 М.В.

При рассмотрении метеорологической ситуации 22 августа (Рисунок 4.9 б) на станции преобладал ветер в секторе 295–340 градусов, что соответствует прямому направлению «Иркутск – Листвянка». А максимум концентрации зарегистрирован при отрицательных вертикальных потоках (Рисунок 4.9 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 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 мезомасштабных струйных течений, наблюдающихся на разных высотах в нижнем 0,2–2,5 км слое атмосферы. В частности, наш 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 [305]. Отметим, что 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 приземном слое атмосферы и, более того, непосредственно под струйным течением на высотах 300–400 м. На рисунке 4.10 показаны вертикальные профили завихренности атмосферных течений за 22.08.2023 г., для случая, когда наблюдалась связь между изменениями концентраций SO_2 и кинетической энергии турбулентности в приземном слое. Рост интенсивности динамической турбулентности под струей, вероятно, определяет процессы ослабления и разрушения струи, а также «осаждения» SO_2 .

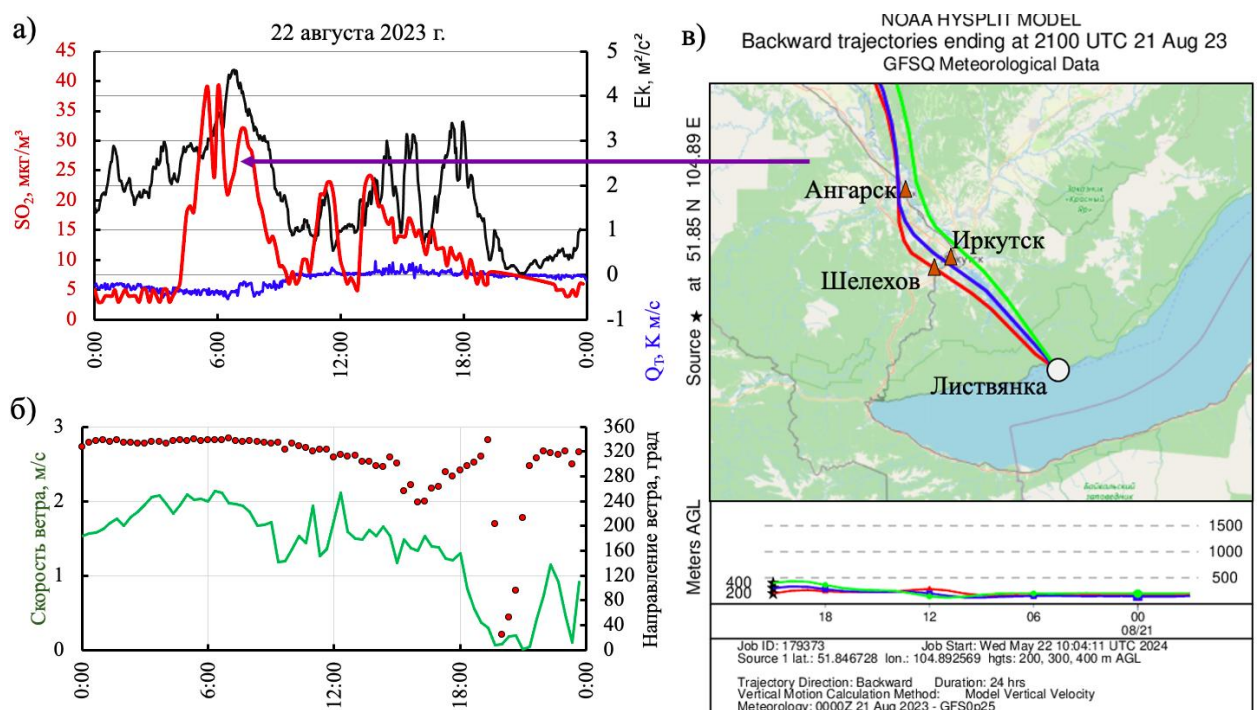


Рисунок 4.9 – а) Пример изменений концентрации SO_2 (красная линия) и полной кинетической энергии турбулентности E_k (черная линия) при положительных и близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры воздуха Q_T (синяя линия) 21.08.2023 г.; б) изменчивость приземной

скорости (зеленая линия) и направления ветра (красные круги) 22.08.2023 г.; в) обратная траектория движения воздушных масс 22.08.2023 г. в 5:00 М.В.

Ввиду сложности организации комплексных приземных измерений и сопровождающих их дистанционных профилометрических измерений требуется найти некоторые потенциальные индикаторы воздействия мезоструйных течений на приземные концентрации SO_2 . При развитии динамической турбулентности (перемешивания по вертикали) в достаточно толстом атмосферном слое и наличии мезоструй в пределах нижнего ~ 500 м слоя атмосферы таким «приземным» индикатором может служить величина вертикального турбулентного потока температуры воздуха. В частности, вертикальный турбулентный поток температуры воздуха в области отрицательных его значений должен свидетельствовать о переносе турбулентных объемов воздуха из более холодных верхних атмосферных слоев в более теплые нижние слои атмосферы. Таким образом, вертикальный турбулентный поток температуры в приземном слое атмосферы является ключевым индикатором, определяющим возможность положительной корреляции между приземной концентрацией SO_2 и полной кинетической энергией турбулентности. Положительные коэффициенты корреляции (0,6–0,8) между этими величинами наблюдаются при отрицательных вертикальных потоках температуры воздуха, когда турбулентные объемы воздуха движутся от некоторого верхнего более холодного слоя к нижнему. При этом амплитуда нисходящих турбулентных потоков температуры воздуха определяет некоторый характерный масштаб расстояния до атмосферного слоя. С развитием положительных турбулентных потоков температуры линейная связь между приземной концентрацией SO_2 и полной кинетической энергией турбулентности теряется. Такой сценарий наблюдается, по крайней мере, на фоне мезомасштабных струйных течений в нижних слоях атмосферы и связанных с ними вихревой составляющей атмосферных течениях.

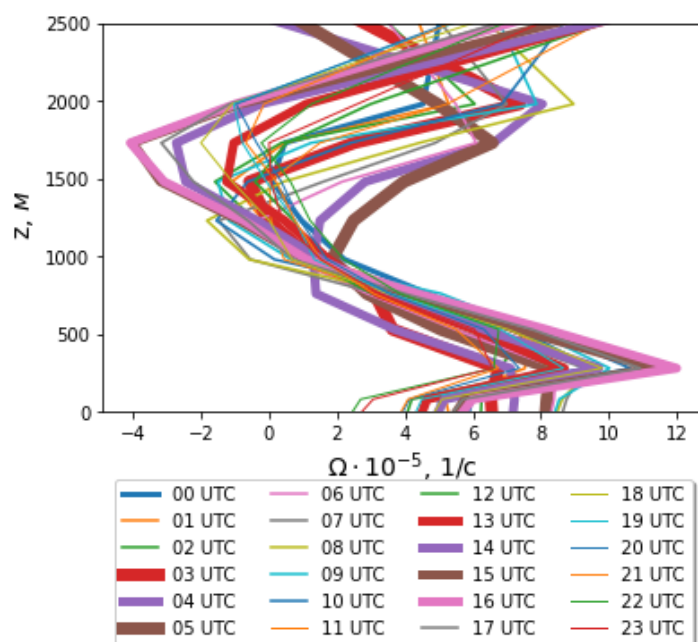


Рисунок 4.10 – Вертикальные профили завихренности атмосферных течений над ст. «Листвянка», 22.08.2023 г.

В результате анализа типичных атмосферных ситуаций, связанных с появлением пиков средней амплитуды ($30\text{--}50 \text{ мкг/м}^3$) в концентрации SO_2 , получены следующие выводы:

1) По данным реанализа ERA-5 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.

2) 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 SO_2 имеет тенденцию к увеличению. При положительных или близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры атмосферная турбулентность приводит к противоположному эффекту: на фоне интенсивного перемешивания воздуха концентрации SO_2 , как правило, остаются на уровне до 10 мкг/м^3 .

4.3 Влияние микрометеорологических особенностей атмосферы на концентрацию примесей в атмосфере над ст. «Листвянка»

Метеорологические процессы определяют перенос примесей от источников, их перемешивание и накопление в приземном слое атмосферы, а также влияют на образование аэрозольных частиц и их физико-химическую трансформацию. В данной главе проведена систематизация данных измерений приземных концентраций аэрозольных и малых газовых примесей на ст. «Листвянка», в зависимости от скорости и направления ветра. На рисунке 4.11 продемонстрировано, что концентрации SO_2 , NO и NO_2 имеют схожий характер изменчивости. Наибольшие концентрации наблюдаются при умеренном, сильном ветре, достигая своего максимума при скоростях 8–10 м/с. При слабых ветрах до (3 м/с) наблюдаются наименьшие концентрации малых газовых примесей. Следует отметить, что при малых скоростях ветра отмечается большое количество нетипичных значений, превышающих медианные в 5–10 раз. Характер распределения аэрозольных частиц имеет некоторые отличия. Основное различие заключается в наличии второго повышения для аэрозольных частиц при штилевых ситуациях.

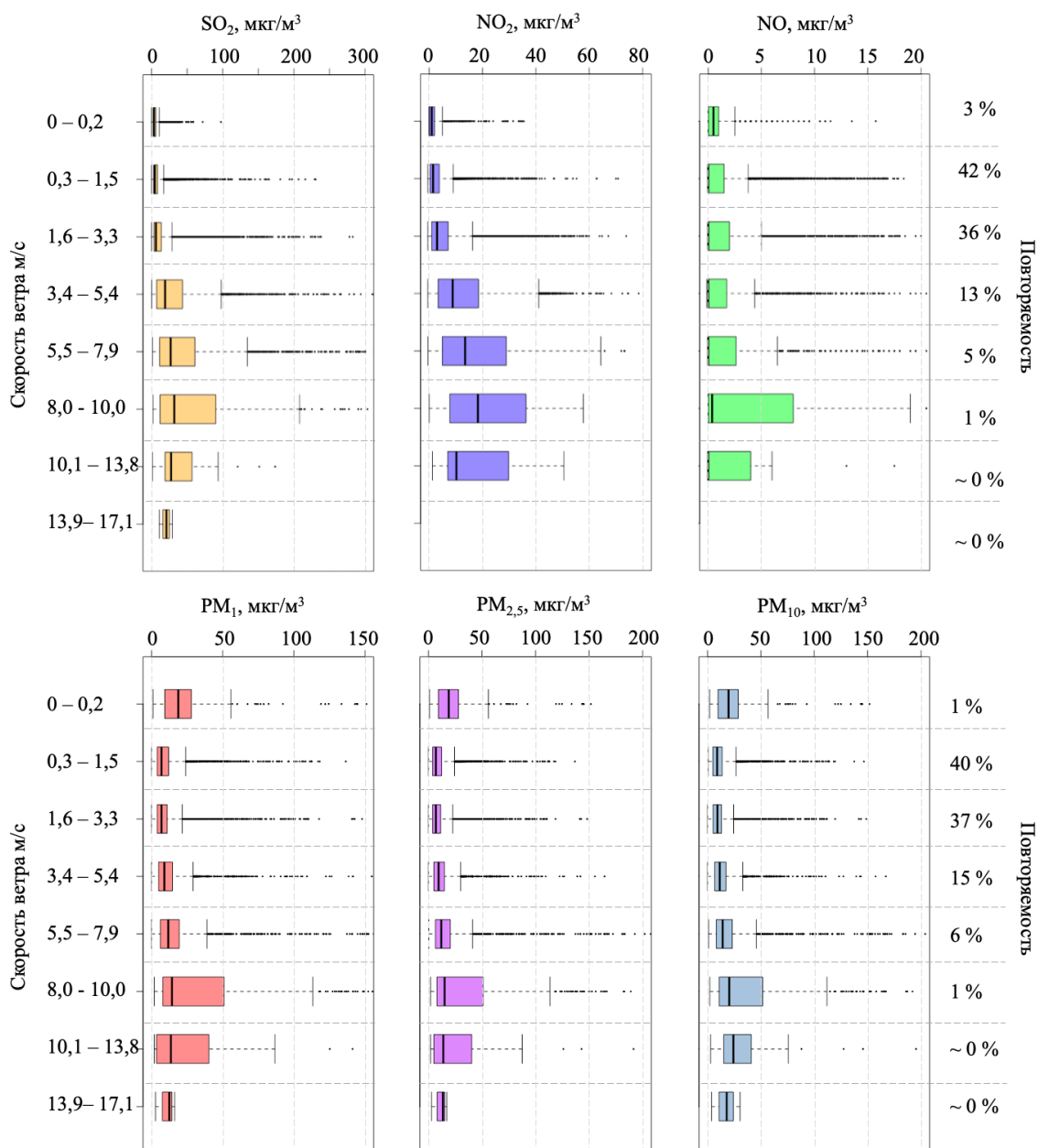


Рисунок 4.11 – Концентрации малых газовых и аэрозольных примесей на ст. «Листвянка» в зависимости от скорости ветра (2021–2023 гг.). По оси ординат отмечены скорости ветра (м/с), по оси абсцисс концентрации примеси (мкг/м³). Жирная линия – медиана, левая граница ящика – первая квартиль, правая граница – третья квартиль. Точки – нетипичные значения, выходящие за пределы 1,5 произведения межквартильного расстояния, % – повторяемость ветров в заданном диапазоне значений

Для систематизации условий, при которых в атмосферу Южного Байкала поступают кислотообразующие газы и твердые частицы, использована непараметрическая рецепторная модель регрессии ветра (NWR), подробно представленная в [306]. Результаты анализа NWR для каждого компонента приведены на рисунке 4.12. Из графика видно, что наибольшие концентрации рассматриваемых примесей регистрируются при ветрах северо-западного направления.

Наибольшие средние концентрации фиксируются при переносе воздушных масс с двух направлений. Первое направление ветра находится в диапазоне 310–340°, со 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, с суммарным объемом выбросов в атмосферу более 322 тыс. тонн/год, из которых 52 % – SO_2 , 14 % – NO_x (Рисунок 2.3). Направление второго пика также соответствует расположению источников Иркутской агломерации. Следует отметить, что смещение пика к западному азимуту может свидетельствовать о том, что в зимний сезон, в дополнение к выбросам от крупных удаленных источников, могут добавляться выбросы коммунально-бытовой котельной, расположенной в поселке Листвянка. Это усиливает уровень фиксируемого нами загрязнения атмосферы на станции. 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, фрахтуемых в Лиственничном заливе, и активизацией наводных транспортных средств.

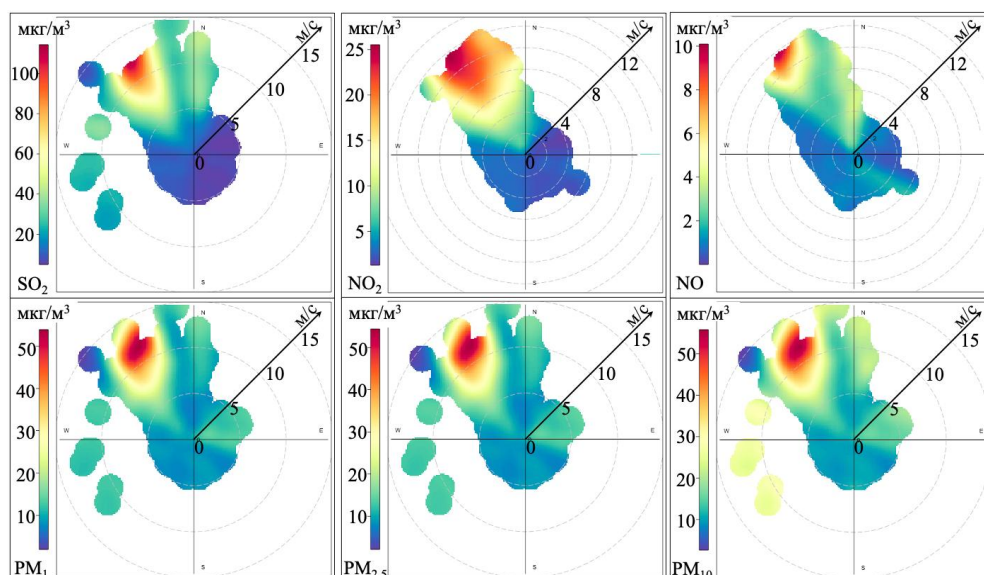


Рисунок 4.12 – NDW анализ малых газовых и аэрозольных примесей на ст. «Листвянка»

На рисунке 4.13 представлен анализ эпизода 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 (Сибирский антициклон), характеризующийся слабыми ветровыми потоками, отсутствием атмосферных осадков и температурой воздуха, на 11–17 °С ниже климатической нормы для декабря.

Подобные условия привели к увеличению объема выбросов от объектов теплоэнергетики и уменьшению потенциала рассеивания атмосферы. На рисунках 4.13 в-е представлена температурная стратификация атмосферы над г. Ангарск 13 и 14 декабря 2023 г. Согласно данным радиозондирования над Ангарском образовалась и сохранялась температурная инверсия на высоте от 138 до 349 метров над поверхностью Земли.. Расчёт показал что воздушные массы от источников гг. Иркутск, Ангарск и Шелехов перемещались в юго-восточном направлении (Рис. 4.14). При этом основные выбросы от источников г. Шелехов перенеслись в 10-15 км юго-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» (Рис. 4.13 а). Это было зафиксировано в виде повышения концентрации диоксида серы 13 декабря в 8:00 м.в. (Рис. 4.13 а) В этот же момент на станции была зафиксирована температурная инверсия с мощностью 200-300 метров и перепадом температуры до 5-6 °С, что ослабило возможность рассеивания примесей в атмосфере (Рис. 4.13 б). Наибольшие среднечасовые концентрации на ст. «Листвянка» 13 декабря 2023 г., были зарегистрированы в промежутке с 4 до 11 часов м. в. и составили $\sim 600 \text{ мкг/м}^3$, с мгновенными значениями 1107 мкг/м^3 . Вечером 14 декабря 2023 г. выбросы от антропогенных источников Иркутско-Черемховского промышленного узла рассеивались юго-западнее станции Листвянка, о чем свидетельствуют расчёты на модели HYSPLIT (Рис 4.14 б). Это привело к снижению концентрации газовых примесей до средних зимних значений.

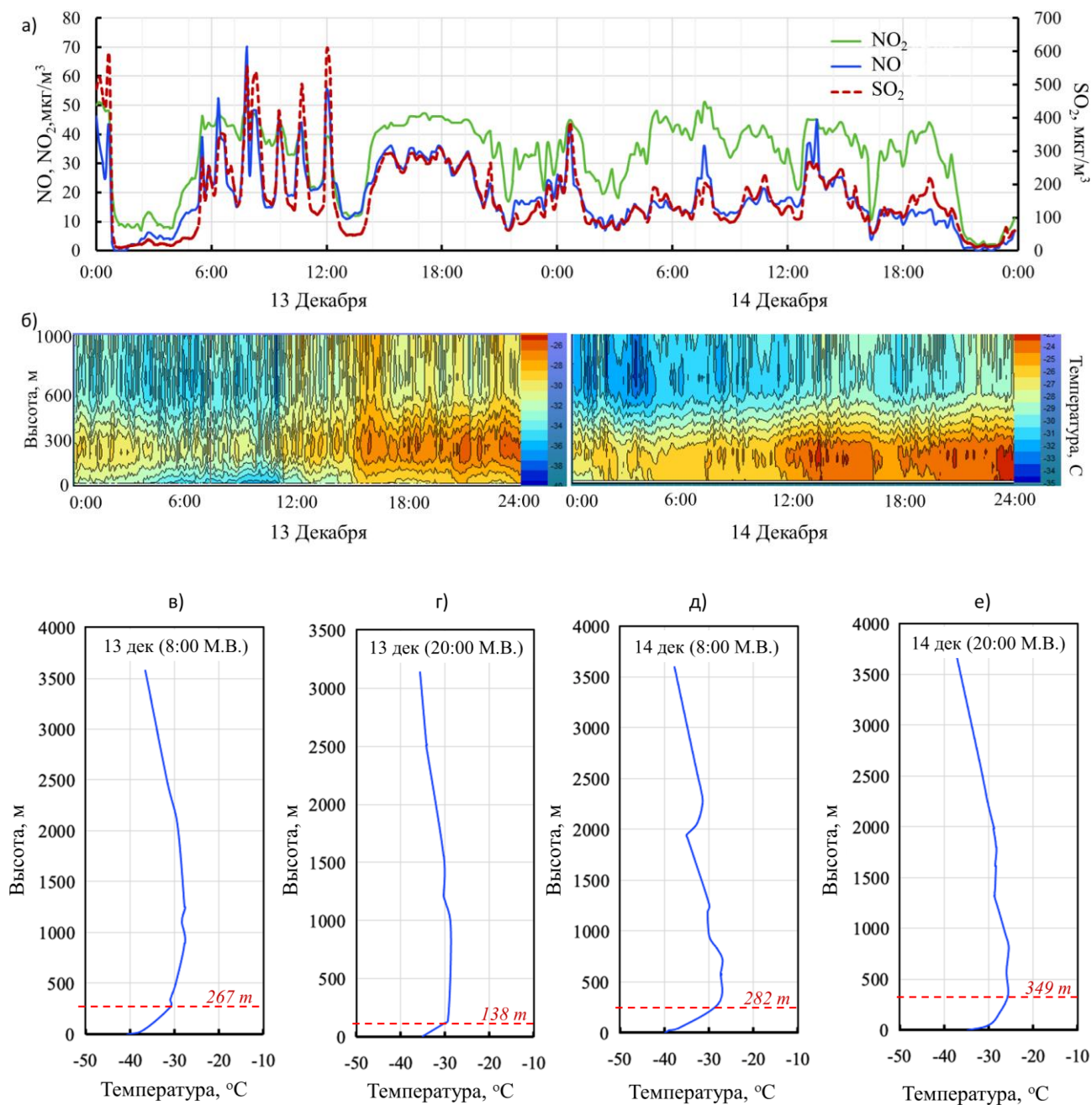


Рисунок 4.13 – Эпизод сильного загрязнения атмосферы на ст. «Листвянка» 13–14 декабря 2023 г. а) 20-минутные концентрации диоксида серы; б) температурная стратификация атмосферы на ст. «Листвянка» 13-14 декабря 2023 г. (по данным измерения профилемера МТП-5); вертикальный профиль температуры на ст. радиозондирования «Ангарск»: в) 13 декабря 2023 г. в 8 м.в.; г) 13 декабря 2023 г. в 20 м.в.; д) 14 декабря 2023 г. в 8 м.в.; е) 14 декабря 2023 г. в 20 м.в.

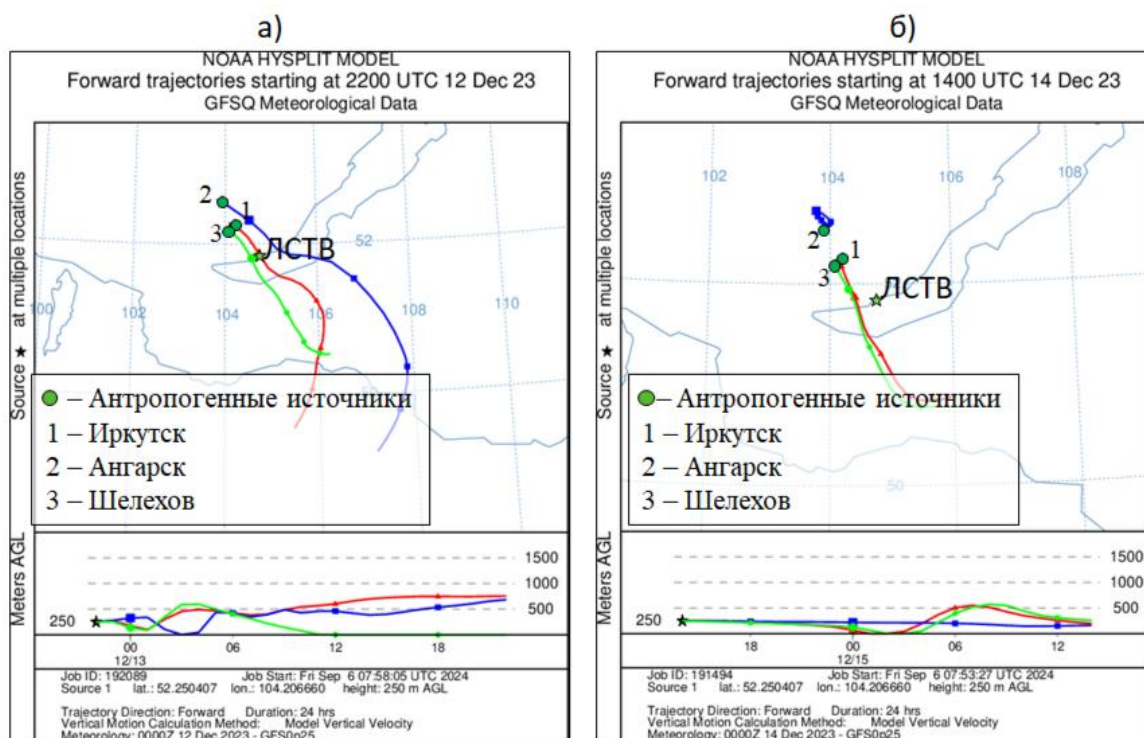


Рисунок 4.14 – Прямые траектории движения воздушных масс от крупных антропогенных источников 13 декабря 2023 г. в 6:00 м.в. и 14 декабря 2023 г. 22:00 м.в.

4.4 Временная изменчивость оксидов серы и азота в атмосфере западного и восточного побережья Южного Байкала в летний период 2023 г

В исследовании рассмотрены результаты анализа данных о концентрации SO_2 , NO и NO_2 в приземном слое атмосферы в районе Южного Байкала, которые были получены в период с 17 по 28 июля 2023 года. На рисунке 4.15 продемонстрированы результаты измерений приземных концентраций оксидов азота и серы на трех станциях мониторинга. Как видно из рисунка 2, наибольшая изменчивость зафиксирована для диоксида серы. Среднечасовые концентрации SO_2 на стационаре «Боярский» изменялись в пределах от 5 до 30 мкг/м^3 , на станции «Листвянка» от 0 до 28 мкг/м^3 . В среднем за период наблюдений концентрации SO_2 на юго-восточном побережье составили 15 мкг/м^3 , на юго-западном – 5 мкг/м^3 , что хорошо согласуется как с измерениями, проведенными в

ходе корабельных экспедиций 2020–2022 гг. [307], так и с наземными измерениями, проведенными на стационаре «Боярский» в 2015 г. [308].

Наибольший размах концентраций оксидов азота также зафиксирован на стационаре «Боярский». Здесь за период наблюдения концентрации диоксида азота повышались до 33 мкг/м^3 , монооксида азота до 7 мкг/м^3 . Как видно из рисунка 4.15-В, на стационаре «Боярский» периодически регистрировались краткосрочные эпизоды подъема концентрации диоксида азота свыше 20 мкг/м^3 .

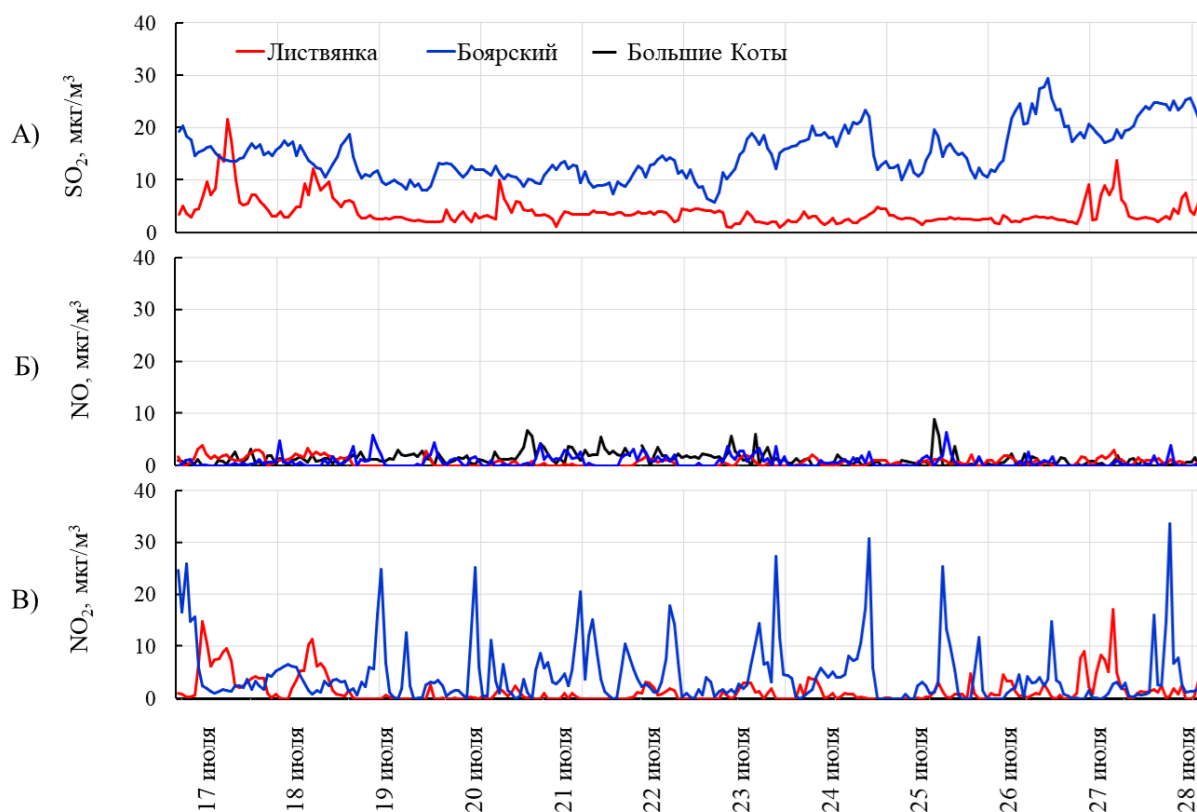


Рисунок 4.15 – Временная изменчивость среднечасовых значений: А) диоксида серы; Б) оксида азота; В) диоксида азота на станциях «Листвянка», «Большие Коты», «Боярский» с 17 по 28 июля 2023 г.

Для оценки влияния метеорологических параметров на содержание примесей в атмосфере для всех станций проведен анализ с использованием рецепторной модели непараметрической регрессии ветра (NWR). В качестве зависимой переменной выбрана 10-минутная концентрация примесей (NO , NO_2 , SO_2), а в

качестве предикторных переменных среднее направление и скорость ветра (Рисунки 4.16 – 4.21).

В результате проведенного анализа было установлено, что наибольшее содержание SO_2 , NO и NO_2 , в приземной атмосфере станции «Листвянка» было зафиксировано в ночные и утренние часы (с 00:00 до 08:00), при ветрах северного и северо-западного направления со скоростями от 1 до 4 м/с. Это связано с тем, что выбросы оксидов азота и серы, распространяющиеся на высотах (со шлейфами ТЭЦ), ввиду уменьшения толщины пограничного слоя атмосферы и ослабления термической конвекции могут опускаться ниже. В дневные часы, в силу нагрева земной поверхности и пограничного слоя атмосферы, усиливается развитие турбулентности, что способствует улучшению условий рассеивания примесей. Ветровой режим становится более разнообразным, что приводит к понижению концентраций оксидов серы и азота до летних фоновых значений Южного Байкала [309]. В суточной динамике оксидов азота выделяется второе повышение с 12:00 до 15:00. Данное повышение возникало при ветрах юго-восточного, южного и юго-западного направлений, что соответствует расположению поселка Листвянка и залива Лиственничный. Вероятными источниками данных газовых примесей могут являться автомобильный и водный транспорт.

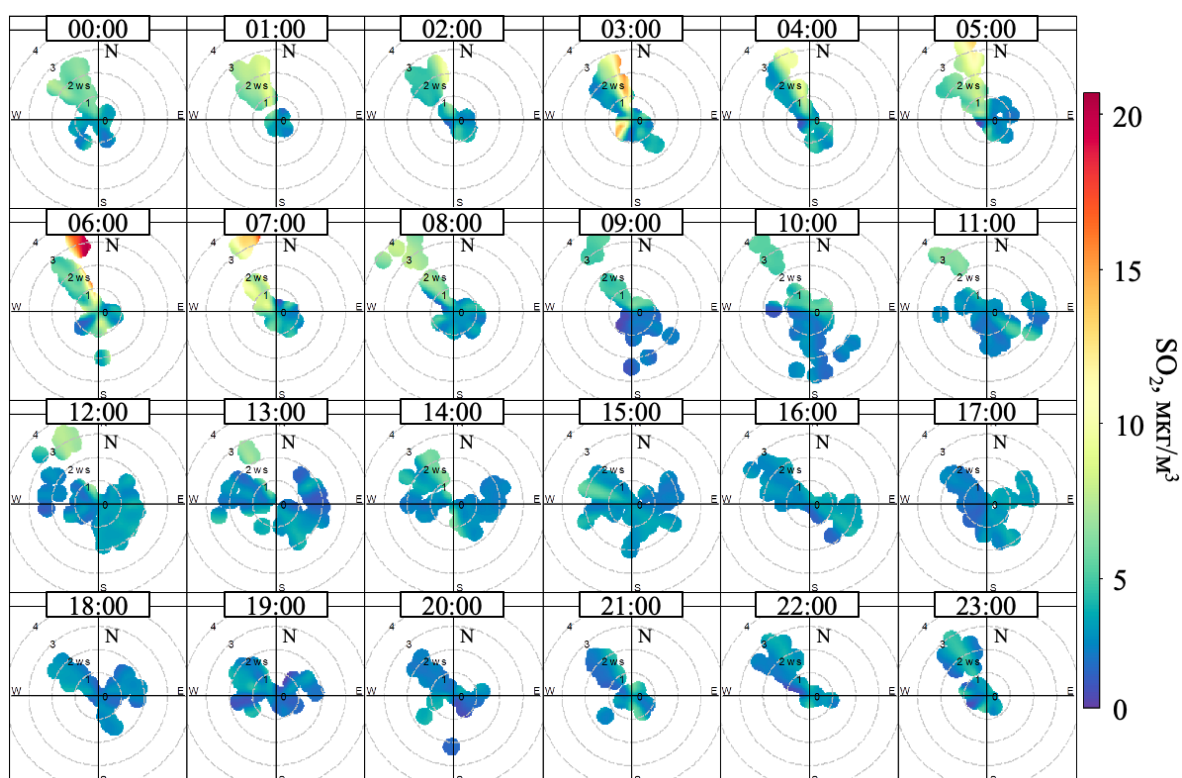


Рисунок 4.16 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций SO_2 в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г.

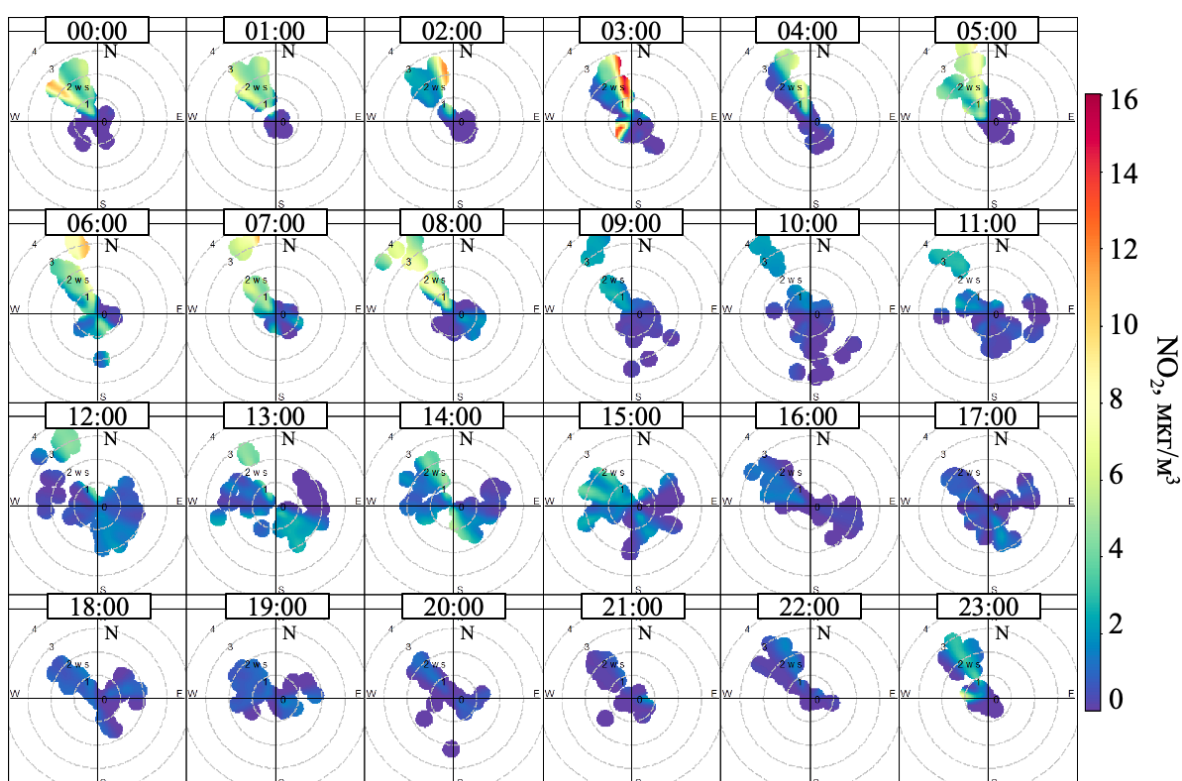


Рисунок 4.17 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO_2 в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г

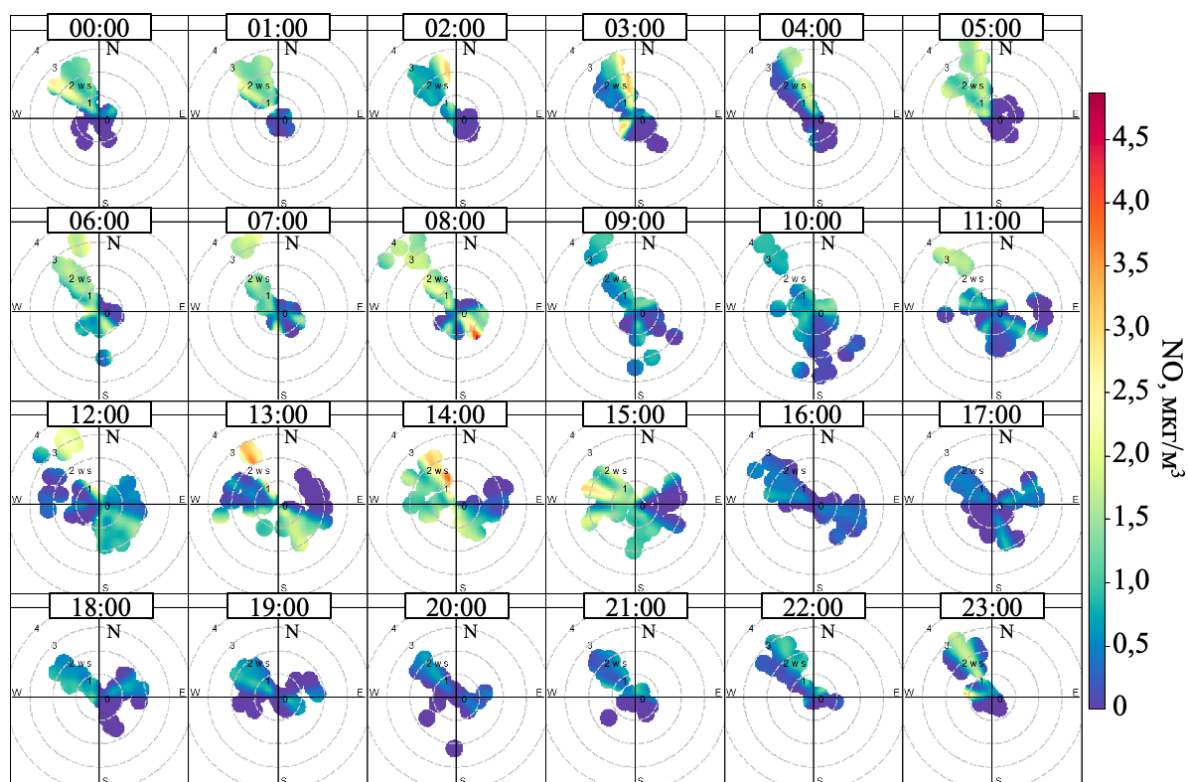


Рисунок 4.18 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г.

На стационаре «Боярский» наибольшие концентрации SO_2 и NO_2 были зафиксированы при ветрах южного и юго-западного направлений. Эти направления соответствуют расположению локальных источников загрязнения атмосферы, которые находятся на юго-восточном побережье озера Байкал (Рисунки 4.19–4.21). Согласно NWR анализу, были выявлены отдельные эпизоды, когда воздушные массы, обогащенные оксидами азота и серы, переносятся с юга вдоль долины реки Мантуриха. Проведенный расчет прямых траекторий движения воздушных масс (Рисунок 4.22) показал, что повышение содержания оксидов серы и азота на стационаре «Боярский» может быть связано с влиянием удаленных источников, расположенных в городе Гусиноозерск.

NWR-анализ, проведенный для NO (Рисунок 4.21), демонстрирует, что концентрация монооксида азота возрастает в период с 7 до 23 часов по местному времени вне зависимости от направления ветра. Это может указывать на то, что

станционар «Боярский» подвержен влиянию локальных источников загрязнения атмосферы, таких как автотранспорт. В ночные часы концентрации NO снижаются до значений, близких к пределу обнаружения прибора.

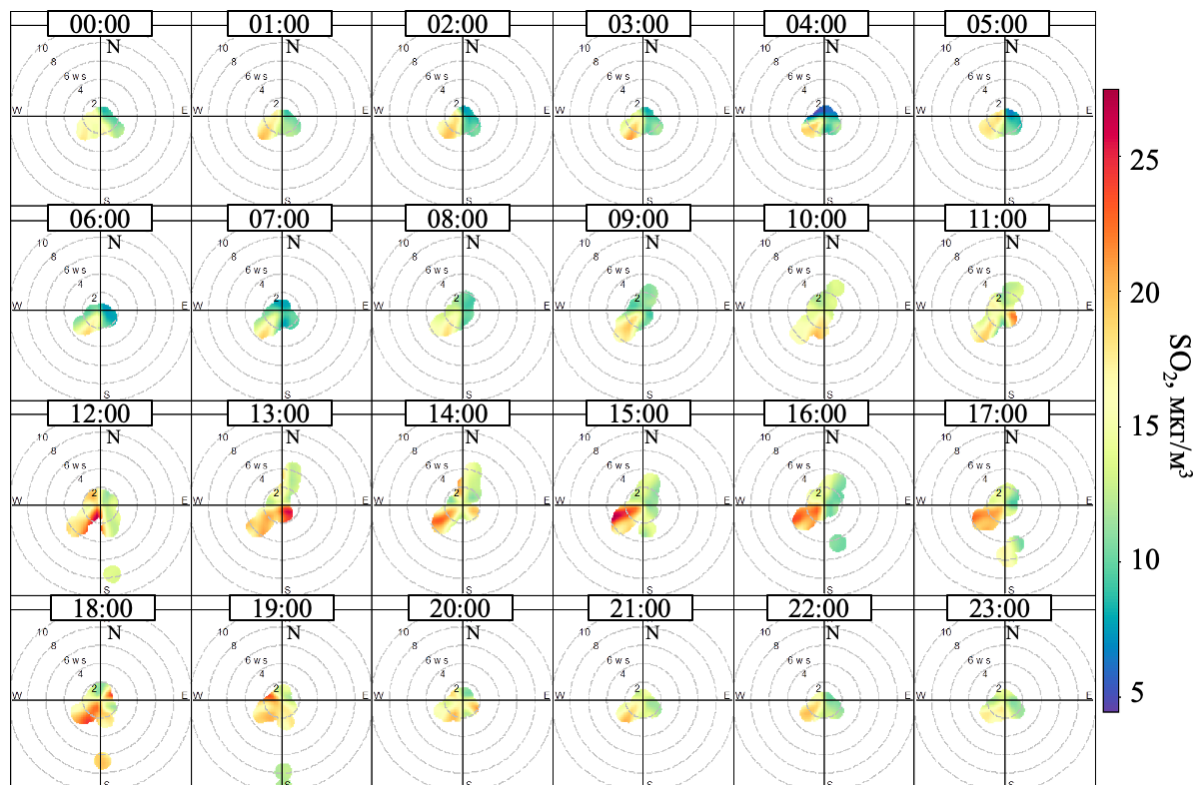


Рисунок 4.19 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций SO₂ в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

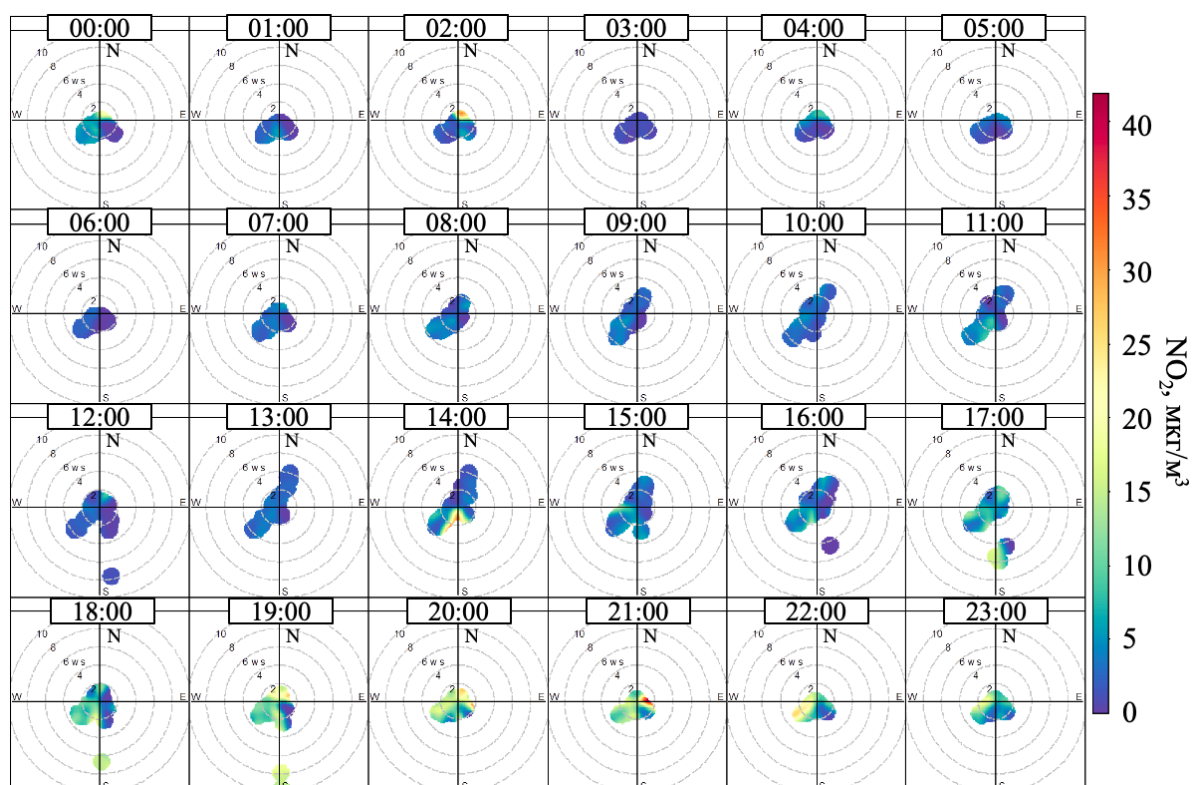


Рисунок 4.20 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO_2 в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

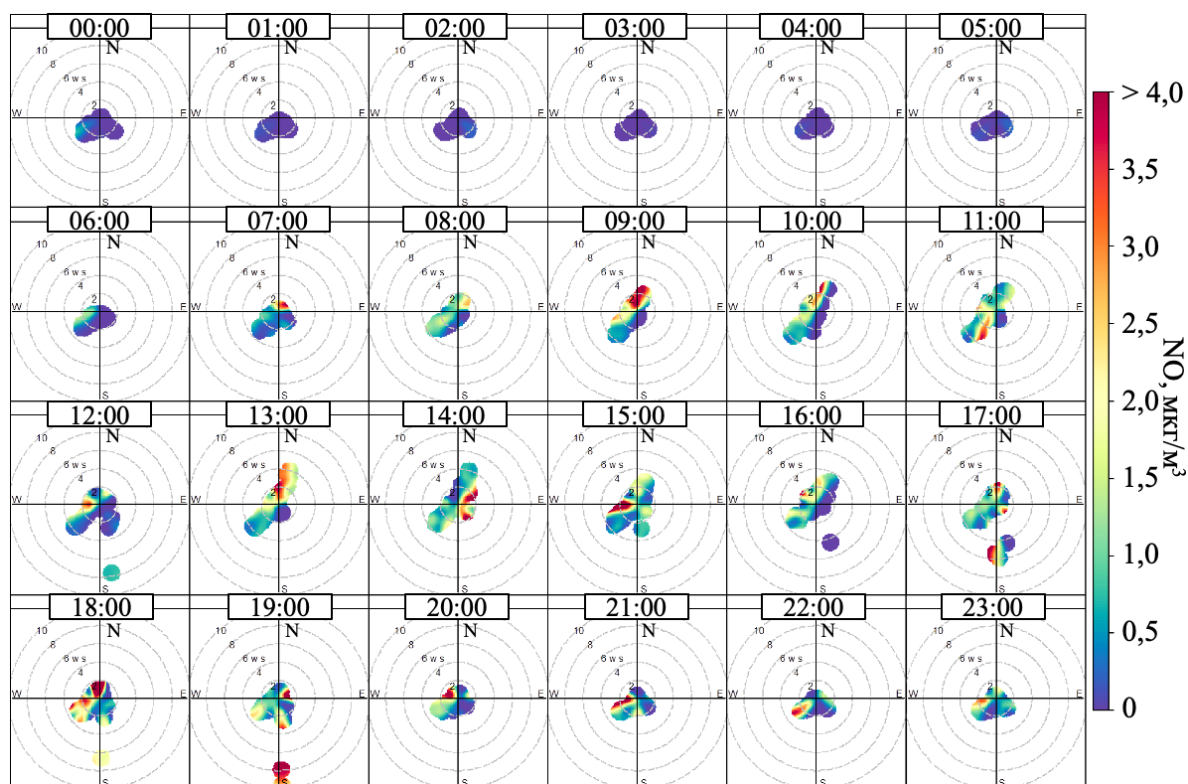


Рисунок 4.21 – NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

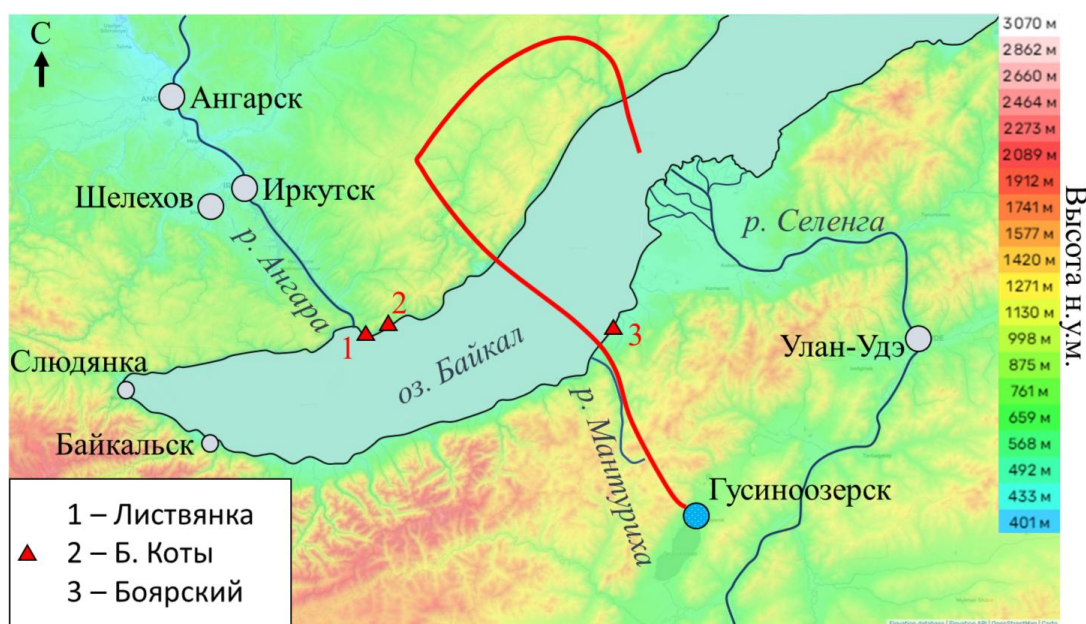


Рисунок 4.22 – Топографическая карта исследуемого региона (<https://ru-topographic-map.com>) и прямая траектория движения воздушных масс от стационарных источников г. Гусиноозерск на высоте 500 м AGL, 20.07.2023 7:00 МВ.

4.5 Временная изменчивость оксидов серы и азота в атмосфере городов-источников Южного Прибайкалья по данным государственной службы мониторинга

Изменчивость среднемесячных концентраций диоксида серы в приземном слое атмосферы на восьми станциях государственного мониторинга Росгидромета в 2021–2022 гг. показана на рисунках 4.23 и 4.24. Пространственно-временное распределение газовых примесей в атмосфере отдельных городов неоднородно. В один и тот же день среднесуточные концентрации могут составлять до ~ 150 мкг/м³ в городе Ангарск, и ~ 1 мкг/м³ в г. Байкальск. Проанализировав рисунки 4.23 и 4.24, видно, что для всех городов, за исключением Ангарска и Байкальска, характерен внутригодовой ход с повышением концентраций газовых примесей зимой (декабрь-февраль) и ярко выраженной депрессией в июле. Наибольшая средняя концентрация диоксида серы за «отопительный» период (с ноября по март) зафиксирована в г. Иркутск (39 мкг/м³), следом идут г. Ангарск (29 мкг/м³),

п. Листвянка (23 мкг/м^3), г. Шелехов (19 мкг/м^3), г. Гусиноозерск и г. Улан-Удэ (17 мкг/м^3). Наименьшие концентрации регистрируются в г. Селенгинск (10 мкг/м^3) и г. Байкальск (3 мкг/м^3). В «неотопительный» сезон (с мая по октябрь) концентрации диоксида серы в разных районах изменяются от 1 мкг/м^3 до 11 мкг/м^3 с наибольшими значениями в Ангарске и Иркутске (10 и 11 мкг/м^3). В городах Гусиноозерск, Шелехов, Улан-Удэ и п. Листвянка концентрации диоксида серы составляют $\sim 5\text{--}6 \text{ мкг/м}^3$. Наименьшие концентрации зарегистрированы в Байкальске и Селенгинске ~ 1 и 2 мкг/м^3 , соответственно.

После проведения анализа внутригодовой изменчивости концентраций SO_2 , в атмосфере на нескольких станциях они были разделены на четыре группы. В первую группу были включены Иркутск, Ангарск и Шелехов. Эти города включают крупные источники загрязнения атмосферы Иркутской области с общим объемом выбросов SO_2 более 120 тыс. тонн/год (Рисунок 2.4). Среднесуточные концентрации в данных городах могут достигать значений $\sim 140\text{--}250 \text{ мкг/м}^3$. Во вторую группу можно включить города, расположенные к востоку от озера, – в Республике Бурятия: Улан-Удэ, Гусиноозерск и Селенгинск. В сумме их выброс составляет ~ 30 тыс. тонн диоксида серы в год. При этом зафиксированные концентрации этого газа в 2–3 раза меньше, чем в городах первой группы. Как показано в предыдущих исследованиях, перенос от Улан-Удэ, Гусиноозерска и Селенгинска осуществляется либо на юго-восток от городов, либо на Среднюю котловину озера (глава 2.8.4). К третьей группе отнесен п. Листвянка. В данном населенном пункте отсутствуют крупные источники поступления диоксида серы в атмосферу, однако, ввиду расположения на пути основного переноса воздушных масс от городов Иркутской агломерации [8], здесь регистрируются концентрации, соизмеримые с городскими. В четвертую группу вошел город Байкальск. В нем регистрируются наименьшие концентрации диоксида серы на исследуемой территории, что вызвано рядом факторов: 1) отсутствие крупных источников загрязнения атмосферы (после закрытия БЦБК в 2013 г.); 2) расположение станции вблизи ($\sim 1 \text{ км}$) от крупного водоема, что

приводит к возрастанию влажности воздуха и ускорению процессов очищения; 3) выпадение в течении 2021 г. более 1500 мм осадков (по данным станции Хамар-Дабан, Таблица 1), что определило высокую интенсивность вымывания примесей; 4) расположение станции в отдалении от основного переноса крупных источников загрязнения атмосферы.

Согласно рисункам 4.17 и 4.18 изменения концентраций диоксида азота происходят по схожей с диоксидом серы закономерности, с максимумом в зимний период и депрессией в летний. Наибольшие среднегодовые концентрации NO_2 зарегистрированы в региональных центрах Иркутск и Улан-Удэ (51 и 47 мкг/м^3 , соответственно), что связано с высокой плотностью населения и присутствием в этих городах большого количества автомобильного транспорта. Также в этих городах имеются крупные теплоисточники и различные промышленные предприятия, выбрасывающие в атмосферу оксиды азота. Наименьшие среднегодовые концентрации NO_2 зафиксированы на станциях «Байкальск» = 7 мкг/м^3 и «Листвянка» = 6 мкг/м^3 . Следует отметить, что в связи с частым проведением регламентных работ на ст. «Байкальск», по ряду данных на станции «Байкальск» возникло множество пробелов. В январе, марте и октябре 2021 и 2022 гг. концентрация NO_2 не регистрировалась на этой станции, что отразилось на среднегодовом значении. Наибольшие концентрация NO_2 , согласно обобщенным данным со станции государственного автоматического контроля атмосферы в Ангарске, зарегистрированы с апреля по июнь, что не характерно для остальных станций в регионе.

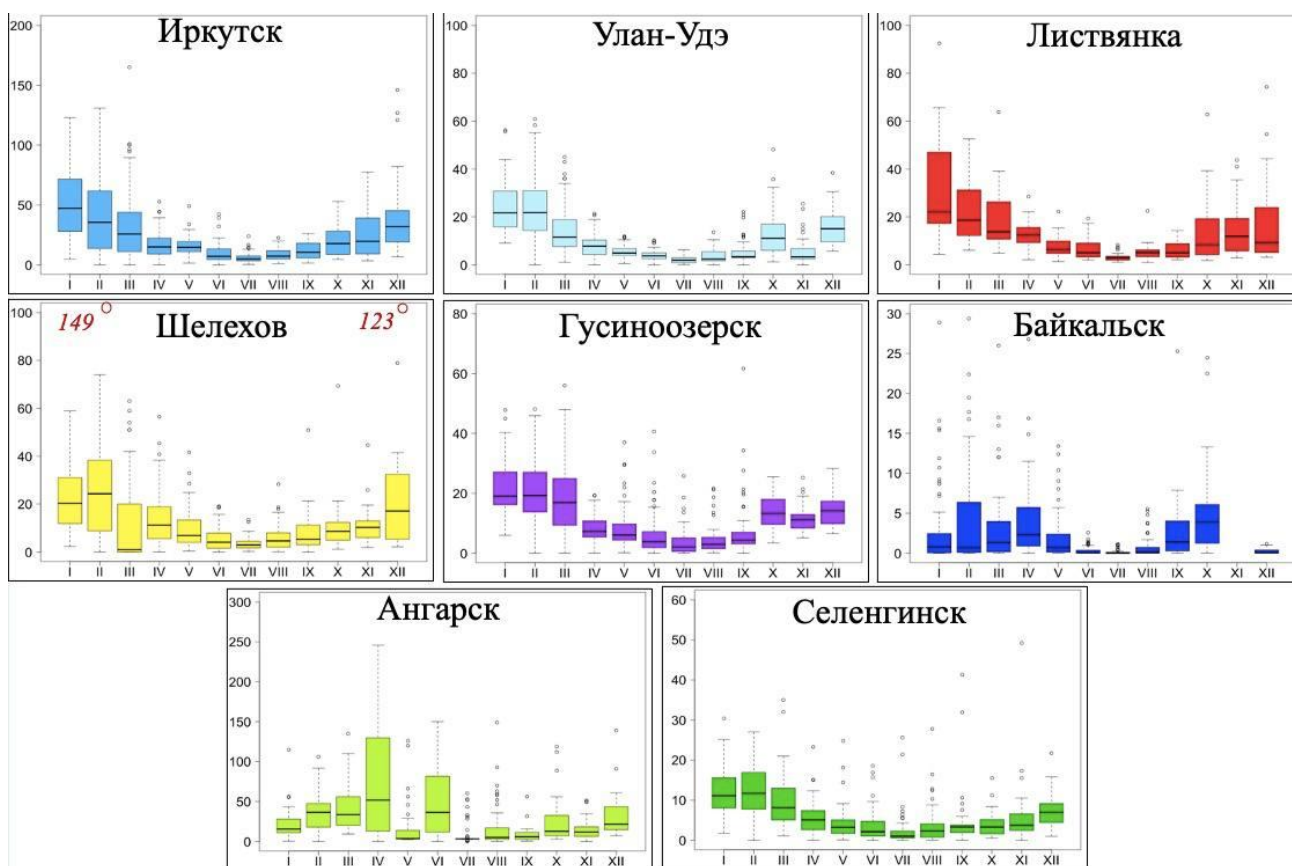


Рисунок 4.23 – Боксплот среднесуточных концентраций SO_2 ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) в приземном слое атмосферы на станциях мониторинга в Байкальском регионе в 2021–2022 гг.

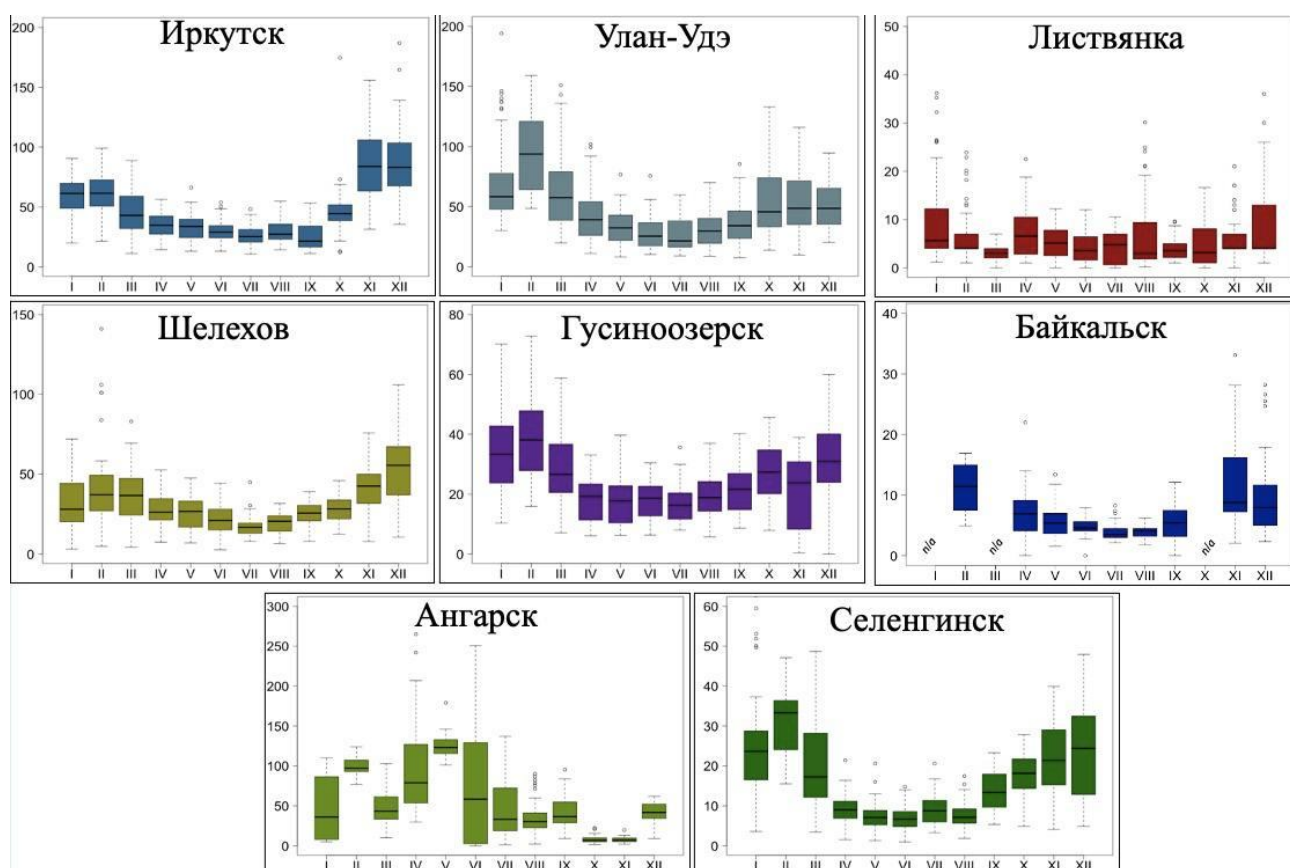


Рисунок 4.24 – Боксплот среднесуточных концентраций NO_2 ($\mu\text{г}/\text{м}^3$), в приземном слое атмосферы на станциях мониторинга в Байкальском регионе в 2021–2022 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 объединяет современные методы экологического мониторинга 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 применен 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, сформировавшихся над этими

городами, зафиксированы 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 подвержена 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.

5. 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 дымовых шлейфов 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 на территории Восточной Сибири.

Список литературы

1 Оболкин В.А., Нецветаева О.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л., Зимник Е.А., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В. Результаты многолетних исследований кислотных выпадений в районе Южного Байкала // География и природ. ресурсы. 2013. № 2. – С. 66-73.

2 Khodzher T.V., Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G., Tomberg I. V. Effect of the acid deposition on aquatic ecosystems in the Eastern Siberia (Russia) // Conference Abstracts 7-th International Conference on Acid Deposition/ Acid Rain 2005. 2005. Prague, Czech republic 2005. – pp. 103.

3 Нецветаева О.Г., Чипанина Е.В., Оболкин В.А. Особенности химии атмосферных осадков Станций Листвянка (Иркутская область) и Приморская (Приморский край) в 2005-2011 гг. // Оптика атмосферы и океана – 2013. – Т.26. – № 6. – С. 466–471

4 Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Нецветаева О.Г. Химический состав снеговых и речных вод юго-восточного побережья озера Байкал // Метеорология и гидрология – 2015. – № 5. – С. 71–83

5 Томберг И.В., Сорокикова Л.М., Нецветаева О.Г., Сезько Н.П., Жученко Н.А. Химический состав и тенденция закисления снеговых вод и вод притоков Южного Байкала // Оптика атмосферы и океана. 2016. – Т. 29. – № 6. – С. 516-520.

6 Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tsydyrov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the Dispersed Composition of Atmospheric Aerosol and Its Relationship with Small Gas Impurities in the Near-Water Layer of Lake Baikal Based on the Results of Ship Measurements in the Summer of 2020 // Atmosphere. 2022. – V. 13. – № 1. – P. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13010139

7 Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I., Netsvetaeva O., Golobokova L. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia //

International Journal of Environmental Studies. 2016. – V. 73. – № 3. – P. 452-461.
DOI: 10.1080/00207233.2016.1165481

8 Кравцова, Л. С., Ижболдина, Л. А., Ханаев, И. В., Помазкина, Г. В., Домышева, В. М., Кравченко, О. С., Грачев, М. А. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук". 2012. Т. 447. №. 2. – С. 227-227

9 Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // Journal of Great Lakes Research. 2018. V. 44. № 2. – p. 230-244

10 Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Ходжер Т. В., Чипанина Е.В. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. – С. 60-65.

11 Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Khodzher T.V. Distribution characteristics of PAHs and solid particles over the water area of lake Baikal during wildfires in summer 2018 // Proceedings of SPIE. 2019. – V. 11208. – P. 1-6. DOI: 10.1117/12.2539014

12 Khodzher T.V., Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Tsydypov V.V., Yakusheva E.P. The atmosphere above the water area of Lake Baikal during wildfires in the summer of 2019 // Limnology and Freshwater Biology. 2020. – № 4. – С. 851-852. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-851

13 Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokova L., Vratolis S., Eleftheriadis K., Khodzher T.

Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal // Journal of Environmental Sciences. 2021. – V. 107. – pp. 49-64

14 Arita A., Costa M. Environmental agents and epigenetics //Handbook of epigenetics. 2011. – pp. 459-476

15 Bellouin N. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change //Reviews of Geophysics. – 2020. V. 58. №. 1. – p. e2019RG000660..

16 Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N. T., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1999. V. 104. №. D24. – pp. 31333-31349.

17 Schuster G. L., Dubovik O., Holben B. N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2006. V. 111. – №. D7

18 Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects //Angewandte Chemie International Edition. 2005. V. 44. №. 46. – pp. 7520-7540.

19 Hoesly R. M., Smith S. J., Feng L., Klimont Z., Janssens-Maenhout G., Pitkanen T., Seibert J. J., Vu L., Andres R. J., Bolt R. M., Bond T. C., Dawidowski L., Kholod N., Kurokawa J.-I., Li M., Liu L., Lu Z., Moura M. C., O'Rourke P. R., Zhang Q. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS) // Geoscientific Model Development. 2018. T. 11. №. 1. – pp. 369-408

20 Pósfai M., Buseck P. R. Nature and climate effects of individual tropospheric aerosol particles //Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2010. V. 38. – pp. 17-43.

21 Seinfeld J. H. et al. Scientific objectives, measurement needs, and challenges motivating the PARAGON aerosol initiative // Bulletin of the American Meteorological Society. 2004. V. 85. №. 10. – pp. 1503-1510.

22 Kristiansen, N. I., Stohl, A., Wotawa, G. Atmospheric removal times of the aerosol-bound radionuclides ^{137}Cs and ^{131}I measured after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident - a constraint for air quality and climate models // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012. V. 12. №. 22. – pp. 10759-10769.

23 Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы. – Л.: 1969. – 10 с.

24 Ивлев Л. С., Довгало Ю. А. Физика атмосферных аэрозольных систем. — СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 5 с.

25 Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л., Гидрометеиздат, 1983. – 121 с.

26 Чекман И.С., Сыровая А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. Аэрозоли – дисперсные системы: Монография // - X: «Цифровая друкарня No1», 2013. – 100 с.

27 Junge C. E. Air: Chemistry and radioactivity // *Int Geophys. Ser.* – 1963.

28 Kelly FJ, Fussell JC. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk // *Environmental geochemistry and health*. 2015. V. 37. – pp. 631-649.

29 Seposo X., Ueda K., Park S. S., Sudo K., Takemura T., Nakajima, T. Effect of global atmospheric aerosol emission change on $\text{PM}_{2.5}$ -related health impacts // *Global health action*. 2019. V. 12. №. 1. – p. 1664130.

30 Southerland V.A., Brauer M., Moheggh A., Hammer M.S., van Donkelaar A., Martin R.V., Apte J.S., Anenberg S.C. Global urban temporal trends in fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and attributable health burdens: estimates from global datasets // *The Lancet Planetary Health*. 2022. V. 6, N 2. – p. e139–e146.

31 Tiotiu A.I., Novakova P., Nedeva D., Chong-Neto H.J., Novakova S., Steiropoulos P., Kowal K. Impact of air pollution on asthma outcomes // *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*. 2020. V. 17, N 17. – p. 6212.

32 Krewski D., Jerret M., Burnett R. T., Ma R., Hughes E., Shi Y., J. Thun M. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking

particulate air pollution and mortality. – Boston, MA: Health Effects Institute, 2009. – V. 140.

33 Brook R. D., Rajagopalan S., Pope, C. A., Brook J. R., Bhatnagar A., Diez-Roux, A. V. Kaufman, J. D. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association // *Circulation*. 2010. V. 121. №. 21. – pp. 2331-2378

34 Xing Y., Xu Y., Shi M., Lian Y. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system // *Journal of thoracic disease*. 2016. V. 8. №. 1. – pp. E69.

35 Pope CA 3rd, Burnett RT, Turner MC, et al. Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke: shape of the exposure–response relationships // *Environmental health perspectives*. 2011. V. 119. №. 11. – pp. 1616-1621.

36 Dockery D. W. Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution // *Environmental health perspectives*. 2001. V. 109. №. 4. – pp. 483-486

37 Aragon F.M., Miranda J. J., Oliva P. Particulate matter and labor supply: The role of caregiving and non-linearities // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2017. V. 86. – pp. 295-309.

38 Wang K., Dickinson R. E., Liang S. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007 // *Science*. 2009. V. 323. №. 5920. – pp. 1468-1470

39 Holben, B., Tanré, D., Smirnov, A., , Slutsker, I., Abuhassan, N., Zibordi, G . An emerging ground- based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. V. 106. №. D11. – pp. 12067-12097

40 Pósfai M., Buseck P. R. Nature and climate effects of individual tropospheric aerosol particles // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2010. V. 38. – pp. 17-43.

41 Yu H. A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2006. – Т. 6. – №. 3. – С. 613-666.

42 Кондратьев К. Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат. // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15. № 04. С. 301-320.

43 Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Российский химический журнал*. – 2008. – Т. 52. – №. 5. – С. 112-119.

44 Свириденков М. А. Оптическая диагностика свойств аэрозоля в локальных рассеивающих объемах и в столбе атмосферы : дис. – Институт оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

45 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

46 Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // *Journal of the atmospheric sciences*. 1977. V. 34. №. 7. – pp. 1149-1152.

47 Lohmann U., Feichter J. Global indirect aerosol effects: a review // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. V. 5. №. 3. – pp. 715-737.

48 Quaas J., Arola A., Cairns B., Christensen M., Deneke H., Ekman A. M., Wendisch M. Constraining the Twomey effect from satellite observations: issues and perspectives // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2020. V. 2020. – pp. 1-31.

49 Fiedler S. First forcing estimates from the future CMIP6 scenarios of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect // *Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12. №. 3. – pp. 989-1007.

50 Jose S., Nair V. S., Babu S. S. Anthropogenic emissions from South Asia reverses the aerosol indirect effect over the northern Indian Ocean // Scientific reports. 2020. V. 10. №. 1. – p. 18360.

51 Albrecht B. A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness // Science. 1989. V. 245. №. 4923. – pp. 1227-1230.

52 Wu C. K., Chen J. P. Simulation of aerosol indirect effects on cloud streets over the Northwestern Pacific Ocean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. №. 11. – pp. e2020JD034325.

53 Koch D., Del Genio A. D. Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. №. 16. pp. 7685-7696.

54 Bellouin N., Quaas J., Gryspeerdt E., Kinne S., Stier P., Watson- Parris D., Stevens B. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. №. 1. – pp. e2019RG000660.

55 Pandya S., Gadekallu T. R., Maddikunta P. K. R., Sharma R. A study of the impacts of air pollution on the agricultural community and yield crops (Indian context) // Sustainability. 2022. V. 14. №. 20. – p. 13098.

56 Zhou B., Cui T., Li D. Climate monitoring and formation mechanism of smog pollution in China // Chinese Journal of Urban and Environmental Studies. 2015. V. 3. №. 02. – p. 1550013.

57 Klaver A., Formenti P., Caquineau S., Chevaillier S., Ausset P., Calzolari G., Dubovik O. Physico- chemical and optical properties of Sahelian and Saharan mineral dust: In situ measurements during the GERBILS campaign // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. №. 658. – pp. 1193-1210.

58 Ryu S. Y., Kwon B. G., Kim Y. J., Kim H. H., Chun K. J. Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju, Korea // Atmospheric Research. 2007. V. 84. №. 4. – pp. 362-373.

-
- 59 White W. H. Chemical markers for sea salt in IMPROVE aerosol data // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. №. 2. – pp. 261-274.
- 60 Bardintzeff J. M., McBirney A. R. *Volcanology*. – Jones & Bartlett Learning, 2000.
- 61 Miranda J., Zepeda F., Galindo I. The possible influence of volcanic emissions on atmospheric aerosols in the city of Colima, Mexico // *Environmental Pollution*. 2004. V. 127. №. 2. – pp. 271-279.
- 62 Chetverikov Y. O., Ezhov V. F., Glukhov M. S., Ivankova E. M., Loshachenko A. S., Kalganov V. D., Yakubovich O. V. Extraterrestrial dust flux monitoring at Antarctic Vostok station: New collection of extraterrestrial spherules fallen from May to September 2017 // *Meteoritics & Planetary Science*. 2023. V. 58. №. 6. – pp. 815-833.
- 63 Иванова О. А., Михайлов Е. Ф. Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // *известия РАН*. 2019. Т. 55. №. 6. – С. 147-156.
- 64 Alonso-Blanco E., Calvo A. I., Fraile R., Castro A The influence of wildfires on aerosol size distributions in rural areas // *The Scientific World Journal*. 2012. V. 2012. №. 1. – p. 735697.
- 65 Calvo A. I., Pont V., Castro A., Mallet M., Palencia C., Roger J. C., Fraile R. Radiative forcing of haze during a forest fire in Spain // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010. V. 115. №. D8.
- 66 Ye C., Lu K., Song H., Mu Y., Chen J., Zhang, Y. A critical review of sulfate aerosol formation mechanisms during winter polluted periods // *Journal of Environmental Sciences*. 2023. V. 123. – pp. 387-399.
- 67 Wang J., Li J., Ye, J., Zhao J., Wu Y., Hu, J., Jacob D. J. Fast sulfate formation from oxidation of SO₂ by NO₂ and HONO observed in Beijing haze // *Nature Communications*. 2020. V. 11. №. 1. – p. 2844.

68 Liss P. S., Marandino C. A., Dahl E. E., Helmig D., Hintsä E. J., Hughes C., Williams J. Short-lived trace gases in the surface ocean and the atmosphere // *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles*. 2014. – pp. 1-54.

69 Després V., Huffman J. A., Burrows S. M., Hoose C., Safatov A., Buryak G., Jaenicke R. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2012. V. 64. №. 1. – p. 15598.

70 Sun Y., Du W., Fu P., Wang Q., Li J., Ge X., Wang Z. Primary and secondary aerosols in Beijing in winter: sources, variations and processes // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. V. 16. №. 13. – pp. 8309-8329.

71 Sheng J. X., Weisenstein D. K., Luo B. P., Rozanov E., Stenke A., Anet J., Peter T., Global atmospheric sulfur budget under volcanically quiescent conditions: Aerosol- chemistry- climate model predictions and validation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. №. 1. P. 256-276.

72 Porter J.G., De Bruyn W, Saltzman E.S. Eddy flux measurements of sulfur dioxide deposition to the sea surface // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. V. 18. P. 15291-15305.

73 Kamarehie B. et al. Quantification of health effects related to SO₂ and NO₂ pollutants by using air quality model // *Journal of Advances in Environmental Health Research*. – 2017. – T. 5. – №. 1. – C. 44-50.

74 Vinken, G. C. M., Boersma, K. F., Maasakkers, J. D., Adon, M., and Martin, R. V.: Worldwide biogenic soil NO_x emissions inferred from OMI NO₂ observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 10363– 10381, doi:10.5194/acp-14-10363-2014, 2014b.

75 Schumann, U. and Huntrieser, H.: The global lightning-induced nitrogen oxides source, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3823–3907, doi:10.5194/acp-7-3823-2007, 2007.

76 Galloway, J. N., Leach, A. M., Bleeker, A., and Erisman, J. W.: A chronology of human understanding of the nitrogen cycle, *Philos. T. Roy. Soc. London B Biol. Sci.*, 368, 20130120, doi:10.1098/rstb.2013.0120, 2013.

77 Valin, L. C., Russell, A. R., and Cohen, R. C.: Variations of OH radical in an urban plume inferred from NO₂ column measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1856–1860, doi:10.1002/grl.50267, 2013.

78 Duncan, B. N., Yoshida, Y., Olson, J. R., Sillman, S., Martin, R. V., Lamsal, L., Hu, Y., Pickering, K. E., Retscher, C., Allen, D. J., and Crawford, J. H.: Application of OMI observations to a space-based indicator of NO_x and VOC controls on surface ozone formation, *Atmos. Environ.*, 44, 2213–2223, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.03.010, 2010.

79 Ryan R. G., Rhodes S., Tully M., Schofield R. Surface ozone exceedances in Melbourne, Australia are shown to be under NO_x control, as demonstrated using formaldehyde: NO₂ and glyoxal: formaldehyde ratios // *Science of the Total Environment*. – 2020. – T. 749. – C. 141460.

80 Ye C., Lu K., Song H., Mu Y., Chen J., Zhang Y. A critical review of sulfate aerosol formation mechanisms during winter polluted periods // *Journal of Environmental Sciences*. – 2023. – T. 123. – C. 387-399.

81 Wang J., Li J., Ye J., Zhao J., Wu Y., Hu J., Jacob D. J. Fast sulfate formation from oxidation of SO₂ by NO₂ and HONO observed in Beijing haze // *Nature Communications*. – 2020. – T. 11. – №. 1. – C. 2844.

82 Liu Y., Zheng M., Yu M., Cai X., Du H., Li J., He K. High-time-resolution source apportionment of PM 2.5 in Beijing with multiple models // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – T. 19. – №. 9. – C. 6595-6609.

83 Tiotiu A. I., Novakova P., Nedeva D., Chong-Neto H. J., Novakova S., Steiropoulos P., Kowal K. Impact of air pollution on asthma outcomes // *International journal of environmental research and public health*. – 2020. – T. 17. – №. 17. – C. 6212.

84 Southerland V. A., Brauer M., Mohegh A., Hammer M. S., Van Donkelaar A., Martin R. V., Anenberg S. C. Global urban temporal trends in fine particulate matter

(PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets //The Lancet Planetary Health. – 2022. – T. 6. – №. 2. – C. e139-e146.

85 Kovadlo P., Shikhovtsev A., Lukin V., Kochugova E. Solar activity variations inducing effects of light scattering and refraction in the Earth's atmosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, V. 179, P. 468-471. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.06.001>.

86 Gharibzadeh M., Bidokhti A. A., Alam K. The interaction of ozone and aerosol in a semi-arid region in the Middle East: Ozone formation and radiative forcing implications //Atmospheric Environment. – 2021. – T. 245. – C. 118015.

87 Liu J., Guo Z., Zhou L., Wang L., Wang J., Yan Q., Hua D. Inversion and analysis of aerosol optical properties and lidar ratios based on sky-radiometer and Raman lidar measurements in Xi'an, China //Frontiers in Environmental Science. – 2022. – C. 2082.

88 Greenberg N., Carel R. S., Derazne E., Bibi H., Shpriz M., Tzur D., Portnov B. A. Different effects of long-term exposures to SO₂ and NO₂ air pollutants on asthma severity in young adults //Journal of toxicology and environmental health, Part A. – 2016. – T. 79. – №. 8. – C. 342-351.

89 Zheng X. Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis //Environment international. – 2021. – T. 150. – C. 106435.

90 Chiang T. Y., Yuan T. H., Shie R. H., Chen C. F., Chan C. C. Increased incidence of allergic rhinitis, bronchitis and asthma, in children living near a petrochemical complex with SO₂ pollution //Environment international. – 2016. – T. 96. – C. 1-7.

91 Sebald V., Goss A., Ramm E., Gerasimova J. V., Werth S. NO₂ air pollution drives species composition, but tree traits drive species diversity of urban epiphytic lichen communities //Environmental Pollution. – 2022. – T. 308. – C. 119678.

92 Guerranti C., Benetti F., Cucciniello R., Damiani D., Perra G., Proto A., Marchettini N. Pollutants monitoring and air quality evaluation in a confined environment: The ‘Majesty’ of Ambrogio Lorenzetti in the St. Augustine Church in Siena (Italy) // *Atmospheric Pollution Research*. – 2016. – T. 7. – №. 5. – С. 754-761..

93 Pekey, B.; Ozaslan, U. Spatial distribution of SO₂, NO₂, and O₃ concentrations in an industrial City of Turkey using a passive sampling method // *CLEAN–Soil, Air, Water*. – 2013. – T. 41. – №. 5. – С. 423-428.

94 Brown R.H. Monitoring the ambient environment with diffusive samplers: Theory and practical considerations. *J. Environ. Monit.* 2000, 2, 1–9.

95 Khuriganova O.I., Obolkin V.A., Golobokova L.P., Bukin Y.S., Khodzher T.V. Passive Sampling as a Low-Cost Method for Monitoring Air Pollutants in the Baikal Region (Eastern Siberia) // *Atmosphere*. 2019. – V. 10. – № 8. – P. 1-13. DOI: 10.3390/atmos10080470

96 Environmental chemistry Copyright by Prof. K.S. Gupta. All Rights Reserved.

97 Моложникова Е.В., Кучменко Е.В., Нецветева О.Г., Кобелева Н.А. Анализ механизмов формирования ионного состава атмосферных осадков юга Восточной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2003. – Т. 16. – № 5-6. – С. 500-503

98 Carnelos D. A., Jobbagy E., Piñeiro G. Rainout and Washout Contributions to Wet Atmospheric Deposition in Southern South America // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2024. – T. 235. – №. 3. – С. 187.

99. Viklander, M. Urban snow deposits – pathways of pollutants. *Science of the total environment* 1996, 189, 379-384.

100 Murozumi M., Chow T. J., Patterson C. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 1969. – T. 33. – №. 10. – С. 1247-1294.

101. Bezuglaya, E. Yu. Monitoring of the state of air pollution in cities, *Gidrometeoizdat; Leningrad, USSR*, 1986; p. 200.

-
102. Obolkin V. A.; Potemkin V. L.; Makukhin V. L.; Khodzher T. V., Chipanina E. V. Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from regional coal power plants to the South Baikal water basin // *Atmospheric and oceanic optics*. – 2017. – T. 30. – C. 360-365.
103. Romanovskaya, A. Yu.; Savin, I. Yu Aerosol dust of soil origin in the atmosphere: sources, quantity, properties (review). *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute* 2021, 109, 36-95.
104. Crippa, M.; Guizzardi, D.; Pisoni, E.; Solazzo, E.; Guion, A.; Muntean, M.; Hutterli, A. F. Global anthropogenic emissions in urban areas: patterns, trends, and challenges. *Environmental Research Letters* 2021, 16, 1-15.
105. Kuchmenko, E. V.; Molozhnikova, E. V.; Marinaite, I. I.; Zarodnyuk, M. S. Identification of aerosol sources by the ratio of individual concentrations of anthropogenic pollutants. *Optics of the atmosphere and ocean* 2005, 18, 497-501.
106. Koroleva, G. P.; Gorshkov, A. G.; Vinogradov, T. P.; Butakov, E. V.; Marinaite, I. I.; Khodzher, T. V. Study of snow cover pollution as a depositing medium. *Chemistry for Sustainable Development* 1998, 6, 227–237.
107. Raputa, V. F.; Talovskaya, A. V.; Kokovkin, V. V.; Yazikov, E. G. Analysis of observational data on aerosol pollution of the snow cover in the vicinity of Tomsk and Seversk. *Optics of the atmosphere and ocean* 2011, 24, 74-78.
108. Naprasnikova, E. V.; Makarova, A. P. Snow cover in assessing the ecological state of the urban environment. *Geography and natural resources* 2006, 3, 162-166.
109. Pozhitkov, R.; Pozhitkov, R.; Moskovchenko, D.; Soromotin, A.; Kudryavtsev, A.; Tomilova, E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions. *Environmental monitoring and assessment* 2020, 192. 215-230.

-
110. Popovicheva, O.; Chichaeva, M.; Kovach, R.; Zhdanova, E.; Kasimov, N. Seasonal, Weekly, and Diurnal Black Carbon in Moscow Megacity Background under Impact of Urban and Regional Sources. *Atmosphere* 2022, 13, 563-584.
111. Raputa, V.; Kokovkin, V. V.; Methods of Interpretation of the Data of Snow Cover Pollution Monitoring. *Chemistry for Sustainable Development* 2002, 10, 657-670.
112. Bortnikova, S. B.; Raputa, V. F.; Devyatova, A. Yu.; Yudakhin, F. N. Methods for analyzing snow cover pollution data in the zones of influence of industrial enterprises (on the example of Novosibirsk). *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology* 2009, 6, 515-525.
113. Filimonenko, E. A. Ecological and geochemical situation in the areas of location of thermal power facilities according to the study of insoluble and soluble phases of snow (on the example of the Tomsk region). Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences: spec. 25.00.36. National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, 2015.
114. Zhulidov, A. V.; Robarts, R. D.; Pavlov, D. F.; Kämäri, T. J.; Gurtovaya, T. Y.; Meriläinen, J. J.; Pospelo, I. N. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex. *Environmental Monitoring and Assessment* 2011, 181, 539-553.
115. Karbalaei, S.; Hanachi, P.; Walker, T. R.; Cole, M. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental science and pollution research* 2018, 25, 36046-36063.
116. Vetrov, V. A.; Kuzovkin, V. V.; Manzon, D. A. Precipitation acidity and fallout of nitrogen and sulfur on the territory of the Russian Federation from the data of monitoring the chemical composition of snow cover. *Russian Meteorology and Hydrology* 2015, 40, 667-674.

117 Khodzher, T. V. Study of the composition of atmospheric precipitation and their impact on the ecosystems of the Baikal natural territory. Dissertation for the degree of doctor of geographical sciences: spec. 25.00.30. Institute of Geography RAS, Moscow, 2005.

118. Obolkin, V. A.; Netsvetaeva, O. G.; Golobokova, L. P.; Potemkin, V. L.; Zimnik, E. A.; Filippova, U. G.; Khodzher, T. V. Results of long-term studies of acid fallout in the South Baikal region. *Geography and nature resources* 2013, 2, 66-73.

119 Belozertseva, I. A.; Vorobieva, I. B.; Vlasova, N. V.; Gagarinova, O. V.; Yanchuk, M. S.; Lopatina, D. N. Ecological state of the coast of Lake Baikal and its impact on the pollution of the lake. *Successes of modern natural science* 2018, 11, 85-95.

120. Nechaeva, E. G.; Makarov, S. A., Snow cover as an object of regional environmental monitoring. *Geography and nature resources* 1996, 2, 43-48.

121. Shevchenko, V. P.; Vorobyev, S. N.; Krickov, V. V.; Manasyrov, R. M.; Politova, N. V.; Kopysov, S. G.; Pokrovsky, O. S. Trace elements in snow cover of western Siberia: impact of snow deposition on surface water chemistry. *Biogeochemistry of trace elements* 2018, 113-165.

122. Walker, T. R.; Young, S. D.; Crittenden, P. D.; Zhang, H. Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern European Russia. *Environmental Pollution* 2003, 121, 11-21.

123. Obolkin, V.; Khodzher, T.; Sorokovikova, L.; Tomberg, I.; Netsvetaeva, O.; Golobokova, L. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia. *International Journal of Environmental Studies* 2016, 73, 452-461.

124. Desinayak, N.; Prasad, A. K.; El-Askary, H.; Kafatos, M.; Asrar, G. R. Snow cover variability and trend over the Hindu Kush Himalayan region using MODIS and SRTM data. In *Annales Geophysicae* 2022, 40, 67-82.

-
125. Colin, J. L.; Lim, B.; Herms, E.; Genet, F.; Drab, E.; Jaffrezo, J. L.; Davidson, C. I. Air-to-snow mineral transfer - crustal elements in aerosols, fresh snow and snowpits on the Greenland Ice Sheet. *Atmospheric Environment* 1997, 31, 3395-3406.
126. Netsvetaeva, O. G.; Khodzher, T. V.; Golobokova, L. P.; Kobeleva, N. A.; Pogodaeva, T. V. The chemical composition of the snow cover in the reserves of the Baikal region. *Geography and Natural Resources* 2004, 1, 66-72.
- 127 Molozhnikova Y. V. et al. Comparative analysis of satellite and continuous surface measurements of gas impurities in the air basin at the Listvyanka station, Lake Baikal //28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2022. – T. 12341. – C. 1048-1052.
- 128 Trifonova-Yakovleva A.M., Gromov S.A. “Ammonia amount in the lower troposphere of Baikal region from satellite and ground-based measurements”, *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 17(2), 265-274 (2020)
- 129 Streets D. G., Canty T., Carmichael G. R., de Foy B., Dickerson R. R., Duncan B. N., Wecht K. J. “Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability”, *Atmospheric Environment*, 77, 1011-1042 (2013).
- 130 Tanré, D.; Deschamps, P.Y.; Devaux, C.; Herman, M. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data. *J. Geophys. Res* 1988, 93, 15955–15964.
- 131 Holben, B.; Vermote, E.; Kaufman, Y.J.; Tanré, D.; Kalb, V. Aerosols retrieval over land from AVHRR data—Application for atmospheric correction. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 1992, 30, 212–222.
- 132 Deuzé, J.L.; Bréon, F.M.; Devaux, C.; Goloub, P.; Herman, M.; Lafrance, B.; Maignan, F.; Marchand, A.; Nadal, F.; Perry, G.; et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements. *J. Geophys. Res* 2001, 106, 4913–4926.

-
- 133 Diner, D.J.; Martonchik, J.V.; Kahn, R.A.; Pinty, B.; Gobron, N.; Nelson, D.L.; Holben, B.N. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land. *Remote Sens. Environ* 2005, 94, 155–171.
- 134 Hsu, N.C.; Tsay, S.C.; King, M.D.; Herman, J.R. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 2004, 42, 557–569
- 135 Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ* 1973, 1, 309–317.
- 136 Mcfeeters, S.K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens* 1996, 17, 1425–1432.
- 137 Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *Int. J. Remote Sens* 2003, 24, 583–594.
- 138 Xu, H.Q. Fast information extraction of urban built-up land based on the analysis of spectral signature and normalized difference index. *Geograph. Res* 2005, 24, 311–320.
- 139 Yu, Z.M.; Zhou, H.M.; Zheng, Y.F. Study on distribution of urban particle pollution by remote sensing and GIS. *J. Nat. Disaster* 2004, 13, 58–64.
- 140 Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – T. 146. – №. 730. – C. 1999-2049.
- 141 Huo, Y., Bai, D., Liu, L., Dong, Z., Xun, S., He, B., ... & Zhang, H. (2023). Multidecadal variability of dust activity in Gobi desert and its connection with the pacific decadal oscillation. *Environmental Research Communications*, 5(9), 095013.
- 142 Park, Y., Kim, S. W., Yang, Y. M., Kim, K. M., Sung, M. K., & An, S. I. (2024). Possible impact of north atlantic sea surface temperature on decadal variability of dust activity in gobi desert. *Environmental Research Communications*, 6(1), 011003.
143. Obolkin, V. A.; Potemkin, V. L.; Makukhin, V. L.; Khodzher, T. V.; Chipanina, E. V. Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from

regional coal power plants to the South Baikal water basin. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2017, 30, 360-365.

144. Bezuglaya, E. Yu. Monitoring of the state of air pollution in cities, *Gidrometeoizdat; Leningrad, USSR, 1986; p. 200.*

145 Соловьева, Н. Е., Балыбердин, К. М., & Фёдорова, Т. А. (2015). Исследование талой воды (снега) как показатель загрязнения атмосферы урбанизированной среды. *Экология человека: здоровье, культура и качество жизни*, 163.

146 Ковадло П. Г., Лукин В. П., Шиховцев А. Ю. Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 31. – №. 11. – С. 906-910.

147 Лазарева Е. О., Попова Е. С. Особенности пространственно-временной динамики антропогенных примесей воздуха г. Санкт-Петербурга за период времени с 1980 по 2012 г.(на примере оксида углерода, диоксида азота, взвешенных веществ) // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. – 2014. – №. 37. – С. 204-215.

148 Меркулов П. И., Меркулова С. В., Колокотрони К. О. Динамика самоочищающей способности атмосферы и биоклиматическая характеристика города Саранска // *Проблемы региональной экологии*. – 2009. – №. 5. – С. 192-198.

149 Лазарева Е. О. Загрязнение атмосферного воздуха г. Санкт-Петербург при различных синоптических ситуациях : дис. – Санкт-Петербург : ЕО Лазарева, 2016.

150 Gubanova D. P. et al. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 606. – №. 1. – С. 012019.

151 Н.Ф. Вельтищев. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. - Сб. лекций, Женева, 1988, стр. 136 с.

152 Дерябин, В. А., & Фарафонтова, Е. П. (2016). Экология: учебное пособие.

153 Гурова, О. С. (2013). Основные принципы классификации источников загрязнения воздушной среды городских территорий Южного Федерального Округа. Вестник евразийской науки, (5 (18)), 123.

154 Черногаева, Г. М., Малеванов, Ю. А., & Журавлева, Л. Р. (2015). Мониторинг загрязнения окружающей среды в Российской Федерации: организация наблюдений, обобщение и распространение информации. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 26(2), 128-138.

155 Mashyanov N., Obolkin V.A., Pogarev S., Ryzhov V., Sholupov S., Potemkin V.L., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. Air mercury monitoring at the Baikal area // Atmosphere. 2021. – V. 12. – № 7. – P. 807. DOI: 10.3390/atmos12070807

156 Громов, С. А., & Парамонов, С. Г. (2015). Современное состояние и перспективы развития комплексного фонового мониторинга загрязнения природной среды. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 26(1), 205.

157 Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. – 2004.

158 Elansky N. F. et al. Weekly patterns and weekend effects of air pollution in the Moscow megacity //Atmospheric Environment. – 2020. – Т. 224. – С. 117303.

159 Popovicheva O. et al. Seasonal, weekly, and diurnal black carbon in Moscow Megacity Background under impact of urban and regional sources //Atmosphere. – 2022. – Т. 13. – №. 4. – С. 563.

160 Костеневский О. К. и др. Особенности загрязнения атмосферного воздуха Барнаула //География и природопользование Сибири. – 2015. – №. 20. – С. 90-94.

161 Korunov, A. O., Khalikov, I. S., Surnin, V. A., Zapevalov, M. A., & Bulgakov, V. G. (2020). Atmospheric Air Pollution with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Krasnoyarsk Region Cities. Russian Journal of General Chemistry, 90, 2563-2572.

162 Lin C. et al. Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring //Atmospheric Environment. – 2020. – Т. 227. – С. 117410.

163 Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O. The state of the atmosphere in the city of Krasnoyarsk (Russia) in indicators of sustainable development //International Journal of Sustainable Development & World Ecology. – 2020. – Т. 27. – №. 4. – С. 349-357.

164 Andreeva I. S. et al. Concentration and Composition of Cultured Microorganisms in Atmospheric Air Aerosols in Novosibirsk Depending on the Season //Atmospheric and Oceanic Optics. – 2022. – Т. 35. – №. 6. – С. 667-672.

165 Safatov A. S. et al. Long-term studies of biological components of atmospheric aerosol: Trends and variability //Atmosphere. – 2022. – Т. 13. – №. 5. – С. 651.

166 Антропов К. М., Вараксин А. Н. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Екатеринбурга диоксидом азота методом Land Use Regression //Экологические системы и приборы. – 2011. – №. 8. – С. 47-54.

167 Panchenko M. V. et al. Size distribution of dry matter of particles in the surface atmospheric layer in the suburban region of Tomsk within the empirical classification of aerosol weather types //Atmospheric and Oceanic Optics. – 2019. – Т. 32. – С. 655-662.

168 Khalikov I. S. Annual, Seasonal, and Daily Trends in the Levels of High-Molecular-Weight Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmospheric Air of Sochi in 2013–2020 //Russian Journal of General Chemistry. – 2021. – Т. 91. – №. 13. – С. 2881-2891.

169 Цыдыпов В. В. Исследование динамики газовых и аэрозольных примесей в приземном слое атмосферы города (на примере г. Улан-Удэ) : дис. – Барнаул : Бурятский научный центр СО РАН, 2005.

170 Barskova L. S. et al. Assessment of air pollution by small-sized suspended particulate matter in urbanized territories with various technogenic load (on the example of Vladivostok, Russia) //Russian Open Medical Journal. – 2019. – Т. 8. – №. 3. – С. 304-304.

171 Шахова Н. Е. и др. Аномалии метана в приземном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики //Доклады Академии Наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2007. – Т. 414. – №. 6. – С. 819-823.

172 Wang Y. et al. PM-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of Vladivostok: Seasonal variation, sources, health risk assessment and long-term variability //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Т. 19. – №. 5. – С. 2878.

173 Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models //Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – Т. 36. – С. 178-189.

174 Davulienė L. et al. Long-term air pollution trend analysis in the South-eastern Baltic region, 1981–2017 //Atmospheric Research. – 2021. – Т. 247. – С. 105191.

175 Tomshin O., Solovyev V. Features of the Extreme Fire Season of 2021 in Yakutia (Eastern Siberia) and heavy air pollution caused by biomass burning //Remote Sensing. – 2022. – Т. 14. – №. 19. – С. 4980.

176 В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Иванов Р.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Корейский М.Ю., Котельников С.И., Кузнецова И.И., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Семутникова Е.Г., Сенник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.И., Фофонов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2022 г. // Оптика атмосферы и океана. 2023. – Т. 36. – № 8. – С. 642-657. DOI: 10.15372/AOO20230804

177 Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Бердашкинова О.И., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Онищук Н.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 4. Атмосферный аэрозоль // Оптика атмосферы и океана. 2024. – Т. 37. – № 3. – С. 1-17. DOI: 10.15372/A0020240305

178 книга Аэрозоли Сибири

179 Engelhardt V. et al. Black carbon and particulate matter mass concentrations in the Metropolitan District of Caracas, Venezuela: An assessment of temporal variation and contributing sources //Elem Sci Anth. – 2022. – Т. 10. – №. 1. – С. 00024.

180 Pongkiatkul P., Oanh N. T. K. Assessment of potential long-range transport of particulate air pollution using trajectory modeling and monitoring data //Atmospheric Research. – 2007. – Т. 85. – №. 1. – С. 3-17.

181 Li X. et al. Characteristics of air pollution variation and potential source contributions of typical megacities in the Sichuan Basin, Southwest China //Air Quality, Atmosphere & Health. – 2023. – С. 1-20.

182 Bodor, Z., Bodor, K., Keresztesi, Á., & Szép, R. (2020). Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM 10 in an urban environment

with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 38181-38199.

183 Hopke P. K. Review of receptor modeling methods for source apportionment // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2016. – T. 66. – №. 3. – C. 237-259.

184 Draxler, R.R.; Hess, G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust. Meteorol. Mag.* 1998, 47, 295–308.

185 Stohl, A.; Hittenberger, M.; Wotawa, G. Validation of the lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.* 1998, 32, 4245–4264.

186 Zeng, J.; Matsunaga, T.; Mukai, H. METEX—A flexible tool for air trajectory calculation. *Environ. Model. Softw.* 2010, 25, 607–608.

187 Yu M., Cai X., Xu C., Song Yu. A climatological study of air pollution potential in Chi- na. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s0070-4-018-2511-8>.

188 Krupa S. V., Legge A. H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective // *Environmental Pollution*. – 2000. – T. 107. – №. 1. – C. 31-45.

189 Greenwood R., Mills G., Vrana B. (ed.). *Passive sampling techniques in environmental monitoring*. – Elsevier, 2007.

190 Klánová J. et al. Passive air sampler as a tool for long-term air pollution monitoring: Part 1. Performance assessment for seasonal and spatial variations // *Environmental Pollution*. – 2006. – T. 144. – №. 2. – C. 393-405.

191 Suriano D. Preface to State-of-the-Art in Real-Time Air Quality Monitoring through Low-Cost Technologies // *Atmosphere*. – 2023. – T. 14. – №. 3. – C. 554.

192 Wastine B. et al. Compact non-dispersive infrared multi-gas sensing platform for large scale deployment with sub-ppm resolution // *Atmosphere*. – 2022. – T. 13. – №. 11. – C. 1789.

193 Diviacco P. et al. First Results of the Application of a Citizen Science-Based Mobile Monitoring System to the Study of Household Heating Emissions //Atmosphere. – 2022. – T. 13. – №. 10. – C. 1689.

194 Awokola B. et al. Longitudinal ambient PM_{2.5} measurement at fifteen locations in eight sub-Saharan African countries using low-cost sensors //Atmosphere. – 2022. – T. 13. – №. 10. – C. 1593.

195 McFarlane C. et al. First measurements of ambient PM_{2.5} in kinshasa, democratic republic of Congo and Brazzaville, republic of Congo using field-calibrated low-cost sensors //Aerosol and Air Quality Research. – 2021. – T. 21. – №. 7.

196 Masri S., Rea J., Wu J. Use of Low-Cost Sensors to Characterize Occupational Exposure to PM_{2.5} Concentrations Inside an Industrial Facility in Santa Ana, CA: Results from a Worker-and Community-Led Pilot Study //Atmosphere. – 2022. – T. 13. – №. 5. – C. 722.

197 Snyder, E.G.; Watkins, T.H.; Solomon, P.A.; Thoma, E.D.; Williams, R.W.; Hagler, G.S.W.; Shelow, D.; Hindin, D.A.; Kilaru, V.J.; Preuss, P.W. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 11369–11377.

198 Kumar, P.; Morawska, L.; Martani, C.; Biskos, G.; Neophytou, M.; Di Sabatino, S.; Bell, M.; Norford, L.; Britter, R. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. Environ. Int. 2015, 75, 199–205.

199 Popoola, O.A.; Carruthers, D.; Lad, C.; Bright, V.B.; Mead, M.I.; Stettler, M.E.; Saffell, J.R.; Jones, R.L. Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. Atmos. Environ. 2018, 194, 58–70.

200 Bulot F. M. J. et al. Laboratory comparison of low-cost particulate matter sensors to measure transient events of pollution //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 8. – C. 2219.

201 Manikonda, A.; Zíková, N.; Hopke, P.K.; Ferro, A.R. Laboratory assessment of low-cost PM monitors. J. Aerosol Sci. 2016, 102, 29–40.

202 Kortoçi, P.; Motlagh, N.H.; Zaidan, M.A.; Fung, P.L.; Varjonen, S.; Rebeiro-Hargrave, A.; Niemi, J.V.; Nurmi, P.; Hussein, T.; Petäjä, T.; et al. Air Pollution Exposure Monitoring Using Portable Low-Cost Air Quality Sensors. *Smart Health* 2022, 23.

203 Mead, M.I.; Popoola, O.A.M.; Stewart, G.B.; Landshoff, P.; Calleja, M.; Hayes, M.; Baldovi, J.J.; McLeod, M.W.; Hodgson, T.F.; Dicks, J.; et al. The Use of Electrochemical Sensors for Monitoring Urban Air Quality in Low-Cost, High-Density Networks. *Atmos. Environ.* 2013, 70, 186–203.

204 Crilley, L.R.; Shaw, M.; Pound, R.; Kramer, L.J.; Price, R.; Young, S.; Lewis, A.C.; Pope, F.D. Evaluation of a Low-Cost Optical Particle Counter (Alphasense OPC-N2) for Ambient Air Monitoring. *Atmos. Meas. Tech.* 2018, 11, 709–720.

205 Bulot F. M. J. et al. Laboratory comparison of low-cost particulate matter sensors to measure transient events of pollution // *Sensors*. – 2020. – Т. 20. – №. 8. – С. 2219.

206 Morawska, L.; Thai, P.K.; Liu, X.; Asumadu-Sakyi, A.; Ayoko, G.; Bartonova, A.; Bedini, A.; Chai, F.; Christensen, B.; Dunbabin, M.; et al. Applications of Low-Cost Sensing Technologies for Air Quality Monitoring and Exposure Assessment: How Far Have They Gone? *Environ. Int.* 2018, 116, 286–299.

207 Jovašević-Stojanović, M.; Bartonova, A.; Topalović, D.; Lazović, I.; Pokrić, B.; Ristovski, Z. On the Use of Small and Cheaper Sensors and Devices for Indicative Citizen-Based Monitoring of Respirable Particulate Matter. *Environ. Pollut.* 2015, 206, 696–704.

208 Correia C. et al. A Low-Cost Sensor System Installed in Buses to Monitor Air Quality in Cities // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2023. – Т. 20. – №. 5. – С. 4073.

209 Энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны: воздействие на природную среду и пути его снижения / Б. Г. Санеев, И. Ю.

Иванова, Е. П. Майсюк, Т. Ф. Тугузова, Р. А. Иванов // География и природные ресурсы, 2016, No 5, С. 218–224.

210 Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». Иркутск : Мегапринт, 2020. 314 с.

211 Отчет № 2-ТП (воздух) «Сведения об охране атмосферного воздуха» 2022 год. [Электронный ресурс]. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/activity/reports-receiving/air/>

212 Иванова И. Ю., Иванов Р. А. Использование геовизуализации при анализе размещения объектов энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – №. 4-2. – С. 80-89.

213 <https://www.rosteplo.ru/w/Иркутск>

214 Схема теплоснабжения ангарского городского округа на период до 2031 года (https://angarsk-adm.ru/upload/iblock/c51/om_skhema-teplosnabzheniya-ago.pdf)

215 Майсюк Е. П. Роль энергетики в экологическом состоянии Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. – 2017. – №. 1. – С. 100-107.

216 Zhamsueva, G., Zayakhanov, A., Tsydypov, V., Dementeva, A., Balzhanov, T., “Spatial-temporal variability of small gas impurities over lake Baikal during the forest fires in the summer of 2019”, Atmosphere, 12(1), 20-34 (2020).

217 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

218 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

219 Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Molozhnikova E.V., Penner I.E., Shikhovtsev M.Yu., Izosimova O.N., Khodzher T.V. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and PM10 solid particles above the water area of Lake Baikal in the summer of 2020 // Proceedings of SPIE. 2021. – V. 11916. – P. 1-7. DOI: 10.1117/12.2600470

220 Popovicheva O., Molozhnikova E. , Nasonov S. , Potemkin V. , Penner I. , Klemasheva M. , Marinaite I. , Golobokova L. , Vratolis S., Eleftheriadis K., Khodzher T. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal // Journal of Environmental Sciences. 2021. – V. 107. – P. 49-64. DOI: 10.1016/j.jes.2021.01.011

221 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*, 12(10), 1348-1360 (2021).

222 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 // 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2022. – T. 12341. – C. 364-369.

223 Sorokovikova, L.M., Sinyukovich, V.N., Netsvetaeva, O.G., Tomberg, I.V., Sezko, N.P., Lopatina, I.N. “Chemical composition of snow and river waters of the southeastern coast of Lake Baikal”, *Meteorology and Hydrology*, 5(17), 83-99 (2015).

224 Golobokova L.P., Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V., Obolkin V.A., Khuriganova O.I. Atmospheric deposition on the southwest coast of the southern basin of Lake Baikal // *Atmosphere*. 2021. – V. 12. – № 10. – P. 1357. DOI: 10.3390/atmos12101357

225 Molozhnikova Ye.V., Netsvetaeva O.G., Shikhovtsev M.Yu. Determination of the main factors affecting the chemical composition of precipitation in the Southern

Baikal region // Proceedings of SPIE. 2021. – V. 11916. – P. 1-7. DOI: 10.1117/12.2600443

226 Хуриганова О.И., Оболкин В.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. Мониторинг атмосферных загрязнений в городских и сельских районах Байкальской природной территории за 2019—2021 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. – № 4. – С. 54-65. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-4-54-65

227 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

228. Винокуров М. А. Экономика Иркутской области / М. А. Винокуров, А. П. Суходолов – Иркутск: Изд-во БГУЭП, 1998. - 203 с.

229. Нечаева Е. Г. Ландшафтно-геохимическое районирование Азиатской России / Е. Г. Нечаева // География и природные ресурсы. – 2001. – № 1. – С. 19-25.

230 Моложников, В.Н. Атлас: Прибайкалье: общество и природа; Paulsen: Москва, Россия, 2021; 320 с.

231 Моложников, В.Н. Карта: Природно-экологические комплексы и растительность Прибайкалья; Институт географии им. В.Б. Сочавы: Иркутск, Россия, 2020; 1 с.

232 Белов, А.В.; Владимиров, И.Н.; Соколова, Л.П. Картографическая оценка состояния современной растительности Предбайкалья для оптимизации природопользования. Геогр. прир. ресурсы. 2016, 2, 62–68.

233 Иевская, А.А.; Корсунова, Т.М.; Имескенова, Э.Г. Анализ современного состояния растительности скверов г. Улан-Удэ. Электрон. Ж. АгроЭкоИнфо 2020, 2, 1–10.

-
- 234 Курс климатологии, ч 3 / под редакцией Б.П. Алисова и др. – Л.: Гидрометиздат, 1954
- 235 .Смирнов А.В. В джунглях Хамар-Дабана: Рассказы о природе. – Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1967. – 96 с
236. Безуглая Э. Ю. Чем дышит промышленный город / Э. Ю. Безуглая, Г. П. Расторгуева - Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 255 с.
- 237 Латышева И. В., Синюкович В. Н., Чумакова Е. В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал //Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2009. – Т. 2. – С. 117-133.
238. Анапольская Л. Н. Климатические параметры Восточной Сибири и Дальневосточного экономических районов / Л. Н. Анапольская, И. Д. Копзнев - Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 187 с.
- 239 Сергеев Н.И. Синоптические сезоны и сезонные аномалии температуры воздуха холодного полугодия Восточной Сибири. – Сб. работ по синоптике, 1959, №3
- 240 Швер Ц.А., Форманчук Н.П. Климат Иркутска - Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 243 с.
- 241 Potemkina T., Potemkin V. Extreme phenomena in the Lake Baikal basin: tropical nights and hot days as indicators of climate warming (Eastern Siberia, Russia) // Theoretical and Applied Climatology. 2024. DOI: 10.1007/s00704-024-05031-4
- 242 Галазий Г. И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Вост //Сиб. кн. изд-во. – 1987. – Т. 1. – №. 984. – С. 368.
- 243 Верболов В.И. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / В. И. Верболов, В. М. Сокольников, М. Н. Шимараев. - М.: Наука, 1965. - 372 с
- 244 Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал / А.Н. Афанасьев.- Новосибирск: Наука, 1976. - 238 с

245 Bolbasova L. A. et al. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – Т. 482. – №. 2. – С. 2619-2626.

246 Shikhovtsev M.Yu. Inter-annual dynamics of regional and transboundary transport of air masses of the Baikal region for 2010-2018 / M.Yu. Shikhovtsev, Ye. V. Molozhnikova // Proc. SPIE. – 2020. – V.11560. – P. 1-8.

247. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

248 Климат Иркутска /под ред. Ц. А. Швер, Н. П. Форманчук. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.-320 с.

249 Моложникова Е. В. Учет загрязнения окружающей среды аэрозолями в задачах развития энергетических систем : дис. – Институт систем энергетики им. ЛА Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2003.

250 <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

251 Shikhovtsev A. Y. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2024. P. 31.

252 Моложникова Е. В. Учет загрязнения окружающей среды аэрозолями в задачах развития энергетических систем : дис. – Институт систем энергетики им. ЛА Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2003.

253Kotthaus S. et al. Volume for pollution dispersion: London's atmospheric boundary layer during ClearfLo observed with two ground-based lidar types //Atmospheric environment. – 2018. – Т. 190. – С. 401-414..

254 Seibert P. et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height //Atmospheric environment. – 2000. – Т. 34. – №. 7. – С. 1001-1027.

255. Andreas E. L. Low-level atmospheric jets and inversions over the western Weddell Sea. / E. L. Andreas, K. J. Claffey, A. P. Makshtas // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2000. – V.97. – P. 495-486.

256. Курбацкий А. Ф. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое / А. Ф. Курбацкий, Л. И. Курбацкая // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 187-196.

257. Wu Y., The summertime great plains low level jet and the effect of its origin on moisture transport / Y. Wu, S. Raman // *Boundary Layer Meteorology*. – 1998. – V.88. – P. 445-466.

258. Оболкин В. А. Потемкин В. Л. Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2014. – 12. – С. 35-41.

259 Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu. 2018. The development of the model of turbulent atmosphere on the astroplatform of Large Solar Vacuum Telescope as applied to image adaptation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Optics* 31: 906-910. DOI: 10.15372/AOO20181108

260 Shikhovtsev A Method of determing optical turbulence characteristics by the line of sight of an astronomical telescope // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35. № 3. P. 303-309.

261 Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Гидрометеиздат, 1965.

262 Cheng I., Xu X., Zhang L. Overview of receptor-based source apportionment studies for speciated atmospheric mercury // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – Т. 15. – №. 14. – С. 7877-7895.

263 Kalinchuk V. V. et al. Distribution of atmospheric gaseous elemental mercury (Hg (0)) from the Sea of Japan to the Arctic, and Hg (0) evasion fluxes in the

Eastern Arctic Seas: results from a joint Russian-Chinese cruise in fall 2018 // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Т. 753. – С. 142003.

264. Frumin, G. T., A. V. Dikinis, and E. G. Alekseeva. "Acidity of atmospheric precipitates in St. Petersburg." *Russian Journal of General Chemistry* 86 (2016): 3018-3020.

265. Василенко В. И., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. - Л.: Гидрометеиздат. - 1985.- 185 с.

266 Оболкин В.А., Шаманский Ю.В., Ходжер Т.В., Фалиц А.В. Мезомасштабные процессы переноса атмосферных загрязнений в районе Южного Байкала // *Океанологические исследования*. 2019. – Т. 47. – № 3. – С. 104–113. DOI: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).9 (

267 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. – № 10. – P. 1-10. DOI: 10.3390/atmos12101348

268 Заяханов А. С. и др. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе // *Оптика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 23. – №. 6. – С. 466-470.

269 Сафаров А. С., Верховина В. А., Макухин В. Л. Моделирование переноса выбросов Ново-Иркутской ТЭЦ на акваторию оз. Байкал // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – №. 11 (82). – С. 115-120

270 Оболкин В.А., Нецветаева О.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л., Зимник Е.А., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В. Результаты многолетних исследований кислотных выпадений в районе Южного Байкала // *География и природ. ресурсы*. 2013. – № 2. – С. 66-73. DOI: 10.1134/S1875372813020078

271 Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Афанасьева Л. В., Игнатьева О. В., Шергина О. В. Воздействие фторсодержащих соединений на состояние хвойных лесов Предбайкалья – Лесоведение, 2005, №. 2, с. 38—45.

272 Михайлова Т. А., Плешанов А. С., Афанасьева Л. В. Картографическая оценка загрязнения лесных экосистем Байкальской природной территории техногенными эмиссиями – География и природные ресурсы, 2008, №. 4, С. 18—23.

273 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

274 Golobokova L.P., Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Starikov A., Khuriganova O.I. Variability of the Chemical Composition of the Atmospheric Aerosol in the Coastal Zone of the Southern Basin of Lake Baikal (East Siberia, Russia) // Atmosphere. 2022. – V. 13. – № 7. – P. 1-18. DOI: 10.3390/atmos13071090

275 Маринайте И. И., Ходжер Т. В., Оболкин В. А., Потемкин В. Л. Полициклические ароматические углеводороды PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} в атмосфере Южного Прибайкалья // Метеорология и гидрология. 2023. – № 4. – С. 22-32. doi: 10.52002/0130-2906-2023-4-22-32

276 Chauhan P. K. Seasonal characteristics of PM₁, PM_{2,5}, and PM₁₀ over Varanasi during 2019–2020 // Frontiers in Sustainable Cities. 2022. – V. 4. – P. 909351-909361.

277 Qu H., Zang J., Wu Y. Field Measurement and Evaluation of Effective Ventilation and Particulate Matter Discharge Efficiency of Air Shafts in Subway Tunnels // Atmosphere. 2022. – V. 13. – №. 7. – P. 1040-1050.

278 Snyder, E.G.; Watkins, T.H.; Solomon, P.A.; Thoma, E.D.; Williams, R.W.; Hagler, G.S.W.; Shelow, D.; Hindin, D.A.; Kilaru, V.J.; Preuss, P.W. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47, 11369–11377.

279 Kumar, P.; Morawska, L.; Martani, C.; Biskos, G.; Neophytou, M.; Di Sabatino, S.; Bell, M.; Norford, L.; Britter, R. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ. Int.* 2015, 75, 199–205.

280 Popoola, O.A.; Carruthers, D.; Lad, C.; Bright, V.B.; Mead, M.I.; Stettler, M.E.; Saffell, J.R.; Jones, R.L. Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmos. Environ.* 2018, 194, 58–70.

281 Bulot F. M. J. et al. Laboratory comparison of low-cost particulate matter sensors to measure transient events of pollution //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 8. – C. 2219.

282 Manikonda, A.; Zíková, N.; Hopke, P.K.; Ferro, A.R. Laboratory assessment of low-cost PM monitors. *J. Aerosol Sci.* 2016, 102, 29–40.

283 Kortoçi, P.; Motlagh, N.H.; Zaidan, M.A.; Fung, P.L.; Varjonen, S.; Rebeiro-Hargrave, A.; Niemi, J.V.; Nurmi, P.; Hussein, T.; Petäjä, T.; et al. Air Pollution Exposure Monitoring Using Portable Low-Cost Air Quality Sensors. *Smart Health* 2022, 23.

284 Mead, M.I.; Popoola, O.A.M.; Stewart, G.B.; Landshoff, P.; Calleja, M.; Hayes, M.; Baldovi, J.J.; McLeod, M.W.; Hodgson, T.F.; Dicks, J.; et al. The Use of Electrochemical Sensors for Monitoring Urban Air Quality in Low-Cost, High-Density Networks. *Atmos. Environ.* 2013, 70, 186–203.

285 Crilley, L.R.; Shaw, M.; Pound, R.; Kramer, L.J.; Price, R.; Young, S.; Lewis, A.C.; Pope, F.D. Evaluation of a Low-Cost Optical Particle Counter (Alphasense OPC-N2) for Ambient Air Monitoring. *Atmos. Meas. Tech.* 2018, 11, 709–720.

286 Bulot F. M. J. et al. Laboratory comparison of low-cost particulate matter sensors to measure transient events of pollution //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 8. – C. 2219.

287 Morawska, L.; Thai, P.K.; Liu, X.; Asumadu-Sakyi, A.; Ayoko, G.; Bartonova, A.; Bedini, A.; Chai, F.; Christensen, B.; Dunbabin, M.; et al. Applications of Low-Cost Sensing Technologies for Air Quality Monitoring and Exposure Assessment: How Far Have They Gone? *Environ. Int.* 2018, 116, 286–299.

288 Jovašević-Stojanović, M.; Bartonova, A.; Topalović, D.; Lazović, I.; Pokrić, B.; Ristovski, Z. On the Use of Small and Cheaper Sensors and Devices for Indicative Citizen-Based Monitoring of Respirable Particulate Matter. *Environ. Pollut.* 2015, 206, 696–704.

289 Correia C. et al. A Low-Cost Sensor System Installed in Buses to Monitor Air Quality in Cities // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2023. – T. 20. – №. 5. – C. 4073.

290 Li, Z.; Che, W.; Lau, A.K.H.; Fung, J.C.H.; Lin, C.; Lu, X. A feasible experimental framework for field calibration of portable light-scattering aerosol monitors: Case of TSI DustTrak. *Environ. Pollut.* 2019, 255, 113136

291 He, J.; Huang, C.H.; Yuan, N.; Austin, E.; Seto, E.; Novosselov, I. Network of Low-Cost Air Quality Sensors for Monitoring Indoor, Outdoor, and Personal PM_{2.5} Exposure in Seattle during the 2020 Wildfire Season. *Atmos. Environ.* 2022, 285, 119244

292 Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V. Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from regional coal power plants to the South Baikal water basin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. – T. 30. – № 4. – C. 360-365. DOI: 10.1134/S1024856017040078

293 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. – № 10. – P. 1-10. DOI: 10.3390/atmos12101348

294 Baldauf, R.W., Watkins, N., Heist, D., Bailey, C., Rowley, P. and Shores, R. 2009. Near road air quality monitoring: factors affecting network design and interpretation of data. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2: 1-9

295 Shikhovtsev M.Yu., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova Ye.V. Variability of the Ground Concentration of Particulate Matter PM1-PM10 in the Air Basin of the Southern Baikal Region // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023. V. 36. № 6. – P. 655-662.

296 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

297 Хуриганова О.И., Оболкин В.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. Мониторинг атмосферных загрязнений в городских и сельских районах Байкальской природной территории за 2019—2021 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2023. – № 4. – С. 54-65. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-4-54-65

298 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. – № 14. – P. 1-17. DOI: 10.3390/app13148171

299 Potemkina T., Potemkin V. Extreme phenomena in the Lake Baikal basin: tropical nights and hot days as indicators of climate warming (Eastern Siberia, Russia) // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2024. – С. 1-10.

300 Shikhovtsev A. Y. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2024. P. 31.

301 Baldauf, R.W., Watkins, N., Heist, D., Bailey, C., Rowley, P. and Shores, R. 2009. Near road air quality monitoring: factors affecting network design and interpretation of data. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2: 1-9

302 Marinaite I. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of the southern Baikal region (Russia): Sources and relationship with meteorological conditions // *Atmosphere*. – 2022. – Т. 13. – №. 3. – С. 420.

303 Шиховцев А.Ю. Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. №1. С. 74-80.

304 Banakh V. A., Smalikho I. N., Falits A. V. Wind–temperature regime and wind turbulence in a stable boundary layer of the atmosphere: Case study // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. №. 6. P. 955.

305 Banta R. M., Pichugina Y. L., Newsom R. K. Relationship between low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. 2003. V. 60. №20. P. 2549–2555.

306 Henry R. et al. Source region identification using kernel smoothing // *Environmental science & technology*. – 2009. – Т. 43. – №. 11. – С. 4090-4097.

307 Zhamsueva G., Zayakhanov, A., Tsydypov, V. et al. 2020. Spatial-temporal variability of small gas impurities over lake Baikal during the forest fires in the summer of 2019. *Atmosphere* 12(1): 20. DOI: 10.3390/atmos12010020

308 Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydypovet V.V. et al. 2019. Specific features of transport and transformation of atmospheric aerosol and gas admixtures in the coastal zone of Lake Baikal. *Atmospheric and Oceanic Optics* 32: 158-164. DOI: 10.1134/S1024856019020192

309 Shikhovtsev M.Y., 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