

Результаты синхронных измерений содержания оксидов азота и серы в атмосфере Южного Байкала в июле 2023 г

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Шиховцев М.Ю.¹, Моложникова Е.В.¹, Ходжер Т.В.¹, Жамсуева Г.С.²,
Цыдыпов В.В.², Тюрнев И.Н.^{1*}

¹ Лимнологический институт Сибирского Отделения Российской Академии Наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

² Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты синхронных измерений содержания малых газовых примесей на трех станциях мониторинга атмосферы, расположенных на побережье Южного Байкала, июль 2023 г. Измерения проведены с помощью автоматических газоанализаторов, что позволило получить данные о содержании оксидов серы и азота в атмосферном воздухе с высоким временным разрешением. Исследования показали, что, несмотря на небольшое расстояние между станциями наблюдений, колебания концентраций малых газовых примесей на разных берегах Южного Байкала происходят независимо друг от друга. Было выдвинуто предположение, что повышение концентраций оксидов азота и серы на западном побережье в летний период больше связано с воздействием региональных ТЭЦ, а на восточном с орографическими особенностями южной котловины озера и местными источниками. С использованием методов многомерной статистики, таких как NWR и PSCF, были получены оценки влияния метеорологических условий на содержание газовых компонентов в атмосфере Южного Байкала.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, диоксид серы, оксиды азота, Байкальская природная территория, Сибирь

Для цитирования: Шиховцев М.Ю., Моложникова Е.В., Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Тюрнев И.Н. Результаты синхронных измерений содержания оксидов азота и серы в атмосфере Южного Байкала в июле 2023 г // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - С. 1284-1301. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-5-1284

1. Введение

Оксиды серы (SO_2) и азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) являются распространенными атмосферными примесями, которые играют значительную роль в тропосфере, и приводят к возникновению ряда экологических проблем, таких как кислотные дожди, подкисление пресноводных экосистем (Moiseenko et al., 2018; 2022; Obolkin et al., 2016) и фотохимический смог (He et al., 2007; Shon et al., 2011). Как известно, оксиды серы и азота в атмосфере способствуют генерации аэрозольных частиц аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм (Seinfeld and Pandis, 2016; Liu et al., 2019), которые в свою очередь оказывают негативное воздействие на здоровье человека (Lelieveld et al., 2015; Tiotiu et al., 2020; Southerland et al., 2022), способствуют уменьшению прозрачности атмосферы (Kovadlo et al., 2018; Taschilin et al., 2021), приводят к усилению парни-

кового эффекта и изменению климата (Gharibzadeh et al., 2021; Liu et al., 2022). Кроме того, оксиды азота являются прекурсорами для образования приземного озона, что приводит к ухудшению качества воздуха и негативно влияет на здоровье людей.

За последние четыре десятилетия по всему миру, одновременно с улучшением состояния воздуха в промышленных городах (Fenger, 2009; Sillanpää et al., 2022), происходит увеличение содержания малых газовых примесей в атмосфере фоновых районов (Golobokova et al., 2018a; Sicard et al., 2023). Данная тенденция справедлива и для Байкальского региона, в атмосфере которого отмечается рост содержания оксидов азота (Golobokova et al., 2018b). Ранее было установлено, что значительное загрязнение атмосферы Южного Байкала происходит за счет высотного переноса оксидов серы и азота со стороны удаленных региональных ТЭЦ, расположенных к северо-западу (Obolkin et

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: tyurnev@lin.irk.ru (И.Н. Тюрнев)

Поступила: 03 октября 2024; Принята: 28 октября 2024;
Опубликована online: 31 октября 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



al., 2014; Shikhovtsev et al., 2023) и юго-востоку от озера (Obolkin et al., 2017; Popovicheva et al., 2021). Выбросы от источников загрязнения атмосферы, расположенных в пределах Центральной экологической зоны озера, как правило, распространяются локально и их вклад в общий уровень загрязнения атмосферы над озером в холодный период незначителен (Моложникова и Кучменко, 2004; Molozhnikova et al., 2023).

В летний период значимым источником, определяющим состояние атмосферы над озером, являются лесные пожары. Так, в ходе исследований (Marinaite et al., 2019; Golobokova et al., 2022; Khodzher et al., 2024) зафиксирован рост концентрации оксидов азота, серы, стойких органических загрязнителей, включая полиароматические углеводороды (ПАУ), сажи, биогенных элементов (минеральный азот, калий), микроэлементов (железо, марганец, ванадий, цинк, барий, свинец) как в атмосфере, так и в поверхностных водах озера. Продолжительное поступление азот- и серосодержащих веществ в атмосферу над Южным Байкалом привело к снижению уровня pH атмосферных осадков, которые являются основным источником питания юго-восточных притоков озера. Это, в свою очередь, вызвало закисление речных вод (Томберг и др., 2016).

В работе (Khodzher and Sorokovikova, 2007) показано, что от 2 до 6% растворимых компонентов, и от 30 до 60% питательных веществ поступают в водосборную зону озера Байкал из атмосферы, обеспечивая дополнительный приток питательных веществ. Выпадение атмосферных осадков с повышенным содержанием азота может быть одним из ключевых факторов, способствующих массовому развитию подледного сообщества динофлагеллят *Gymnodinium baicalense* var. *minor* Antipova в бухте Лиственничная (Южный Байкал) в 2018 г. (Obolkin et al., 2019). В бухте Большие Коты, расположенной на южном берегу озера Байкал, неоднократно наблюдались подобные явления. В июле 2019 года после четырёхдневных ливней, обогащённых азотом и фосфором, произошло массовое размножение цианобактерий (Bondarenko et al., 2021). В июне 2022 года из-за обильных осадков (34 мм) в этом же районе увеличилось количество фекальных индикаторных бактерий (Malnik et al., 2024).

Таким образом, газовые примеси могут оказывать влияние на формирование химического состава байкальской воды и определяют её качество. Благодаря внутрикотловинной циркуляции воздуха (Аршинов и др., 2001) примеси, попадающие в атмосферу, могут переноситься по всей акватории, способствуя загрязнению гидросферы региона. Более того, в горном бассейне могут накапливаться загрязняющие вещества не только из местных источников, но и с обширных территорий Сибири, Китая и Монголии (Mashyanov et al., 2022; Nasonov et al., 2023). Все эти процессы необходимо изучать, чтобы прогнозировать изменения окружающей среды в регионе с точки зрения негативного воздействия на уникальные природные объекты.

В исследовании поставлена цель определить, как малые атмосферные примеси распределяются в атмосфере Южного Байкала, и оценить местоположение удалённых источников в период минимального воздействия региональных ТЭЦ. Для этого использовались данные непрерывной автоматической регистрации концентрации малых газовых примесей в атмосферном воздухе Южного Байкала с высокой частотой измерений.

2. Материалы и методы

2.1. Расположение станций и используемое оборудование

Измерения проводились одновременно на трех станциях: «Лиственка» (51,84 с.ш., 104,89 в.д.), «Большие Коты» (51,89 с.ш., 105,06 в.д.) и «Боярский» (51,84 с.ш., 106,07 в.д.). Расположение станций наблюдения, крупнейших стационарных источников загрязнения атмосферы и карта-схема района исследования представлены на Рисунке 1. Измерения выполнялись с помощью хемилюминесцентных газоанализаторов фирмы ОПТЕК (Санкт-Петербург, Россия): СВ-320 и СВ-320А (SO₂); РА-310А (NO₂ и NO); с пределом обнаружения 0,001 мг/м³, приведенной погрешностью ± 25% в диапазоне от 0 мг/м³ до 0,05 мг/м³ и относительной погрешностью ± 25% в диапазоне от 0,05 мг/м³ до 2,0 мг/м³. Данные приборы проходят ежегодную поверку в лаборатории ОПТЕК. Сведения о направлении и скорости ветра получены с помощью акустической метеорологической системы АМК-11 (стационар «Боярский») и метеоконцентрации Сокол-М (станции «Лиственка» и «Большие Коты»).

2.2. Непараметрическая регрессия ветра (NWR)

Для выявления потенциальных локальных источников загрязнения атмосферы на основе метеорологических данных была использована рецепторная модель непараметрической регрессии ветра (NWR) (Henry et al., 2009). В этом исследовании для анализа NWR использовался пакет *repair* (язык R), при этом для результирующего направления и скорости ветра был принят метод сглаживания ядра Гаусса (Carslaw and Ropkins, 2012). Анализ NWR определяется следующими образом (1) и (2):

$$E(C|\theta, u) = \frac{\sum_{i=1}^N K_1 \left(\frac{(\theta - W_i)}{\sigma} \right) K_2 \left(\frac{(u - U_i)}{h} \right) C_i W_i}{\sum_{i=1}^N K_1 \left(\frac{(\theta - W_i)}{\sigma} \right) K_2 \left(\frac{(u - U_i)}{h} \right)} \quad (1)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5x^2} \quad (2)$$

где C_i – измеренная концентрация загрязняющего вещества, U_i и W_i – результирующая скорость ветра и стандартное отклонение направления ветра для i -го наблюдения. N – общее количество наблюдений.

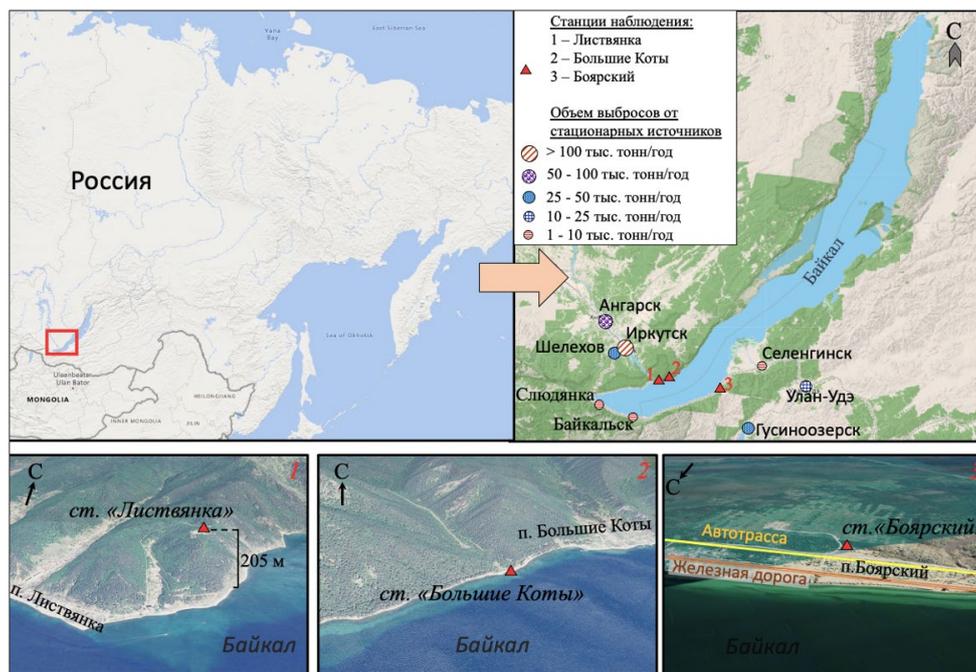


Рис.1. Расположение станции отбора проб: 1 – «Листвянка»; 2 – «Большие Коты»; 3 – «Боярский» и карта исследуемой местности

ний; K_1 и K_2 – сглаживающие ядра; θ – направление ветра; u – скорость ветра; и σ и h являются параметрами сглаживания для направления и скорости ветра соответственно.

2.3. Функция вклада потенциальных источников (PSCF)

Определение местоположения удаленных источников анализируемых загрязняющих веществ выполнено с помощью функции вклада потенциальных источников (PSCF). Метод основан на анализе обратных траекторий движения воздушных масс. Обратные траектории продолжительностью 72 часа, необходимые для анализа, сгенерированы с помощью модели HYSPLIT, разработанной Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) (Draxler and Hess, 1998; Stein et al., 2015). PSCF рассчитывается с учетом вероятности возникновения i концентрации в каждой ячейке сетки и рассчитывается с использованием следующего уравнения (3):

$$PSCF_{i,j} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (3)$$

где m_{ij} – количество точек, концентрация которых превышает пороговое значение, а n_{ij} – количество конечных точек обратных путей, которые проходят через каждую ячейку сетки (Karnaе and John, 2011; Liu et al., 2024).

3. Результаты и обсуждения

3.1. Содержание газовых примесей в атмосфере Южного Байкала

В исследовании рассмотрены результаты анализа данных о концентрации SO_2 , NO и NO_2 в при-

земном слое атмосферы в районе Южного Байкала, которые были получены в период с 17 по 28 июля 2023 года. На Рисунке 2 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 с измерениями, проведенными в ходе корабельных экспедиций 2020-2022 гг. (Zhamsueva et al., 2020), так и наземных измерениями проведенных на стационаре Боярский в 2015 г. (Zayakhanov et al., 2019).

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 2-В на стационаре «Боярский» периодически регистрировались краткосрочные эпизоды подъема концентрации диоксида азота свыше 20 $мкг/м^3$.

3.2. Идентификация локальных источников с использованием модели NWR

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 (Рис. 3-8).

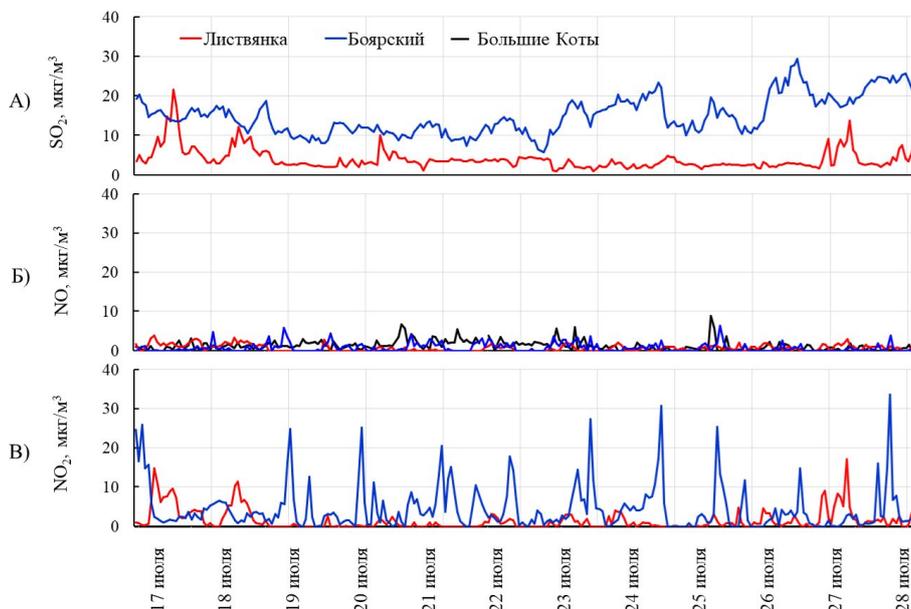


Рис.2. Временная изменчивость среднечасовых значений: А) диоксида серы; Б) оксида азота; В) диоксида азота на станциях «Листвянка», «Большие Коты», «Боярский» с 17 по 28 июля 2023 г.

В результате проведённого анализа (Рис. 3-5) 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 фоно-

вых значений Южного Байкала (Zhamsueva et al., 2022; Shikhovtsev et al., 2024). В суточной динамике оксидов азота выделяется второе повышение с 12 до 15 часов. 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 посёлка Листвянка и залива Лиственничный. Вероятными источниками данных газовых примесей могут являться автомобильный и водный транспорт.

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

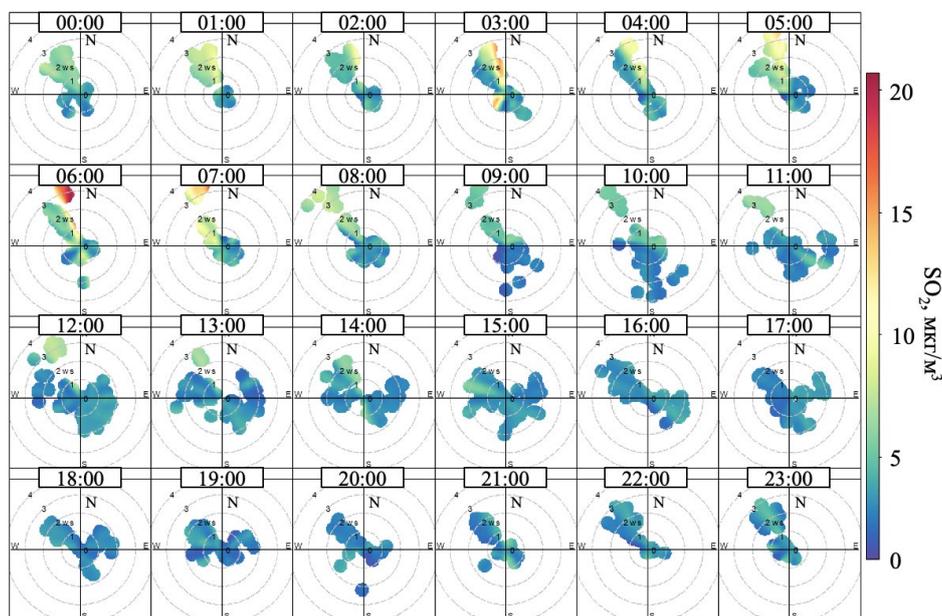


Рис.3. NWR-анализ для десятиминутных концентраций SO_2 в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г.

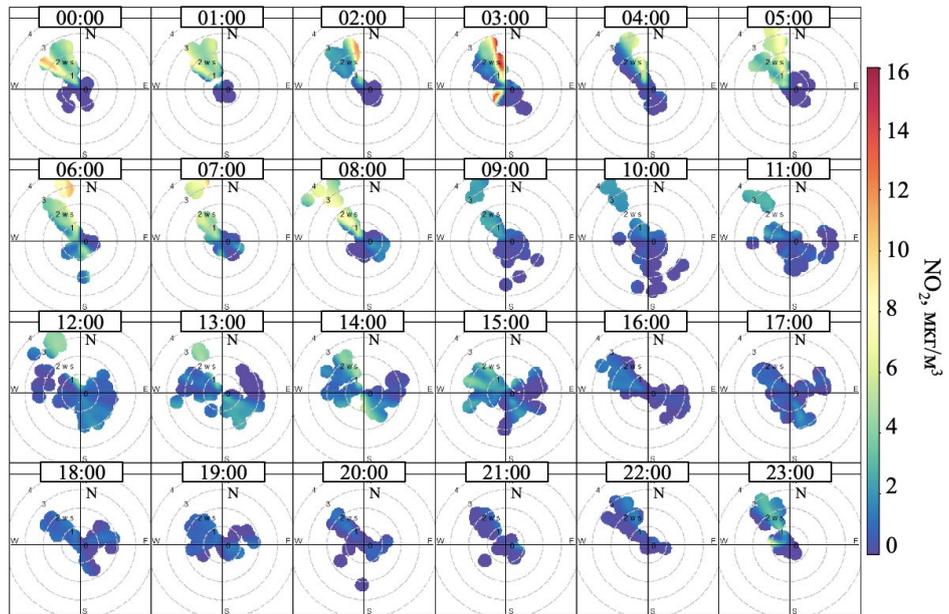


Рис.4. NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO₂ в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г

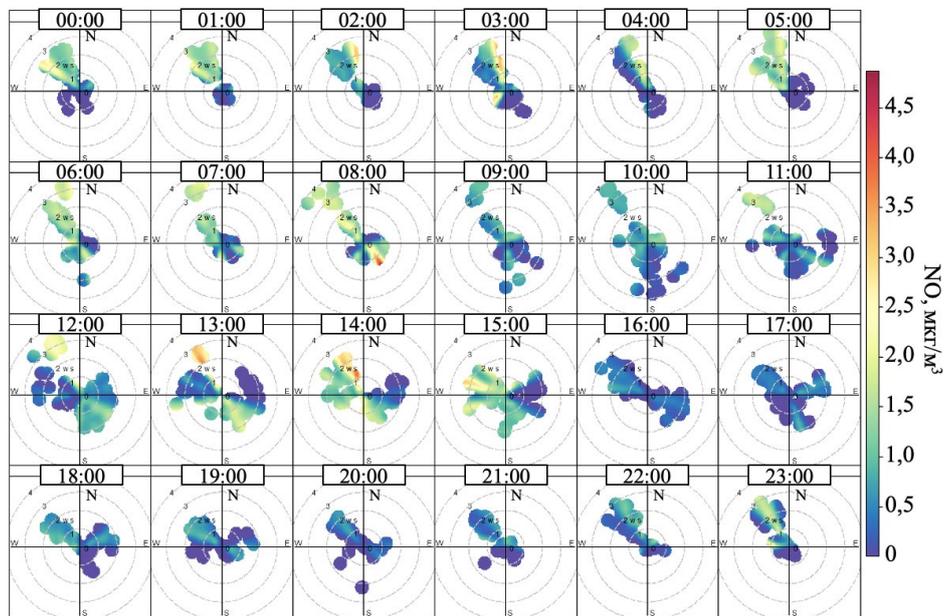


Рис.5. NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO в полярной системе координат на ст. «Листвянка», июль 2023 г.

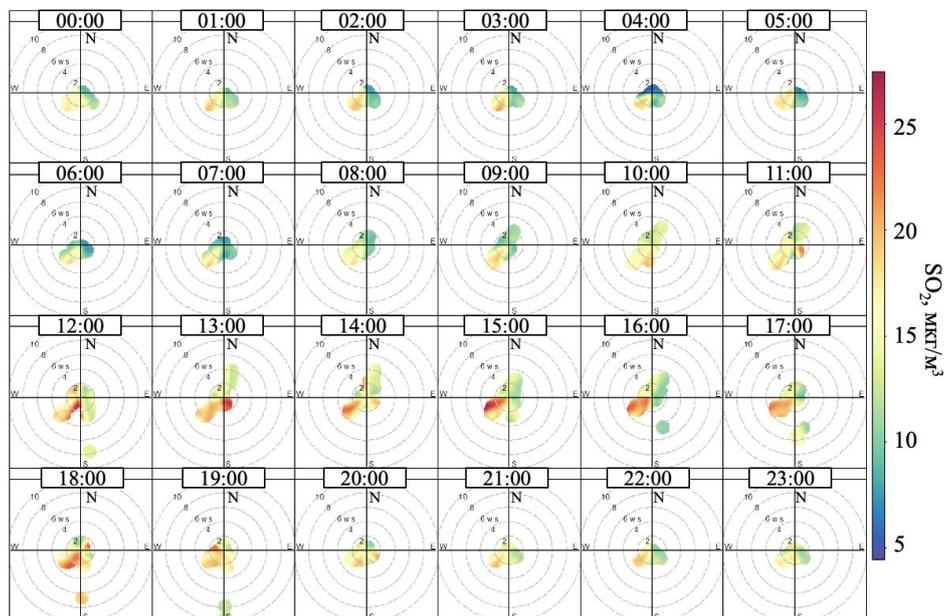


Рис.6. NWR-анализ для десятиминутных концентраций SO₂ в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

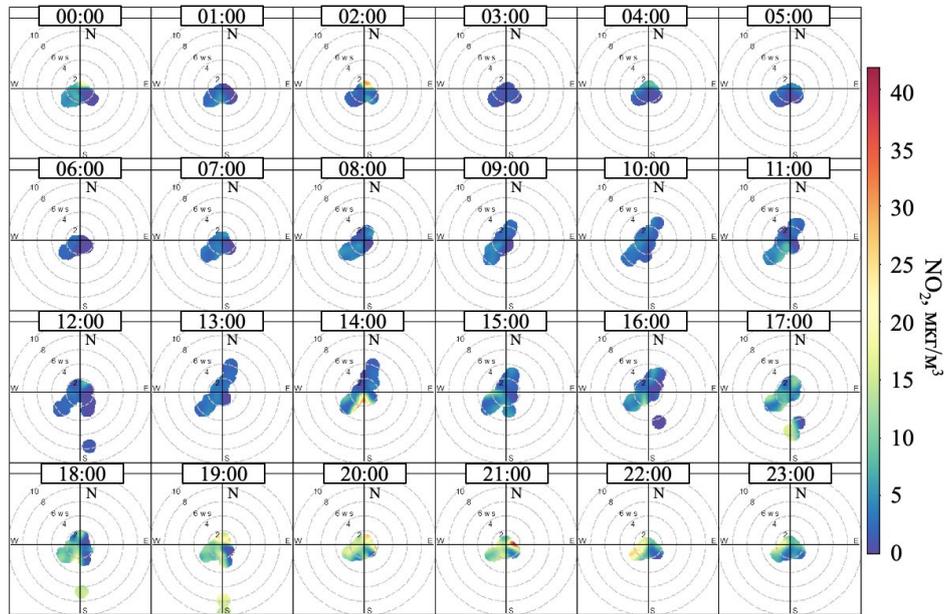


Рис.7. NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO_2 в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

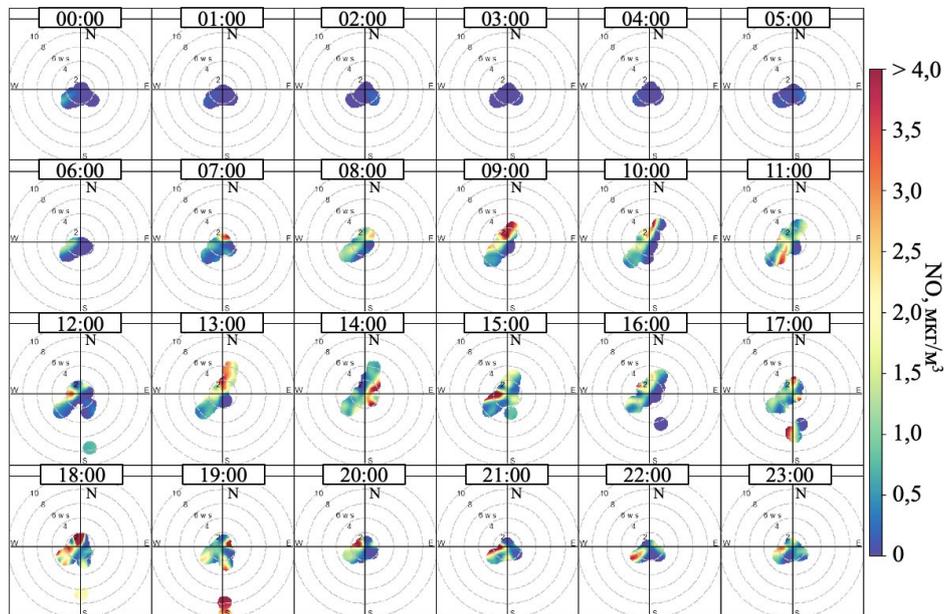


Рис.8. NWR-анализ для десятиминутных концентраций NO в полярной системе координат на ст. «Боярский», июль 2023 г.

(Рис. 6–7). Согласно NWR анализу, были выявлены отдельные эпизоды, когда воздушные массы, обогащённые оксидами азота и серы, переносятся с юга вдоль долины реки Мантуриха. Проведённый расчёт прямых траекторий движения воздушных масс (Рис. 9) показал, что повышение содержания оксидов серы и азота на стационаре «Боярский» может быть связано с влиянием удаленных источников, расположенных в городе Гусиноозерск.

NWR-анализ, проведённый для NO (Рис. 8), 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 стационар «Боярский» подвержен влиянию локальных источников загрязнения атмосферы, таких как автотранспорт. В ночные часы концентрации NO снижаются до значений, близких к пределу обнаружения прибора.

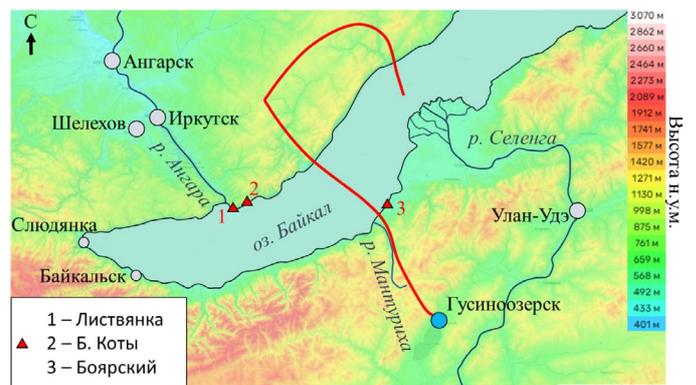


Рис.9. Топографическая карта исследуемого региона (<https://ru-ru.topographic-map.com>) и прямая траектория движения воздушных масс от стационарных источников г. Гусиноозерск на высоте 500 м AGL, 20.07.2023 7:00 МВ.

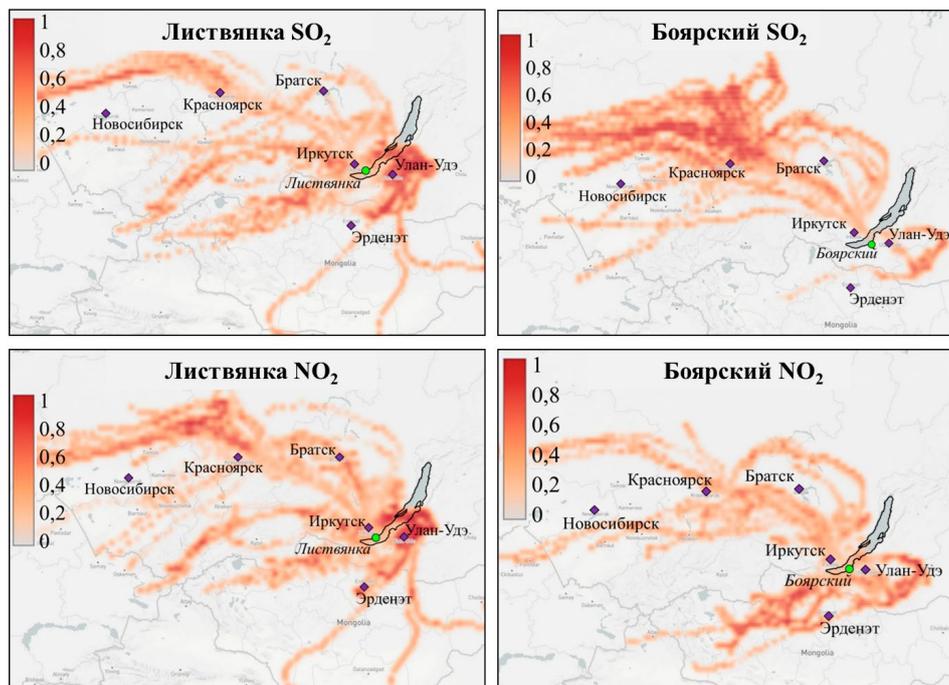


Рис.10. Пространственное распределение вероятности расположения источника SO_2 и NO_2 на ст. «Листвянка» и «Боярский» выполненное с помощью PSCF-анализа с 17 по 28 июля

3.3. Идентификация удаленных источников с использованием анализа PSCF

Для определения областей потенциальных источников газовых примесей – NO_2 и SO_2 в атмосфере Южного Байкала мы использовали метод методов многомерной статистики, основанный на совместном анализе обратных траекторий, рассчитанных с помощью модели HYSPLIT и измерениях приземных концентраций малых газовых примесей. Чтобы оценить удаленные источники продолжительность обратных траекторий принималась равной 72 часам. Расчеты проводились для 1000 метров над уровнем земли (AGL) за период с 17 по 28 июля 2023 г.

Результаты анализа PSCF представлены на Рисунке 10. Из расчетов видно, что вероятности расположения удаленных источников для NO_2 и SO_2 (более 0,5) схожи для двух станций. Первый максимум определен к северу, северо-западу от станций наблюдения. Воздушные массы, входящие в данный сектор характеризуются, как арктические и умеренные, сформировавшиеся над Северной Атлантикой и трансформировавшиеся при движении над промышленными районами Западной и Восточной Сибири, где крупными источниками поступления оксидов азота и серы являются предприятия топливно-энергетического комплекса (Майск, 2017). Поэтому можно предположить, что на начало исследования (с 17 по 23 июля), когда в приземном слое наблюдалась, стабильная атмосфера с незначительными северо-западными потоками, направленными в сторону Южного Байкала, вклад в загрязнение воздушного бассейна южной котловины озера оказывали влияние не только источники Иркутско-Черемховского промышленного узла, но и промышленные города Новосибирской области,

Красноярского края и севера Иркутской области. Это согласуется с данными приземных измерений, продемонстрированных на Рисунках 2-5.

Второй максимум вероятности расположения удаленных источников визуализируется к юг, юго-востоку озера. Он связан с изменением метеорологической ситуации в регионе 23 июля. Станции мониторинга находились под влиянием малоградиентного поля атмосферного давления со слабыми местными ветрами различных направлений, (Рис. 3-8) с небольшим преобладанием южных и юго-восточных ветров станция «Листвянка» и юго-западных, южных ветров на станцию «Боярский». На состояние воздушного бассейна Южного Байкала оказывали влияния воздушные массы, сформировавшиеся над территорией Казахстана и Монголии. Исходя из Рисунка 10 мы видим, что основные источники расположены в промышленных городах Республики Бурятия (гг. Улан-Удэ, Гусиноозерск и пп. Каменск, Селенгинск), а также незначительное влияние г. Эрденэт (Монголия).

4. Заключение

В летний период 2023 года на трех станциях мониторинга атмосферы в Южном Байкале синхронно проанализированы среднечасовые концентрации малых газовых примесей – оксидов серы и азота, метеорологические параметры, включая скорость и направление ветра. Результаты исследования показали, что, несмотря на небольшое расстояние между станциями наблюдений изменения в содержании малых газовых примесей на разных берегах Южного Байкала происходят независимо друг от друга. Причины таких изменений обусловлены расположением станций, особенностями внутрикотловинной циркуляции и расположением относительно антропогенных источников.

Оценки влияния метеорологических параметров на содержание газовых примесей в атмосфере Южного Байкала с использованием модели NWR показали, что, максимальные концентрации на западном побережье озера зафиксированы при ветрах северо-западного направления со скоростью от 1 до 4 м/с. Для восточного побережья озера характерно повышение концентраций при юго-западном в том же диапазоне скоростей.

С помощью функции вклада потенциальных источников (PSCF) определены местоположения удаленных источников, оказавших влияние на состав атмосферного воздуха в южной котловине озера летом 2023 г. Наиболее вероятный вклад, внесли источники расположенные на территории Республики Бурятия и Красноярского края.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания ЛИН СО РАН № 0279-2021-0014 «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы» (измерения на ст. «Листвянка») и гранта РФ №19-77-20058 П (измерения на ст. «Большие Коты» и «Боярский»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Shirokaya A.A. et al. 2021. *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 1101-1110. DOI: [10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2021-A-1-1101)
- Carslaw D.C., Ropkins K. 2012. Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software* 27: 52-61. DOI: [10.1016/j.envsoft.2011.09.008](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008)
- Draxler R.R., Hess G.D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Australian Meteorological Magazine* 47: 295-308.
- Fenger J. 2009. Air pollution in the last 50 years—From local to global. *Atmospheric environment* 43(1): 13-22. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.09.061](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.061)
- Gharibzadeh M., Bidokhti A.A., Alam K. 2021. The interaction of ozone and aerosol in a semi-arid region in the Middle East: Ozone formation and radiative forcing implications. *Atmospheric Environment* 245(118015): 1-50. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2020.118015](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118015)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Obolkin V.A. et al. 2018. Aerosol in the atmosphere of the Baikal region: history and contemporary researches. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 49-57. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-49](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-49)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Obolkin V.A. et al. 2018. Long-term investigations of atmospheric aerosol and gaseous impurities in Southern Pribaikalye, East Siberia. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 10(3): 74-84. DOI: [10.19080/IJESNR.2018.10.555786](https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.10.555786)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Zhamsueva G.S. et al. 2022. Variability of the chemical composition of the atmo-

spheric aerosol in the coastal zone of the southern basin of Lake Baikal (East Siberia, Russia). *Atmosphere* 13(7): 1090. DOI: [10.3390/atmos13071090](https://doi.org/10.3390/atmos13071090)

Henry R., Norris G.A., Vedantham R. et al. 2009. Source Region Identification Using Kernel Smoothing. *Environmental Science & Technology* 43: 4090-4097. DOI: [10.1021/es8011723](https://doi.org/10.1021/es8011723)

He Y., Uno I., Wang Z. et al. 2007. Variations of the increasing trend of tropospheric NO₂ over central east China during the past decade. *Atmospheric Environment* 41(23): 4865-4876. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2007.02.009](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.009)

Karnae S., John K. 2011. Source apportionment of fine particulate matter measured in an industrialized coastal urban area of South Texas. *Atmospheric Environment* 45(23): 3769-3776. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2011.04.040](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.040)

Khodzher T.V., Sorokovikova L.M. 2007. An assessment of the entry of soluble substances from the atmosphere and with the river runoff into Lake Baikal. *Geography and Natural Resources* 3: 185-191.

Khodzher T.V., Yausheva E.P., Shikhovtsev M.Yu. et al. 2024. Black Carbon in the Air of the Baikal Region, (Russia): Sources and Spatiotemporal Variations. *Applied sciences* 14 (16): 1-18. DOI: [10.3390/app14166996](https://doi.org/10.3390/app14166996)

Kovadlo P., Shikhovtsev A., Lukin V. et al. 2018. Solar activity variations inducing effects of light scattering and refraction in the Earth's atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 179: 468-471. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.06.001)

Lielielvd J., Evans J.S., Fnaiss M. et al. 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525 (7569): 367-371. DOI: [10.1038/nature15371](https://doi.org/10.1038/nature15371)

Liu J., Guo Z., Zhou L. et al. 2022. 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* 10(1039559): 1-17. DOI: [10.3389/fenvs.2022.1039559](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039559)

Liu Y., Xu X., Ji D. et al. 2024. Examining trends and variability of PM_{2.5} associated organic and elemental carbon in the megacity of Beijing, China: Insight from decadal continuous in-situ hourly observations. *Science of The Total Environment* 938(173331): 1-14. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.173331](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173331)

Liu Y., Zheng M., Yu M. et al. 2019. High-time-resolution source apportionment of PM_{2.5} in Beijing with multiple models. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(9): 6595-6609. DOI: [10.5194/acp-19-6595-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-6595-2019)

Malnik V.V., Gorshkova A.S., Tomberg I.V. et al. 2024. Coastal Water Quality in Lake Baikal in Bol'shie Koty Bay, Determined by the Effect of Atmospheric Precipitation and the Survival of Indicator Microorganisms. *Water Resources* 51: 267-283. DOI: [10.1134/S0097807824700787](https://doi.org/10.1134/S0097807824700787)

Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Khodzher T.V. 2019. Distribution characteristics of PAHs and solid particles over the water area of lake Baikal during wildfires in summer 2018. *Proceedings of SPIE* 11208: 1-6. DOI: [10.1117/12.2539014](https://doi.org/10.1117/12.2539014)

Mashyanov N.R., Pogarev S.E., Sholupov S.E. et al. 2022. Air mercury monitoring in the Baikal area (2011-2021). *Limnology and Freshwater Biology* 3: 1315-1318. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-3-1315](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1315)

Moiseenko T.I., Bazova M.M., Gashkina N.A. 2022. Development of lake from acidification to eutrophication in the arctic region under reduced acid deposition and climate warming. *Water* 14(21): 1-19. DOI: [10.3390/w14213467](https://doi.org/10.3390/w14213467)

Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A. et al. 2018. Present status of water chemistry and acidification under nonpoint sources of pollution across European Russia and West Siberia. *Environmental Research Letters* 13(105007): 1-13. DOI: [10.1088/1748-9326/aae268](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae268)

- Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Yu., Netsvetaeva O.G. et al. 2023. 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* 13(14): 1-17. DOI: [10.3390/app13148171](https://doi.org/10.3390/app13148171)
- Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M. et al. 2023. Study of Atmospheric Aerosol in the Baikal Mountain Basin with Shipborne and Ground-Based Lidars. *Remote sensing* 15(3816): 1-18. DOI: [10.3390/rs15153816](https://doi.org/10.3390/rs15153816)
- Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L. et al. 2016. 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* 73(3): 452-461. DOI: [10.1080/00207233.2016.1165481](https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1165481)
- Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L. et al. 2014. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region. *International Journal of Environmental Studies* 71(3): 391-397. DOI: [10.1080/00207233.2014.918396](https://doi.org/10.1080/00207233.2014.918396)
- Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L. et al. 2017. Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from regional coal power plants to the South Baikal water basin. *Atmospheric and Oceanic Optics* 30(4): 360-365. DOI: [10.1134/S1024856017040078](https://doi.org/10.1134/S1024856017040078)
- Obolkin V.A., Volkova E.A., Ohira S.I. et al. 2019. The role of atmospheric precipitation in the under-ice blooming of endemic dinoflagellate *Gymnodinium baicalense* var. *minor* Antipova in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 6: 345-352. DOI: [10.31951/2658-3518-2019-A-6-345](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-6-345)
- Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S. et al. 2021. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal. *Journal of Environmental Sciences* 107: 49-64. DOI: [10.1016/j.jes.2021.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.011)
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. 2016. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley-VCH.
- Shikhovtsev M.Y., Molozhnikova Y.V., Obolkin V.A. et al. 2024. 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* 14(18): 1-19. DOI: [10.3390/app14188327](https://doi.org/10.3390/app14188327)
- Shikhovtsev M.Yu., Obolkin V.A., Khodzher T.V. et al. 2023. Variability of the Ground Concentration of Particulate Matter PM1—PM10 in the Air Basin of the Southern Baikal Region. *Atmospheric and Oceanic Optics* 36(6): 655-662. DOI: [10.1134/S1024856023060192](https://doi.org/10.1134/S1024856023060192)
- Shon Z.H., Kim K.H., Song S.K. 2011. Long-term trend in NO₂ and NO_x levels and their emission ratio in relation to road traffic activities in East Asia. *Atmospheric Environment* 45(18): 3120-3131. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2011.03.009](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.009)
- Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S.C. et al. 2023. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment* 858(160064): 1-13. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.160064](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064)
- Sillanpää S., Fung P.L., Niemi J.V. et al. 2022. Long-term air quality trends of regulated pollutants in the Helsinki metropolitan area from 1994–2019 and its implications to the Air Quality Index. *Boreal Environment Research* 27: 61-79. DOI: [10.1547/porel.1254.238](https://doi.org/10.1547/porel.1254.238)
- Southerland V.A., Brauer M., Mohegh A. et al. 2022. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health* 6(2): e139-e146. DOI: [10.1016/S2542-5196\(21\)00350-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00350-8)
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12): 2059-2077. DOI: [10.1175/BAMS-D-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1)
- Taschilin M., Yakovleva I., Sakerin S. et al. 2021. Spatiotemporal variations of aerosol optical depth in the atmosphere over Baikal region based on MODIS data. *Atmosphere* 12(12): 1-10. DOI: [10.3390/atmos12121706](https://doi.org/10.3390/atmos12121706)
- Tiotiu A.I., Novakova P., Nedeva D. et al. 2020. Impact of air pollution on asthma outcomes. *International journal of environmental research and public health* 17(17): 1-29. DOI: [10.3390/ijerph17176212](https://doi.org/10.3390/ijerph17176212)
- 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](https://doi.org/10.1134/S1024856019020192)
- 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](https://doi.org/10.3390/atmos12010020)
- Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T. et al. 2022. 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* 13(1): 139. DOI: [10.3390/atmos13010139](https://doi.org/10.3390/atmos13010139)
- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А. и др. 2001. Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине озера Байкал. *Оптика атмосферы и океана* 14(4): 290-293.
- Майсюк Е.П. 2017. Роль энергетики в экологическом состоянии Байкальской природной территории. *География и природные ресурсы* 1: 100-107. DOI: [10.21782/GIPRO206-1619-2017-1\(100-107\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2017-1(100-107))
- Моложникова Е.В., Кучменко Е.В. 2004. Оценка некоторых характеристик образования и выпадения сульфатов в городах Прибайкалья. *Оптика атмосферы и океана* 17(5-6): 418-422.
- Томберг И.В., Сорочиков Л.М., Нецветаева О.Г. и др. 2016. Химический состав и тенденция закисления снеговых вод и вод притоков Южного Байкала. *Оптика атмосферы и океана* 29(6): 516-520. DOI: [10.15372/AOO20160612](https://doi.org/10.15372/AOO20160612)