

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Экспериментальные исследования аэрозольных и газовых примесей в приводном слое атмосферы оз. Байкал (корабельная экспедиция, сентябрь 2021 г.)

Г.С. Жамсуева¹, Т.В. Ходжер², Ю.С. Балин³, А.С. Заяханов¹,
В.В. Цыдышов¹, И.Э. Пеннер³, С.В. Насонов^{✉3}, И.И. Маринайте^{2*}

¹Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 20.06.2021 г.;
после доработки 5.07.2022 г.;
принята к печати 16.07.2022 г.

В работе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований газовых примесей и вертикальной структуры аэрозоля в атмосфере над оз. Байкал в сентябре 2021 г., проводимых с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Академик В.А. Коптюг». Измерения газовых примесей в приводном слое атмосферы проведены с использованием средств локального контроля – хемилюминесцентных газоанализаторов. Зондирование аэрозольных полей осуществлялось с применением многочастотного поляризационного аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-А2». По сравнению с предшествующими экспедициями в 2021 г. регистрировались низкие концентрации газовых примесей и аэрозоля, близкие к фоновым. Результаты анализа показали, что основной вклад в загрязнение атмосферы вносили локальные источники, расположенные вблизи береговой зоны озера.

Ключевые слова: озеро Байкал, тропосферный озон, окислы азота, аэрозоль, лидар, лесные пожары, НИС «Академик В.А. Коптюг»; Lake Baikal, tropospheric ozone, nitrogen oxides, aerosol, lidar, forest fires, RV «Academician V.A. Koptyug».

Введение

В последние годы контроль поступления загрязняющих веществ в экосистему оз. Байкал через атмосферу приобретает особое значение в связи с изменением климата и увеличением количества и площадей лесных пожаров в Сибири, оказывающих огромное влияние на ее загрязнение. Главными источниками поступления оксидов серы, азота, твердых взвесей, тяжелых металлов и других примесей в атмосферу Байкала являются выбросы крупных тепловых электростанций (ТЭЦ), расположенных в ближайших к озеру городах Прибайкалья и мелких угольных котельных в Центральной экологической зоне озера. Основные загрязняющие

вещества при лесных пожарах – оксид углерода, оксиды азота, серы, некоторые тяжелые металлы и мелкие частицы аэрозоля размерами менее 2,5–5,0 мкм, наиболее опасные для здоровья человека [1]. На пространственное распределение атмосферных примесей над акваторией Байкала влияют орографические особенности территории и специфическое взаимодействие местных ветров с основным воздушным потоком, что приводит к круговой циркуляции воздуха в котловине озера и неблагоприятным метеорологическим условиям для рассеивания примесей [2, 3].

В составе органической фракции байкальского аэрозоля полиароматические углеводороды (ПАУ) относят к микрокомпонентам. Над водной поверхностью Байкала суммарная концентрация обнаруженных ранее ПАУ находится на низком уровне: 0,05–1,5 нг/м³ [4]. Один из источников поступления ПАУ в акваторию Байкала – воздушный перенос аэрозоля от промышленных предприятий Прибайкалья, расположенных в направлении доминирующих северо-западных ветров.

* Галина Санжиевна Жамсуева (Lmza@mail.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Александр Савельевич Заяханов (Lmza@mail.ru); Вадим Владимирович Цыдышов (Lmza@mail.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@gmail.com); Ирина Иозовна Маринайте (marin@lin.irk.ru).

Результаты наблюдений за уровнем загрязнения атмосферы акватории Байкала и прилегающих территорий в 2018–2020 гг. достоверно показали ее повышенное загрязнение за счет высокого уровня задымления, причина которого – крупномасштабные лесные пожары на севере Иркутской обл., Красноярского края и Республики Саха (Якутия), что также повлекло за собой увеличение содержания как газовых, так и аэрозольных примесей [5, 6].

Настоящая работа продолжает серию публикаций об уровне загрязнения атмосферы акватории Байкала.

Аппаратура и методы

В продолжение регулярных ежегодных исследований, направленных на обнаружение источников загрязнения атмосферы и прогнозирования возможных климатологических изменений Байкальского региона, в сентябре 2021 г. был проведен очередной комплексный эксперимент на Байкале с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Академик В.А. Коптюг». Схема маршрута судна и места стоянок с датами приведены на рис. 1, координаты точек измерения определялись корабельной системой GPS. Общая протяженность маршрута составила ~1500 км. Экспедиция стартовала в порту Листвянка, затем маршрут судна пролегал вдоль западного берега на север (Листвянка – Ольхон – Северобайкальск), далее вдоль восточного и южного берегов (Бухта Аяя – Усть-Баргузин – Селенга – Байкальск), истока р. Ангара.



Рис. 1. Маршрут следования НИС «Академик В.А. Коптюг» и места основных стоянок с датами (2021 г.)

Измерения газовых примесей и аэрозоля в приводном слое атмосферы проведены с использованием средств локального контроля – хемилуминесцентных газоанализаторов диоксида серы, приземного озона, окислов азота (ООО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург), диффузионного спектрометра ДАС2702М (ООО «АэроНаноТех», г. Москва), высокообъемного пробоотборника аэрозолей РМ10 (Andersen Instruments Inc., США), метеостанции «Метео-2» (ИОА СО РАН, Томск), установленных на борту НИС. В корабельных условиях зондирование аэрозольных полей проводилось с применением многочастотного поляризационного аэрозоль-

но-рамановского лидара «ЛОЗА-А2» [7] Центра коллективного пользования «Атмосфера» ИОА СО РАН. Основной акцент исследований с использованием лидарной аппаратуры был сделан на изучении временной трансформации вертикальной структуры аэрозольных полей на основе анализа двухмерных разрезов типа высота – время. Это позволяет выявить особенности формирования и переноса атмосферного аэрозоля в горной котловине.

Проводилось обнаружение 21 компонента ПАУ с помощью газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием [8]. За всю экспедицию было сделано 16 проб.

Для определения процессов переноса атмосферного аэрозоля и влияния внешних источников на его формирование гибридной моделью интегральной лагранжевой траектории частиц (HYSPLIT) рассчитывались 48-часовые обратные траектории, стартовая высота составляла 250 м над землей.

Результаты и обсуждение

В сентябре 2021 г., в отличие от предыдущих корабельных экспедиций 2018–2020 гг., в атмосфере не было зарегистрировано аномально высоких значений содержания дымового аэрозоля от лесных пожаров в Сибирском регионе, хотя ранее, в июле-августе, наблюдалось плотное заполнение атмосферы дымом от обширных лесных пожаров в Якутии и на севере Сибири. Это объясняется общей синоптической обстановкой, сложившейся в период проведения экспедиции. Действующие над регионом циклоны приводили к очищению атмосферы за счет постоянных осадков и сильных ветров. Кроме того, из-за плотной низкой облачности и дождей не всегда удавалось получить лидарные сигналы из верхних слоев тропосферы. Как показывают результаты наблюдений, основной вклад в загрязнение атмосферы вносили близлежащие к месту проведения наблюдений локальные источники.

Фоновое состояние атмосферы с однородным пограничным слоем без выраженных аэрозольных образований было зарегистрировано лидаром в период с 1 по 3 сентября 2021 г., когда маршрут экспедиции проходил вдоль западного берега по направлению на север. В этот период атмосфера была очищена после непрерывных дождей в предшествующие дни. В таких условиях ночью 2 сентября 2021 г. в районе бухты Аяя в Среднем Байкале зафиксировано резкое повышение концентрации уровня озона до 91 мкг/м^3 и диоксида серы до 24 мкг/м^3 (рис. 2, а), связанное с переносом теплых воздушных масс с прилегающей к береговой зоне территории, что подтверждают результаты реанализа HYSPLIT и информация синоптической карты (www.weathergraphics.com) на предыдущий день 1 сентября 2021 г. (рис. 2, б). Здесь выделяется локальная область повышенного атмосферного давления к западу от Байкала, в центре которой наблюдалась солнечная погода с высокой температурой воздуха $25,6 \text{ }^\circ\text{C}$, низкой относительной влажностью и небольшой скоростью ветра в дневное

время (14 ч). Это способствовало интенсивной фотохимической генерации озона и его некоторому накоплению в конце суточного цикла, влиянию дневного периода на ночной. За счет смещения и разрушения антициклона в ночь на 2 сентября 2021 г. теплые воздушные массы вынеслись над Байкалом, поэтому небольшая аномалия тепла наблюдалась и в районе бухты Аяя (рис. 2, в), следовательно, более высокий уровень O_3 , накопленный в дневное время на прилегающих территориях, привел к ночному приросту озона в акватории озера.

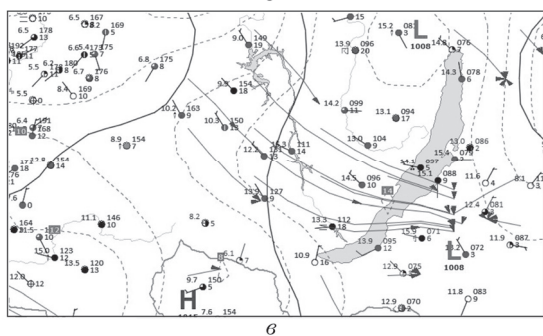
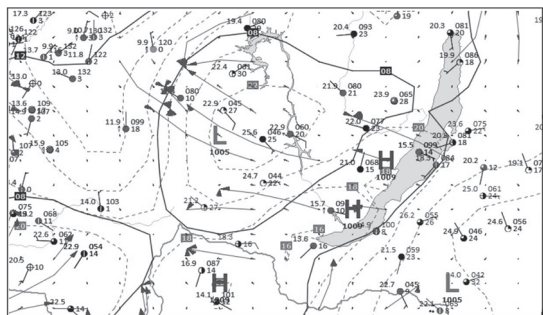


Рис. 2. Временной ход концентрации озона, диоксида серы (а); приземная синоптическая карта погоды на 1 (14:00) (б) и 2 (02:00) (в) сентября 2021 г.

При преобладающем западном переносе воздушных масс с территорий, где расположены крупные источники антропогенных выбросов — Иркутск, Ангарск, Братск и др., а также многочисленные туристические базы на побережье озера в Малом море, начиная с Ольхонских Ворот, в утренние часы наблюдался рост концентрации SO_2 до 40 мкг/м^3 , O_3 до 80 мкг/м^3 (рис. 3, а) из-за локальных антропогенных воздействий. Повышенные концентрации

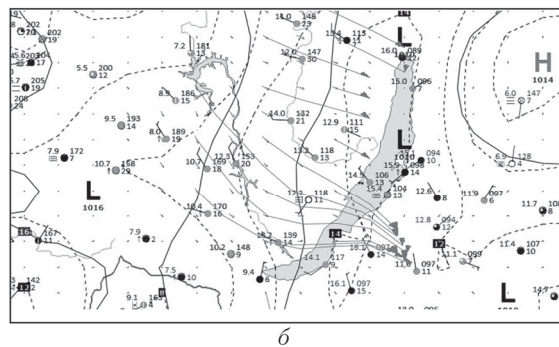
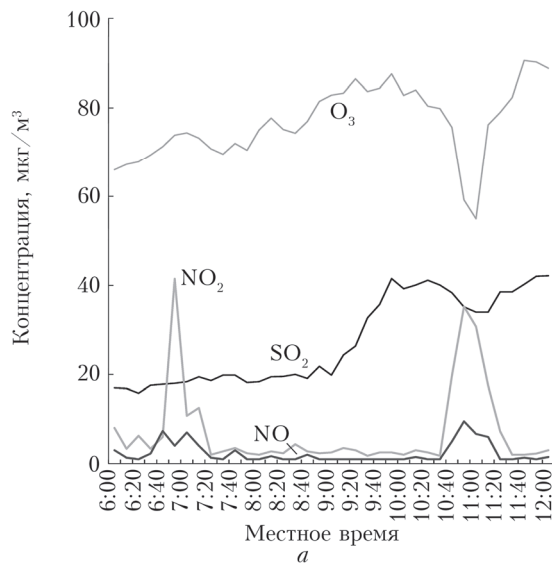
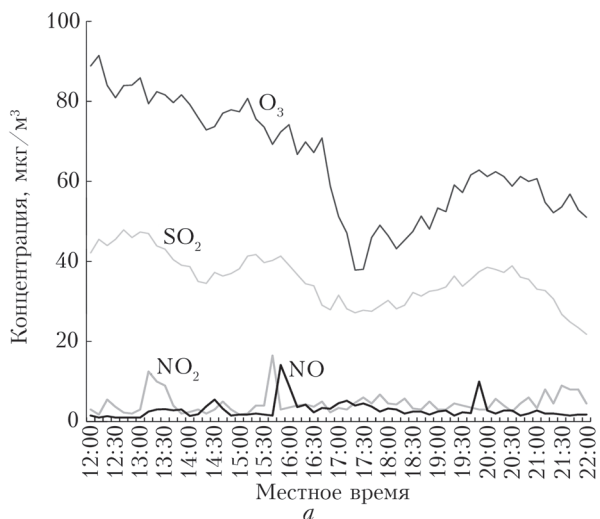


Рис. 3. Временной ход концентрации малых газовых примесей в приводном слое оз. Байкал в Малом море (а); приземная синоптическая карта погоды (б) 2 сентября 2021 г.

газовых примесей сохранялись по всему маршруту движения НИС в Малом море вдоль о-ва Ольхон, эпизодически наблюдалось повышение диоксида азота.

При выходе из Малого моря в течение длительного времени концентрации SO_2 и O_3 сохранялись высокими (рис. 4, а), наблюдался рост содержания субмикронного аэрозоля PM_{10} до $14,1 \text{ мкг/м}^3$, $PM_{2,5}$ до $3,5 \text{ мкг/м}^3$ из-за дымовых выносов из очагов лесных пожаров на севере Иркутской обл. и в Якутии. На рис. 4, б приведены результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс по модели HYSPLIT (рис. 4, а), подтверждающие вынос дымов во время проведения экспериментов (2 сентября 2021 г.). Этому способствовали и сильные ветры северного и северо-западного направлений со скоростью в отдельные периоды более 25 м/с .

По результатам лидарных наблюдений 3 сентября 2021 г. вблизи локальных источников выбросов г. Северобайкальска было зафиксировано повышенное содержание аэрозоля в нижней части тропосферы на высотах $400\text{--}800 \text{ м}$. На рис. 5 (цв. вкладка) приведена запись, демонстрирующая пространственно-временное распределение аэрозоля при прохождении корабля вблизи г. Северобайкальска с 12:30 до 13:10. Цветовая шкала в правой части



NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 1200 UTC 2 Sep 21
GDAS Meteorological Data

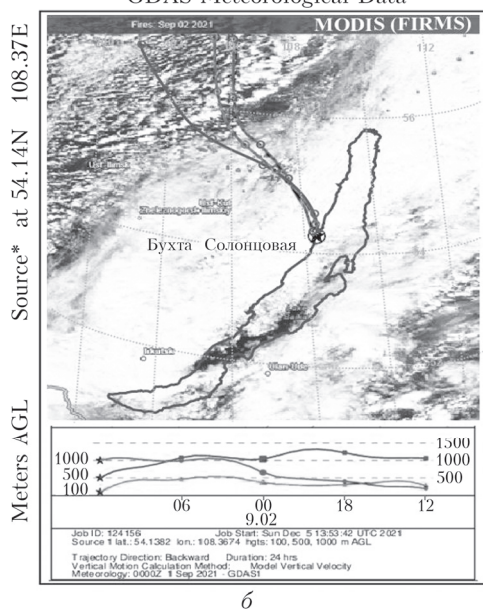


Рис. 4. Временной ход концентрации малых газовых примесей в приводном слое оз. Байкал 2 сентября 2021 г. (а); карта пожаров в северной части Байкала и обратные траектории движения воздушных масс по модели HYSPLIT (б)

рис. 5 соответствует величине отношения рассеяния для длины волны излучения $\lambda = 1064$ нм, на которой наиболее контрастно выделяется аэрозольная составляющая атмосферы. Дымовой шлейф от выбросов ТЭЦ в городе, постепенно распространяясь, осаждается на водную поверхность акватории озера.

Во время стоянки НИС вблизи Северобайкальска и пос. Нижнеангарска концентрации диоксида серы и окислов азота были заметно выше фоновых, в отдельные периоды наблюдались повышенные концентрации окислов азота из-за близости автотрассы. Концентрации приоритетных идентифицированных ПАУ вблизи Северобайкальска были выше ($0,43 \text{ нг/м}^3$, проба № 5) по сравнению с зарегистрированными средними суммарными концентрациями

ПАУ в атмосфере вдоль западного побережья Байкала ($0,17\text{--}0,36 \text{ нг/м}^3$, пробы 1–4). Во время ночной стоянки у пос. Нижнеангарска в условиях штילевой погоды обнаружены максимальные концентрации суммарного количества идентифицированных ПАУ ($4,4 \text{ нг/м}^3$, проба № 6). Из приоритетных ПАУ в аэрозоле преобладали флуорантен > пирен > бенз(б)флуорантен.

Низкие концентрации газовых примесей над акваторией озера наблюдались вдоль восточного побережья Северного Байкала по маршруту Нижнеангарск – бухта Ая при пасмурной и дождливой погоде. При заходе в бухту Ая, расположенную в горной котловине, и во время стоянки в ней наблюдалось снижение концентраций всех атмосферных примесей до фоновых значений, особенно в ночные часы, вследствие выноса чистого воздуха с окружающих лесных массивов во время ночного бриза. В бухте Ая зафиксированы самые низкие концентрации загрязняющих веществ по всему маршруту: SO_2 – $2,9 \text{ мкг/м}^3$, O_3 – $2,8 \text{ мкг/м}^3$, NO_2 – 2 мкг/м^3 , NO – 1 мкг/м^3 , $\text{PM}_{2,5}$ – $1,3 \text{ мкг/м}^3$, PM_{10} – $3,5 \text{ мкг/м}^3$. Такие уровни концентраций можно принять как фоновые значения для приводной атмосферы Байкала, к тому же по расчетам по траекторной модели переноса HYSPLIT в этот период воздушные массы поступали именно с «фоновых» северных территорий, где нет населенных пунктов.

Вместе с тем в местах стоянки судна в бухте Хакусы отмечено уже заметное влияние судовых двигателей на состав приводной атмосферы, поскольку бухта расположена в удалении от населенных пунктов Северного Байкала. В отличие от предыдущих лет в районах Чивыркуйского и Баргузинского заливов при дождливой погоде с сильным ветром западного и юго-западного направлений за счет циклона, действующего в период измерений над Байкалом (центр циклона находился в районе Среднего Байкала), влияние локальных антропогенных источников не зафиксировано. Здесь содержание суммы ПАУ в аэрозоле не превышало $0,35\text{--}0,38 \text{ нг/м}^3$ (пробы № 7–11).

Однако во время движения судна по поперечному разрезу из Баргузинского залива в Средний Байкал (Малое море – м. Крестовый) при прохождении населенных пунктов Максимиха и Безымянка наблюдался заметный рост концентрации SO_2 до 28 мкг/м^3 , O_3 до 66 мкг/м^3 , и $\text{PM}_{2,5}$ до $2,3 \text{ мкг/м}^3$ и PM_{10} до $4,6 \text{ мкг/м}^3$. Анализ траекторий переноса воздушных масс подтвердил, что рост концентраций этих примесей обусловлен их переносом с прибрежных территорий Республики Бурятия.

В Южном Байкале заметных признаков антропогенного влияния на состав атмосферного воздуха не наблюдалось. Дождливая и ветреная погода способствовала очищению атмосферы в этом районе озера. Суммарная концентрация ПАУ в устье р. Селенга составила $1,3 \text{ нг/м}^3$ (проба № 12). По маршруту вдоль населенных пунктов юго-восточного побережья Байкала (разрез устье р. Селенга – г. Байкальск) наблюдалось некоторое увеличение концентраций ПАУ до $2,5 \text{ нг/м}^3$ (проба № 13)

за счет заноса антропогенных аэрозольных примесей, индикатором которых выступают ПАУ. На переходе от г. Байкальска в исток р. Ангара вдоль незаселенных территорий западного побережья Южного Байкала содержание суммы ПАУ в аэрозоле снизилось от 1,3 до 0,27 нг/м³.

Одними из наиболее информативных с точки зрения наблюдения динамики формирования и переноса аэрозольных полей атмосферы над озером являются результаты, полученные во время прохождения участка маршрута по Южному Байкалу, вдоль западного берега до истока р. Ангары, 8 и 9 сентября 2021 г.

Утром 8 сентября 2021 г. была дождливая погода с низкой облачностью, с прояснением и улучшением погодных условий во второй половине дня. Анализ синоптических карт (<http://aari.ru>) и спутниковых снимков (по данным ФБУ «Авиалеосохрана») показал, что такая ситуация была обусловлена прохождением над Байкалом циклона, который перемещался с северо-запада на юго-восток и к моменту наблюдений на данном участке маршрута над Байкалом образовалась зона теплового фронта. В результате восхождения теплого воздуха на высоте 6–7 км появилась высокоструйная и перистая облачность, которая регистрировалась лидаром.

На рис. 6 (цв. вкладка) показаны три фрагмента пространственно-временных разрезов аэрозольного поля 8, 9 сентября 2021 г. На каждом рисунке дополнительно приведен усредненный за время измерений вертикальный профиль деполяризации. Анализ поляризационных характеристик сигналов помогает проводить селекцию аэрозоля по типу.

Измерения на этом участке маршрута были разделены на три эпизода. Первый эпизод связан с наблюдением аэрозольного шлейфа, который был зарегистрирован около 17:00 по местному времени и располагался в диапазоне высот ~500–1000 м (рис. 6, *a*). Аэрозольный слой характеризовался небольшими значениями отношения рассеяния, что говорит о присутствии в небольших концентрациях частиц в атмосфере, так как большая часть аэрозоля вымывалась за счет дождливой погоды. Деполяризация в слое была порядка 6–7%, причем нижняя часть слоя деполяризована чуть меньше, ~5–6%, т.е. можно предположить о наблюдении более обводненного аэрозоля в этой части.

Второй эпизод наблюдений — это временной промежуток примерно с 21:00 до 23:10 (рис. 6, *b*), когда аэрозоль начал осаждаться вниз, заполняя пограничный слой атмосферы. Деполяризация была порядка 5–6% по всему слою. Постепенно аэрозольное поле становится более однородным за счет выпадения более крупных частиц.

Третий эпизод был выделен на участке маршрута примерно с 23:10 8 сентября 2021 г. до 03:40 9 сентября 2021 г., когда аэрозоль был «прижат» в приводном слое до высоты 250 м. На рис. 6, *в* видны значения отношения рассеяния для этого эпизода, они чуть выше, чем в предыдущих. В этот период после 01:00 в структуре аэрозольного поля

отмечено возникновение так называемых внутренних гравитационных волн, что может быть связано с чередующимися восходящими и нисходящими движениями воздуха. Подобные структуры наблюдались на Байкале во время прохождения атмосферных фронтов [9] и были связаны с динамической неустойчивостью атмосферы на границе слоя перемешивания.

Анализ высотных изменений значений метеопараметров атмосферы по данным станции наблюдений, расположенной в г. Ангарске, на расстоянии ~100 км от места наблюдений (сайт университета Wyoming — <http://weather.uwyo.edu/sounding>), показал, что вечером 8 сентября регистрировались высокие значения относительной влажности воздуха — 60–90%, что могло способствовать конденсационному росту аэрозольных частиц. Направление ветра — северо-западное.

В целом во всех трех эпизодах стоит отметить небольшие значения деполяризации на $\lambda = 532$ нм (не превышающие 7–8%), что предполагает наличие мелких частиц приближенных к сферическим формам, которые чаще связаны с городским или промышленным загрязнением [10]. Для обоснования этой гипотезы был проведен траекторный анализ с использованием модели HYSPLIT, который показал, что ко времени прохождения судна по Южному Байкалу наблюдаемый аэрозоль был перенесен за счет ветровых потоков с северо-запада и траектория переноса примерно соответствовала направлению протекающей р. Ангары на участке районов г. Ангарска и Иркутска. Это подтверждает предположение о возможном городском происхождении наблюдаемого аэрозоля.

Приведенные выше картины пространственно-временной структуры аэрозольных полей тропосферы являются основой для получения информации о состоянии атмосферы над оз. Байкал и выявления основных источников и механизмов загрязнения воздуха с учетом физико-географических особенностей региона и синоптической ситуации. По результатам проведенных исследований было установлено, что в сложившейся на период проведения экспедиции синоптической обстановке над регионом, когда содержание аэрозоля в атмосфере преимущественно было фоновым из-за постоянного ее очищения действовавшими над Байкалом циклонами, аэрозоль от удаленных источников, в том числе от лесных пожаров в Сибири, в основном «вымывался» из атмосферы и основной вклад в аэрозольное загрязнение атмосферы давали близлежащие локальные источники. Распространяясь над озером, аэрозоль постепенно осаждался на его поверхность, что приводило к загрязнению воды. Поэтому в условиях возрастающего антропогенного воздействия на экосистему оз. Байкал важно проведение активной природоохранительной деятельности, направленной на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду.

Обращает на себя внимание населенный пункт Листвянка, расположенный на западном побережье Южного Байкала. Это один из самых больших

туристических объектов на Байкале, где проходит огромный поток автомобильного транспорта и сосредоточено наибольшее количество судов, эксплуатируемых на озере. Несмотря на неблагоприятные погодные условия и дождь во время движения судна по маршруту м. Толстый – Листвянка и стоянки в створе р. Ангары, доля загрязняющих примесей в атмосферном воздухе была высокой. Повышенные уровни концентрации SO_2 и окислов азота, PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ (рис. 7) в районе Лиственничного залива подтверждают, что наблюдается устойчивый перенос антропогенных примесей от жилых объектов, предприятий порта Байкал и Листвянка, и многочисленных судовых двигателей. Динамика концентрации антропогенных газовых примесей и аэрозоля находится в противофазе с концентрацией озона, особенно с содержанием NO : с повышением содержания оксида азота происходит резкое понижение озона. Концентрация озона при этом полностью расходуется на окисление этого соединения. Отмечен рост концентрации ПАУ в истоке р. Ангары ($2,5 \text{ нг/м}^3$, проба № 16).

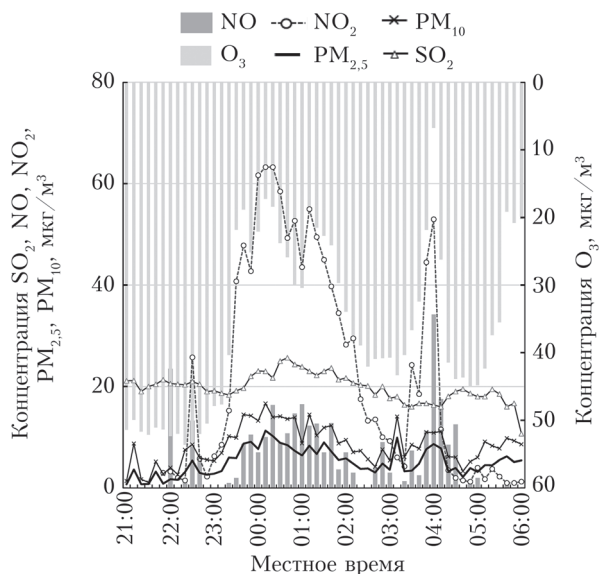


Рис. 7. Временной ход концентрации диоксида серы, окислов азота, озона, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} 8, 9 сентября 2021 г. во время движения судна по маршруту м. Толстый – Листвянка и стоянки в створе р. Ангары

В целом по всему маршруту суммарные концентрации ПАУ в приводной атмосфере в 2021 г. были низкими, в среднем составили $0,96 \text{ нг/м}^3$, что значительно ниже концентраций ПАУ, зафиксированных при пожарах в 2016 г., когда средние значения составляли $5,9 \text{ нг/м}^3$.

Отмечены различия в составе индивидуальных ПАУ из атмосферы над различными районами Байкала. В пробах аэрозолей с низкими значениями суммы ПАУ из индивидуальных соединений преобладали нафталин > 2-метилнафталин > 1-метилнафталин > фенантрен. В пробах аэрозолей, отобранных вблизи локальных источников, выделяются флуорантен > пирен > бенз(б)флуорантен. В пробах

аэрозоля в фоновых районах преобладает группа ПАУ с 2–3 бензольными кольцами (67%), тогда как вблизи источников увеличивается доля ПАУ с 4–6 бензольными кольцами (80–90%), которые в основном образуются при высокотемпературных процессах сгорания органического топлива [11].

Заключение

Экспедицию, проведенную в сентябре 2021 г., от предыдущих корабельных экспедиций 2018–2020 гг. отличает отсутствие в атмосфере аномально высоких концентраций аэрозольных и газовых примесей. Это, во-первых, объясняется общей синоптической обстановкой, сложившейся в период проведения экспедиции. Над регионом действовали циклоны, в результате чего атмосфера постоянно очищалась за счет выпадающих осадков и сильных ветров. Во-вторых, экспедиция проходила в условиях пандемии коронавируса, и из-за введенных ограничений снизилась туристическая нагрузка на прибрежную территорию озера.

В ходе измерений было обнаружено, что на участке маршрута от Нижнеангарска до бухты Ая (северная часть Байкала) наблюдались самые низкие концентрации газовых примесей, аэрозоля за весь период измерений на акватории озера: O_3 ($2,8 \text{ мкг/м}^3$), NO_2 , NO ($1,0 \text{ мкг/м}^3$), SO_2 ($2,9 \text{ мкг/м}^3$), $\text{PM}_{2,5}$ ($0,6 \text{ мкг/м}^3$), PM_{10} ($1,1 \text{ мкг/м}^3$). Все эти параметры определены как фоновые значения для приводной атмосферы озера. Суммарные концентрации ПАУ в приводной атмосфере в 2021 г. были также низкими, в среднем – $0,96 \text{ нг/м}^3$, что значительно ниже концентраций ПАУ, зафиксированных при пожарах в 2016 г., когда средние значения составляли $5,9 \text{ нг/м}^3$.

Анализ лидарных данных, а также траекторный анализ на основе модели HYSPLIT показал, что основной вклад в загрязнение атмосферы вносят близлежащие локальные источники, расположенные вблизи береговой зоны озера.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-77-20058). Измерения характеристик атмосферы проводились измерительными средствами ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН им. В.Е. Зуева.

Список литературы

1. 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 атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 60–65; 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 // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 360–365.
2. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Жбанов Э.Ф., Микушев М.К., Панченко М.В., Поданев А.В., Толмачев Г.Н., Щербатова А.В. Феномен

- круговой циркуляции воздуха в котловине озера Байкал // Докл. РАН. 1992. Т. 325, № 6. С. 1146–1150.
3. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Панченко М.В., Покровский Е.П., Поданев А.В. Комплексная оценка состояния воздушного бассейна над Прибайкальем и озером Байкал // Метеорол. и гидрол. 1996. Т. 10. С. 39–49.
 4. Gorshkov A.G., Marinaite I.I., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S. Benzopyrene isomer ratio in organic reaction of aerosols over water surface of Lake Baikal // J. Aerosol Sci. 2004. V. 2. P. 1059–1060.
 5. Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Деметьева А.Л., Цыдыпов В.В., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Клемашева М.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 4. С. 289–295; Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dement'eva A.L., Tsydyrov V.V., Balin Yu.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Nasonov S.V., Klemasheva M.G., Golobokova L.P., Potemkin V.L. Ship-Based studies of aerosol-gas admixtures over Lake Baikal Basin in Summer 2018 // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 4. P. 434–441.
 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, N 1. P. 139. DOI: 10.3390/atmos13010139.
 7. Nasonov S., Balin Yu., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I., Samoiloa S., Khodzher T. Mobile aerosol Raman polarizing lidar LOSA-A2 for atmospheric sounding // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1032. P. 1–12. DOI: 10.3390/atmos11101032.
 8. Gorshkov A., Pavlova O., Khlystov O., Zemskaya T. Fractioning of petroleum hydrocarbons from seeped oil as a factor of purity preservation of water in Lake Baikal (Russia) // J. Great Lakes Res. 2020. V. 46, N 1. P. 115–122. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.10.010.
 9. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Терпугова С.А., Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В., Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б. Структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным аэрозольного и доплеровского лидаров в период прохождения атмосферных фронтов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 679–688; Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Penner I.E., Samoiloa S.V., Terpugova S.A., Banakh V.A., Smalikhov I.N., Falits A.V., Rasskazchikova T.M., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B. Structure of aerosol fields of the atmospheric boundary layer according to aerosol and Doppler lidar data during passage of atmospheric fronts // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 1. P. 18–32.
 10. Burton S.P., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Hair J.W., Rogers R.R., Obland M.D., Butler C.F., Cook A.L., Harper D.B., Froyd K.D. Aerosol classification using airborne High Spectral Resolution Lidar measurements – methodology and examples // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 73–98. DOI: 10.5194/amt-5-73-2012.
 11. Tobiszewski M., Namiesnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // Environ. Pollut. 2012. V. 162. P. 110–119. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.10.025.

G.S. Zhamsueva, T.V. Khodzher, Yu.S. Balin, A.S. Zayakhanov, V.V. Tsydyrov, I.E. Penner, S.V. Nasonov, I.I. Marinayte. **Experimental studies of aerosol and gas admixtures in the near layer of the atmosphere of Lake Baikal (ship expedition, September, 2021).**

The paper presents the results of complex experimental studies of gas impurities and the vertical structure of aerosol in the atmosphere over Lake Baikal in September 2021, using the research vessel (RV) “Academician V.A. Koptuyug”. Measurements of gaseous impurities in the near-air layer were carried out using local control means – chemiluminescent gas analyzers. The sounding of aerosol fields was carried out using a multi-frequency polarization aerosol-Raman lidar “LOSA-A2”. Compared to previous expeditions, in 2021, low concentrations of gaseous impurities and aerosols, close to the background ones, were recorded. The analysis showed that the main contribution to atmospheric pollution was made by nearby local sources located near the coastal zone of the lake.

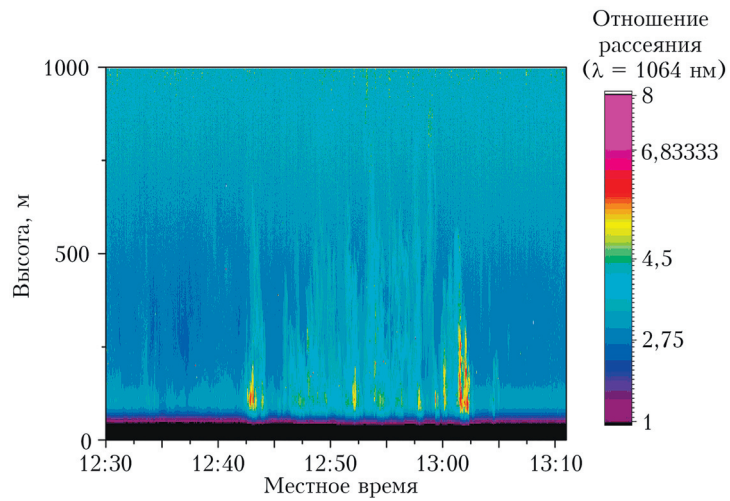


Рис. 5. Пространственно-временная структура аэрозольного поля тропосферы ($\lambda = 1064$ нм), полученная 3 сентября 2021 г.

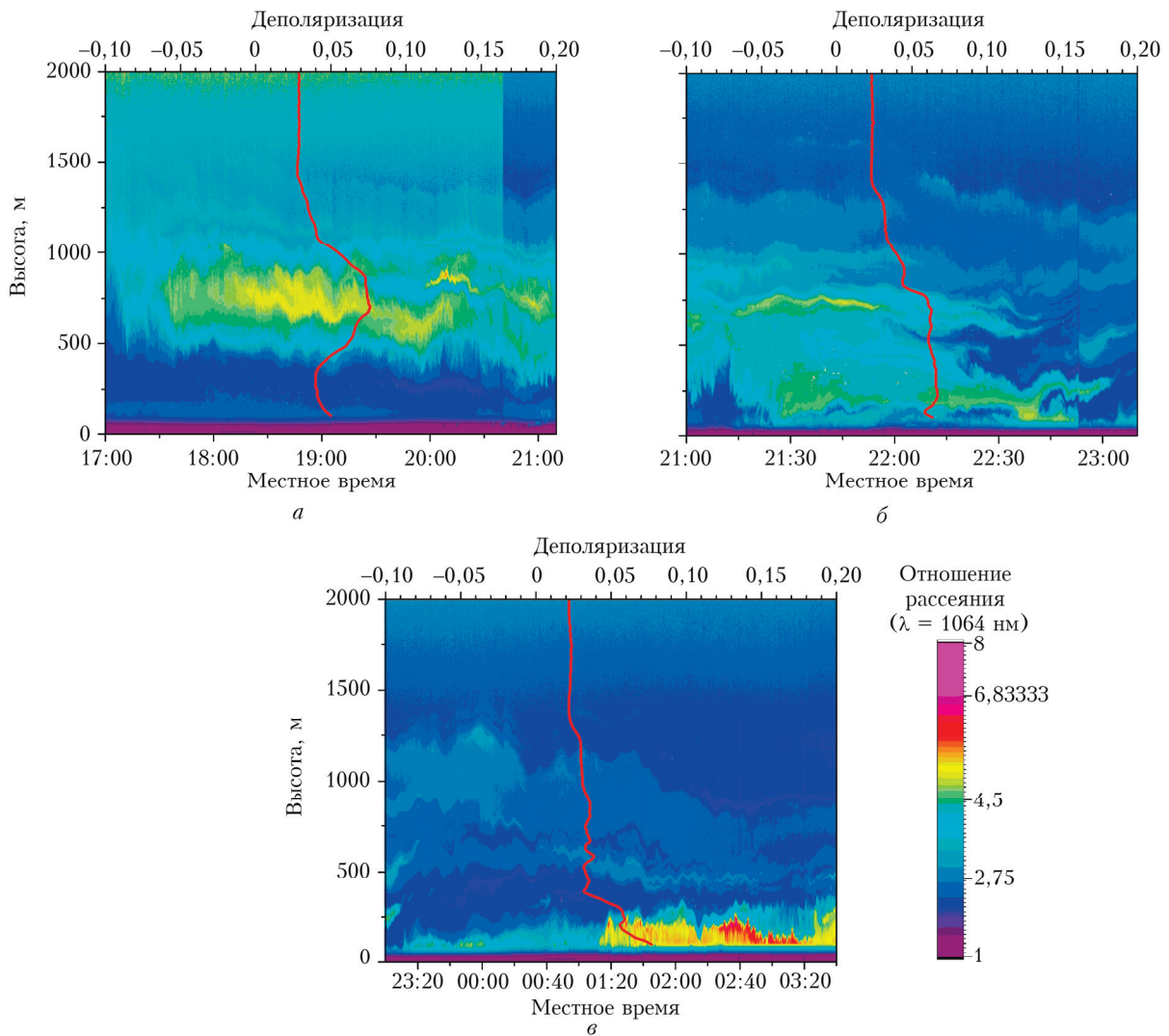


Рис. 6. Пространственно-временная структура аэрозольного поля тропосферы ($\lambda = 1064$ нм), полученная: 8 сентября 2021 г. с 17:00 до 21:00 (а) и с 21:10 до 23:10 (б); 8, 9 сентября 2021 г. с 23:10 до 3:40 (в)