

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г.

Т.В. Ходжер¹, Г.С. Жамсуева², А.С. Заяханов², А.Л. Дементьева²,
В.В. Цыдыпов², Ю.С. Балин³, И.Э. Пеннер³, Г.П. Коханенко³,
С.В. Насонов³, М.Г. Клемашева³, Л.П. Голобокова¹, В.Л. Потемкин^{1*}

¹Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

²Институт физического материаловедения СО РАН

670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 24.01.2019 г.

Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований газовых примесей и вертикальной структуры аэрозоля в атмосфере над оз. Байкал в июле 2018 г. на борту научно-исследовательского судна «Академик В.А. Коптюг». Одновременно наблюдения велись на стационаре «Боярский», расположенном в юго-восточной части оз. Байкал. Приведено краткое описание используемой в экспериментах аппаратуры, а также обсуждаются некоторые предварительные результаты анализа полученных данных.

Ключевые слова: оз. Байкал, тропосферный озон, окислы азота, аэрозоль, лидар, лесные пожары, НИС «Академик В.А. Коптюг»; Lake Baikal, tropospheric ozone, nitrogen oxides, aerosol, lidar, forest fires, research vessel "Academik V.A. Koptuyg".

Введение

В последние годы антропогенное воздействие на экосистему оз. Байкал постоянно возрастает, что обусловлено не только развитием промышленности в регионе, но и расширением инфраструктуры туристско-рекреационных территорий прибрежной зоны озера [1–6]. Одним из значимых источников загрязнения атмосферы Байкальского региона являются эмиссии дымового аэрозоля и следовых газов от лесных пожаров, число которых в связи с изменением климата в регионе возрастает [7–9]. После попадания в верхние слои тропосферы дым от лесного пожара может распространяться из Сибири на большие расстояния, в Арктический бассейн и другие районы Азии [10, 11] или Европы [12, 13]. Перенос и накопление аэрозольно-газовых примесей в акватории Байкала наблюдаются каждое лето

из-за лесных пожаров, происходящих в бореальных лесах Сибири. Это приводит к повышению концентраций газовых и аэрозольных примесей как в непосредственной близости от озера за счет большого количества локальных очагов лесных пожаров на прибрежной территории, так и на значительном удалении от озера [8, 9, 14, 16].

Первые комплексные корабельные исследования атмосферы над оз. Байкал с использованием средств дистанционного зондирования — одночастотного аэрозольного лидара «ЛЮЗА-М» и систем локального контроля — газоаналитических приборов были проведены в экспедиции 2002 г. [15, 16]. Наблюдения велись в основном в районах Среднего и Южного Байкала. Анализ накопленных экспериментальных данных позволил установить влияние орографических особенностей местности на формирование продольных и поперечных разрезов высотной структуры аэрозольных полей. Результаты исследований газового и химического состава аэрозолей показали, что загрязнению через атмосферу наиболее подвержена южная котловина Байкала.

В продолжение работ по анализу и оценке загрязнения атмосферы над Байкалом в пожароопасный летний период, для создания физических моделей формирования и переноса малых газовых примесей и аэрозольных полей атмосферы с учетом физико-географических особенностей Байкальского региона с 15 по 26.08.2018 г. были проведены комплексные экспериментальные исследования газовых примесей

* Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (lmza@mail.ru); Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Аюна Лубсановна Дементьева (avunadem@umail.com); Вадим Владимирович Цыдыпов (lmza@mail.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@gmail.com); Марина Георгиевна Клемашева (marina@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Владимир Львович Потемкин (klimat@lin.irk.ru).

приводного слоя и вертикальной структуры аэрозоля над озером с использованием научно-исследовательского судна (НИС) «Академик В.А. Коптюг». Маршрут НИС проходил по Южному, Среднему и Северному Байкалу.

В данной статье представлены некоторые предварительные результаты этих исследований, включая краткое описание используемой аппаратуры.

Аппаратура корабельного комплекса

Комплекс газово-аэрозольного оборудования для мониторинга приводной атмосферы Байкала был развернут на верхней палубе корабля — в капитанской рубке (рис. 1), а лидар на нижней палубе в кормовой части судна обеспечивал возможность зондирования в вертикальном и наклонном направлениях.

Отбор проб воздуха для газово-аэрозольного оборудования осуществлялся с использованием тефлоновых трубок на высоте 6 м от водной поверхности. Для измерения концентрации озона, окислов азота, диоксида серы использовались хемиллюминесцентные газоанализаторы 3.02 П-А, Р-310А, С-310А (ЗАО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург). Диапазон измерений газоанализаторов Р-310А, С-310А, выполняемых с погрешностью $\pm 25\%$, составляет от 0 до 1000 мкг/м³, газоанализаторов 3.02 П-А — от 0 до 500 мкг/м³, погрешность измерений $\pm 20\%$. Калибровка и установка нуля осуществляется автоматически при помощи встроенных источников микропотоков по командам процессора газоанализаторов. Точность измерений газоанализаторов контролируется калибратором Mod. 8500 Monitor Labs (Monitor Labs, Inc., USA). Для исследования общей счетной концентрации N (см⁻³) и распределения по размерам частиц микродисперсной фракции аэрозоля на судне применялся счетчик частиц Handheld 3016 IAQ (Lighthouse, USA), основанный на фотоэлектрическом методе регистрации аэрозольных частиц, использующем зависимость интенсивности света, рассеянного частицей, от ее размера. Счетчик имеет шесть каналов измерений в зависимости от размера регистрируемых частиц (0,3; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0;

10,0 мкм) и показывает количество частиц и счетную концентрацию по всем каналам одновременно в интегральной и дифференциальной форме. Значения счетной концентрации могут пересчитываться в массовую концентрацию с учетом плотности частиц анализируемого аэрозоля.

В предыдущих корабельных исследованиях вертикальной структуры аэрозольных полей использовался одночастотный лидар «ЛОЗА-М» на длине волны 532 нм [17]. Современные тенденции исследований аэрозольных полей методами лазерного зондирования требуют расширения функциональных возможностей лидара путем увеличения количества зондирующих длин волн излучения, дополнительного включения каналов регистрации сигналов комбинационного рассеяния света, а также поляризационных ортогональных компонент сигналов упругого обратного рассеяния. Это позволит расширить набор восстанавливаемых оптических характеристик, таких как показатель Ангрстрема и отношение цветности, а анализ поляризационных характеристик — улучшить селекцию аэрозольных образований.

В экспедиции «Байкал-18» была апробирована новая модификация мобильных лидаров серии «ЛОЗА» — лидар «ЛОЗА-А2» с улучшенными техническими характеристиками.

В качестве излучателя лидара использован лазер LS-2131M (LOTIS ТП, Беларусь), работающий на длинах волн 532 и 1064 нм с частотой 20 Гц. Излучение расширяется ахроматическим трехлинзовым коллиматором, позволяющим уменьшить угол расходимости пучка до 0,5 мрад. Между лазером и коллиматором располагается фазовая поляризационная пластинка, меняющая плоскость линейной поляризации либо создающая круговую поляризацию.

Приемный блок лидара выполнен в виде двух идентичных асферических линзовых объективов диаметром 110 мм, расположенных симметрично относительно оптической оси передатчика. Один из этих объективов предназначен для регистрации лидарных сигналов в видимом диапазоне (сигналы упругого и комбинационного рассеяния — 532 и 607 нм, ортогональные поляризационные компоненты на длине



Рис. 1. НИС «Академик В.А. Коптюг» и расположение измерительного оборудования

волны 532 нм). В этом приемном канале используются фотоумножители H11526-20-NF (Hamamatsu Photonics, Japan), работающие в аналоговом режиме с управляемым затвором. Сигнал комбинационного рассеяния на молекулах атмосферного азота регистрируется фотоприемным модулем H11706P-40-MOD (Hamamatsu Photonics, Japan), работающим в режиме счета фотонов с управляемым затвором.

Второй приемный объектив предназначен для регистрации обратнорассеянного излучения на длине волны 1064 нм. При регистрации излучения на этой длине волны используется разработанный оригинальный фотоприемный модуль на основе лавинного фотодиода C30956E-EC (Perkin Elmer, USA).

Основное внимание при проведении исследований было обращено на изучение временного изменения вертикальной структуры аэрозольных полей и выявление физических механизмов их формирования.

Для анализа общей синоптической обстановки использовались данные, полученные со спутников MODIS и CALIPSO по переносу воздушных масс, в дополнение к результатам расчетов с применением модели траектории HYSPLIT [18].

Результаты и обсуждение

Газовые примеси в приподнятой атмосфере Байкала

По данным спутниковых наблюдений [19] в июле 2018 г. атмосфера над акваторией Байкала находилась под влиянием дымовой эмиссии от лесных пожаров в северных районах Иркутской обл., Красноярском крае и Якутии. Траектории поступления воздушных масс из очагов лесных пожаров подтверждались расчетами с использованием траекторной модели HYSPLIT [18] как в прямом, так и в обратном направлении (рис. 2).

По данным информационной системы дистанционного мониторинга Рослесхоз ФБУ «Авиалесоохрана» [20] в Красноярском крае в 00:00 23 июля было зарегистрировано 214 очагов лесных пожаров общей площадью более 760 тыс. га, на территории Республики Саха (Якутия) – 89 очагов общей площадью более 1,3 млн га. На большей части территории Иркутской обл. и Бурятии сохранялась стабильная обстановка без лесных пожаров.

Карта маршрута экспедиции 2018 г. на НИС «Академик В.А. Коптюг» приведена на рис. 3. Координаты точек измерения определялись корабельной системой Global Positioning System (GPS). Обобщенная картина распределения средних десятиминутных значений концентрации окислов азота (NO₂), диоксида серы (SO₂) и озона (O₃) вдоль маршрута движения судна по акватории оз. Байкал представлена на рис. 4. Пространственно-временная изменчивость концентрации O₃, NO₂, SO₂ крайне неоднородна по акватории озера. Выделяются как протяженные области с повышенным содержанием NO₂, SO₂, O₃, так и отдельные локальные всплески (рис. 5).

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 17:00 UTC 21 Jul 18
GDAS Meteorological Data

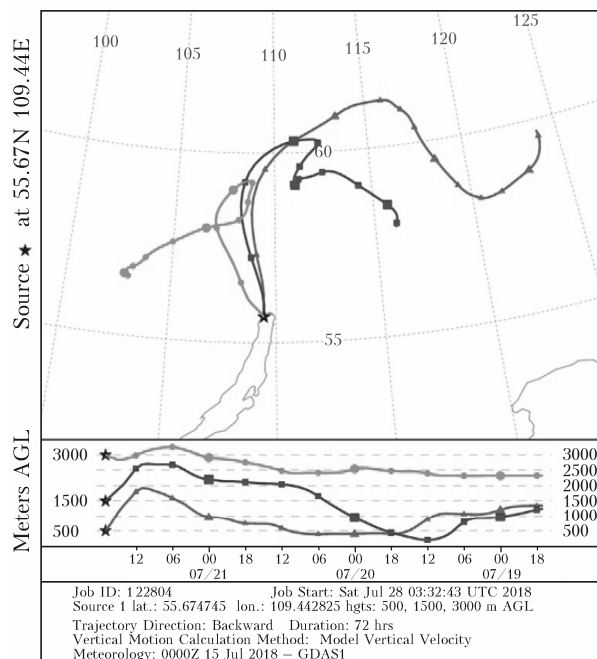


Рис. 2. Обратные траектории переноса воздушных масс от лесных пожаров в Якутии в точку наблюдения ★ на 21.07.2018 г. [18]

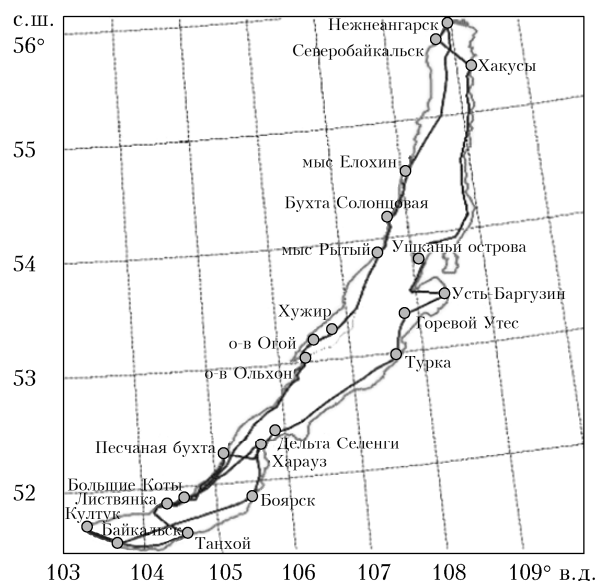


Рис. 3. Весь маршрут следования НИС «Академик В.А. Коптюг»

Существенное влияние на адвективные и конвективные процессы переноса и трансформации загрязняющих веществ на Байкале оказывают погодные условия. В начале маршрутных измерений (15–17.07.2018 г.) район Южного Байкала оказался под действием мощного циклона, сформировавшегося над Таймыром, южная периферия которого располагалась в районе оз. Хубсугул [21]. В этот период

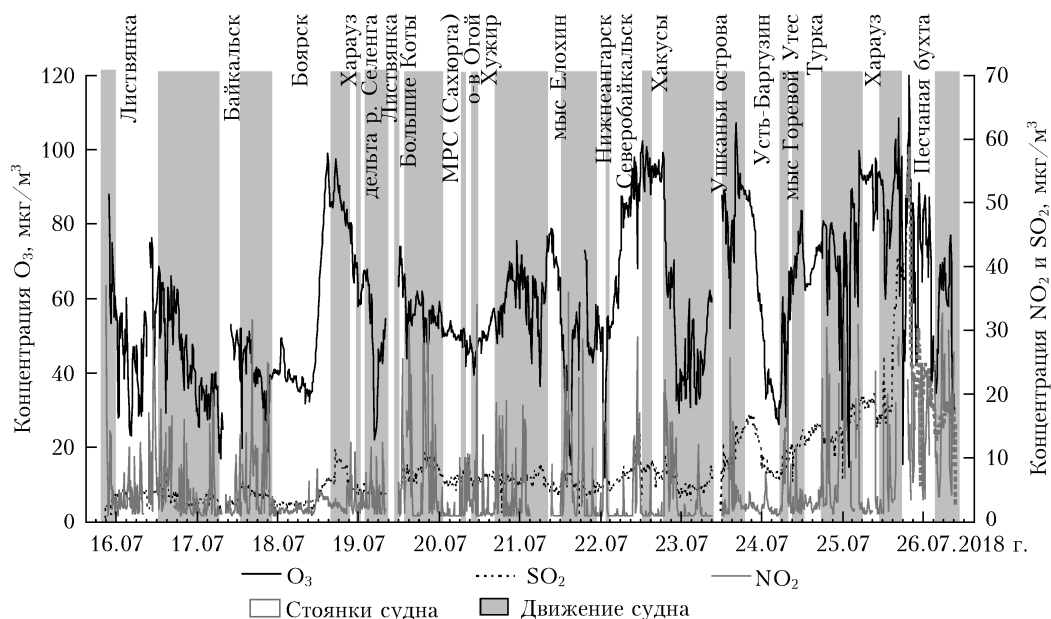


Рис. 4. Временной ход концентраций приземного озона, диоксида азота и диоксида серы в приземном слое оз. Байкал по всему маршруту следования НИС «Академик В.А. Коптюг»

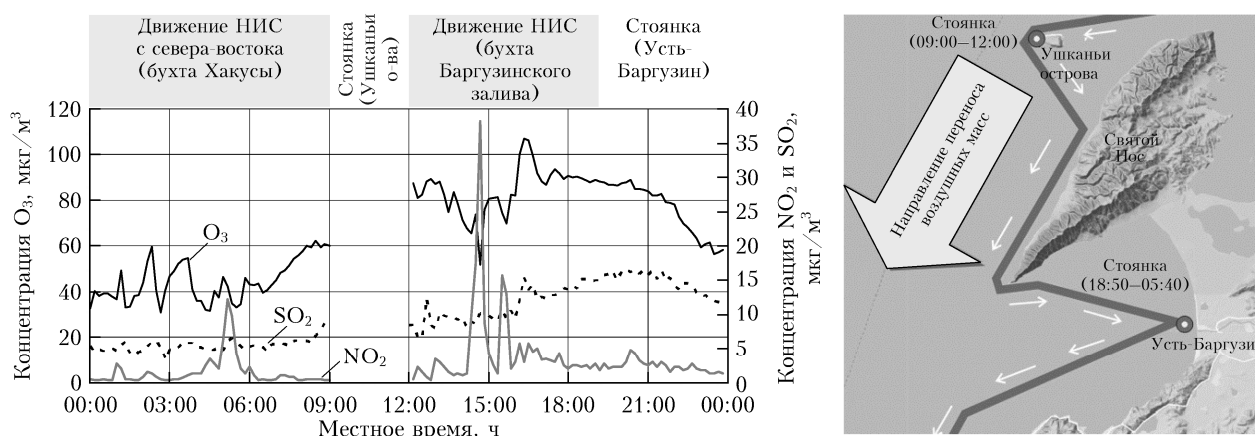


Рис. 5. Временной ход концентраций приземного озона, диоксида азота и диоксида серы и маршрут следования НИС «Академик В.А. Коптюг» в Баргузинском заливе 23.07.2018 г.

наблюдались осадки, пришедшие с южными и юго-западными воздушными потоками. Концентрации газовых примесей (O_3 , SO_2 , NO_2) невысокие даже вблизи крупных промышленных центров, таких как Култук, Слюдянка, Байкальск: максимальные концентрации SO_2 не превышали 7 мкг/м^3 , NO_2 — $16...20 \text{ мкг/м}^3$, O_3 — 46 мкг/м^3 .

При смещении южной периферии циклона с 18 июля на запад осадки прекратились, направление потоков сменилось на западное и юго-западное. В условиях солнечной погоды концентрации O_3 повысились до 100 мкг/м^3 , SO_2 — до 12 мкг/м^3 . В последующие дни 19–21.07.2018 г. за счет обратного смещения юго-восточной ветви циклона в регионе оз. Байкал установилась облачная погода с осадками. В условиях облачной ветреной погоды с низкими дневными температурами среднесуточная концентрация O_3 составила 52 мкг/м^3 , максималь-

ная не превышала 75 мкг/м^3 . Повышенные концентрации NO_2 и SO_2 наблюдались на маршруте Большие Коты — о-в Ольхон при прохождении створа Бугульдейка — дельта р. Селенги, где концентрация NO_2 выросла до 30 мкг/м^3 , SO_2 — до 12 мкг/м^3 .

В Малом море и по маршруту Хужир—Нижнеангарск погодные условия характеризовались сплошной облачностью практически все время, непродолжительными осадками и высокой влажностью (туман). В этих условиях концентрации диоксида азота и диоксида серы менялись незначительно: максимальные концентрации SO_2 не превышали 9 мкг/м^3 , NO_2 — 2 мкг/м^3 . В период солнечной погоды со штилевыми условиями с 22 июля на Северном Байкале отмечен рост концентраций SO_2 и O_3 вблизи г. Северобайкальска, которые сохранялись высокими и на переходе с западного на восточный берег по маршруту Северобайкальск—Хакусы. Над аквато-

рией озера визуально наблюдалось присутствие дымового аэрозоля. Влияние дыма, поступившего в этот период от очагов лесных пожаров из Красноярского края и Якутии, особенно заметно проявилось при выходе из бухты Хакусы в ходе движения вдоль восточного побережья озера на юг. При движении судна в «фоновом» районе в течение продолжительного времени (5–6 ч) наблюдались рост концентраций SO_2 и NO_2 и резкое снижение концентрации O_3 . Высокие содержания этих газов в чистом «фоновом» районе, несомненно, связаны с лесными пожарами. Известно, что с пирогенными процессами в атмосферу, наряду с компонентами углеводородного происхождения, поступают соединения серы и азота [22, 23].

На маршруте НИС в районе Среднего Байкала, помимо дымового аэрозоля, на атмосферу заметное влияние начинают оказывать и антропогенные источники выбросов, расположенные в этом районе. Здесь следует также отметить орографические особенности береговой зоны оз. Байкал: заливы, бухты, русла крупных рек, горные массивы, которые способствуют накоплению загрязняющих примесей и переносу их с побережья на озеро. Концентрации O_3 , NO_2 , SO_2 в приземной атмосфере вдоль маршрута Ушканьи о-ва – Святой Нос возросли с 65 до 89, с 2 до 4 и с 6 до 12 мкг/м^3 соответственно (см. рис. 5). При заходе судна в один из самых крупных заливов на Байкале – Баргузинский, произошло резкое изменение метеорологических условий за счет экранирующего влияния горного массива Святой Нос: наблюдались полный штиль и увеличение температуры воздуха с 15 до 20 °С. В этих условиях определен значительный рост концентрации O_3 : с 70 до 108 мкг/м^3 , SO_2 – с 10 до 16 мкг/м^3 , NO_2 – до 10 мкг/м^3 . По маршруту Баргузинский залив – стоянка у пос. Усть-Баргузин и во время стоянки судна концентрации этих газовых примесей сохранялись стабильно высокими. Далее по маршруту Турка–Харауз (вдоль восточного побережья) концентрации SO_2 периодически повышались до 20 мкг/м^3 , NO_2 – до 30 мкг/м^3 , в ночные и утренние часы наблюдались нехарактерные для этого времени суток высокие концентрации O_3 – до 100 мкг/м^3 .

Обращают на себя внимание высокие концентрации газовых примесей по маршруту Харауз – бухта Песчаная. Резкое увеличение концентрации SO_2 до 40 мкг/м^3 и NO_2 до 30 мкг/м^3 отмечено уже при подходе к бухте, а максимальные значения SO_2 (60 мкг/м^3) наблюдались во время стоянки в бухте. Бухта Песчаная – туристическое место на Байкале, где расположены несколько туристических баз, использующих дизельные электростанции, и где ежегодно растет поток туристов, количество судов, что в целом приводит к росту антропогенной нагрузки на эту прибрежную территорию. Также в связи с закрытостью бухты от байкальских ветров высокими горными склонами Приморского хребта в ней складываются неблагоприятные метеорологические условия (штилевые условия, застой воздуха), не способствующие очищению атмосферы от загрязнений.

Пространственно-временное вертикальное распределение атмосферного аэрозоля над акваторией Байкала по лидарным данным

Во время прохождения судна по Среднему Байкалу 19.07.2018 г. после очищения атмосферы прошедшими накануне дождями лидаром регистрировались фоновые значения концентрации аэрозоля. Результаты показаны на рис. 6, а (цв. вкладка) в виде отношения рассеяния – наиболее часто используемого в практике лазерного зондирования [24] атмосферного параметра.

Первые следы дымового шлейфа от очагов лесных пожаров из Красноярского края и Якутии (см. рис. 2) по данным лазерного зондирования зафиксированы во время стоянки судна возле г. Северобайкальска после полуночи. Проявлялись они в виде отдельных аэрозольных образований толщиной 200–300 м на высоте порядка 2500 м (рис. 6, б). В дальнейшем наблюдалось вертикальное расширение дымового шлейфа в диапазоне высот 2000–3000 м и вплоть до 3500–4000 м в утренние часы (04:00–05:00), причем содержание аэрозоля в атмосфере превышало фоновые значения в десятки раз. Необходимо отметить, что в этот же временной период с запозданием около 1,5 ч (в 02:30) обнаружено присутствие более низкого второго дымового шлейфа на высоте 1500 м. Это, вероятно, объясняется орографическими особенностями окружающей горной местности. Эти два шлейфа, расширяясь в объемах, соединились в единое целое на высоте около 2000 м в 04:20. После этого лидаром в течение часа зафиксировано резкое заполнение дымовым аэрозолем нижних слоев атмосферы вплоть до приземного слоя. Примечательно, что оба дымовых шлейфа, соединившись в общую массу, тем не менее имеют выраженную границу между собой в районе 2000 м, что свидетельствует о различной концентрации аэрозоля на границах этих шлейфов.

В 11:55 по местному времени судно отошло от г. Северобайкальска в сторону восточного берега озера и двигалось вдоль него на юг. Вдоль маршрута следования регистрировался дымовой аэрозоль в атмосфере, но уже в меньшей концентрации.

Повышенное содержание аэрозоля в этот же период (22.07.2018 г.) было зафиксировано на стационаре «Боярский» (Южный Байкал), где параллельно с корабельными наблюдениями проводились измерения с использованием лидара «ЛОЗА-М2» [25]. В этот день на стационаре по погодным условиям эксперимент начался в 8:15. На высотах 250 и 1500 м наблюдались слои с повышенным содержанием аэрозоля (см. рис. 6, в). После полудня верхний слой начал опускаться, а нижний ослабевал по концентрации аэрозоля, и к 15:00 оба слоя исчезли, а на высоте 5000 м в атмосфере появилась облачность. По данным акустического метеорологического комплекса, расположенного на территории стационара, эксперимент 22.07.2018 г. проходил в условиях понижения атмосферного давления (с 740

до 713 мм рт. ст.) и относительной влажности воздуха (с 60 до 30%) при преимущественно северо-западном направлении ветра.

Лидарные исследования процессов формирования структуры аэрозольных полей в горных условиях в акватории оз. Байкал были проведены ранее [16]. Их особенности в зависимости от рельефа местности были выявлены нами при анализе корабельных продольных и поперечных аэрозольных лидарных разрезов. На основе корреляционного анализа высотного распределения оптической толщи и высотного распределения горного рельефа вдоль маршрута следования судна обнаружено, что наибольшая корреляция наблюдается в нижнем слое атмосферы 500–1500 м [17].

Подобные картины лидарных разрезов в очередной раз свидетельствуют о сложных процессах формирования структуры аэрозольных полей в акватории озера.

Исследования счетной концентрации N микродисперсной фракции аэрозоля с помощью прибора Handheld 3016 IAQ показали, что повышенная массовая концентрация частиц регистрировалась во время стоянки корабля в порту Листвянка, по всей акватории Южного Байкала, в дельте р. Селенги. Второй всплеск массовой концентрации частиц наблюдался в районе Среднего Байкала (Баргузинский залив, бухта Песчаная), где в атмосферном воздухе присутствовала дымка от лесных пожаров и происходил вынос аэрозоля с береговой зоны. Рост массовой концентрации частиц аэрозоля имел хорошее соответствие со счетной концентрацией частиц крупнодисперсной фракции.

Заключение

По результатам корабельных измерений в июле 2018 г. проведен анализ пространственно-временного распределения концентрации приземного озона, диоксида азота, диоксида серы над акваторией оз. Байкал. Существенное влияние на распределение аэрозольных и газовых примесей по акватории озера оказывали синоптические условия и орграфические особенности береговой зоны оз. Байкал: заливы, бухты, русла крупных рек. Наиболее высокие концентрации газовых примесей выявлены в приводной атмосфере дельты р. Селенги, Баргузинском заливе, бухте Песчаная. Такая же тенденция отмечена при исследовании общей счетной концентрации и распределения по размерам частиц микродисперсной фракции аэрозоля.

Выявлена временная динамика формирования сложной высотной структуры аэрозольных примесей от лесных пожаров в акватории озера, обусловленная особенностями прохождения воздушных потоков над гористой местностью. Первые проявления дымовых шлейфов наблюдаются в зоне свободной атмосферы на высотах 2500–3000 м, затем формируется более сложная структура аэрозольного поля в нижних слоях, обусловленная особенностями рельефа. Динамика заполнения аэрозолями пограничного и приземного слоев по лидарным данным коррелирует

с динамикой роста концентрации диоксида серы и диоксида азота в приводном слое атмосферы.

Работа выполнена в рамках тем госзаданий № 0345-2019-0008, 0336-2019-0007; экспедиция организована и проведена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-29-05044-офи-м). Исследования в части обработки и анализа лидарных данных были выполнены в рамках проекта № 18-35-00274.

1. Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V., Pomazkina G.V., Rodionova E.V., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Kostornova T.Ya., Kravchenko O.S., Kupchinsky A.B. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.* 2014. V. 40, N 2. P. 441–448.
2. Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova E.A., Tomberg I.V., Vishnyakov V.S., Malnik V.V. The massive development of green filamentous algae genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chlorophyta) in the coastal area of southern Lake Baikal // *Hydrobiol. J.* 2015. V. 51(1). P. 13–23.
3. 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) // *J. Great Lakes Res.* 2018. V. 44, N 2. P. 230–244.
4. Чебунина Н.С., Онищук Н.А., Нецветова О.Г., Ходжер Т.В. Динамика содержания минеральных форм азота в водотоках и атмосферных осадках поселка Листвянка (Южный Байкал) // *Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле.* 2018. Т. 24. С. 124–139.
5. Panchenko M., Pestunov D., Sakirko M., Domysheva V. Air-Water Carbon Dioxide Exchange in the Littoral Zone of Lake Baikal (Ice-Free Period) // *Inter. J. Geosc.* 2013. V. 4, N 10. P. 1339–1345.
6. Сакирко М.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А. Суточные ритмы концентрации диоксида углерода в приводном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 2. С. 79–86.
7. Izmest'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E., Ferwerda C.J., Gray D.K., Woo K.H., Pislegina H.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Silow E.A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.* 2016. V. 42, N 1. P. 6–17.
8. Шевиденко А.З., Щепаненко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение.* 2013. № 5. С. 50–61.
9. Семенов М.Ю., Маринайте И.И., Голобокова Л.П., Хуриганова О.И. Источники полициклических ароматических углеводородов приводного слоя воздуха и поверхностного слоя воды озера Байкал // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* 2018. № 3. С. 56–64.
10. Murayama T., Muller D., Wada K., Shimizu A., Sekiguchi M., Tsukamoto T. Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003 // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 23. P. L231031-1–5.
11. Zhu Qingzhe, Yuzhi Liu, Rui Jia, Shan Hua, Tianbin Shao, Bing Wang. A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on

- the air pollution over Asia // *Atmos. Environ.* 2018. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.052.
12. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И., Джола А.В.* Дымная мгла на Европейской части России летом 2016 г.: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 8. С. 50–63.
 13. *Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // *Исслед. Земли из космоса.* 2016. № 6. С. 3–20.
 14. *Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Балжанов Т.С., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Насонов С.В.* Особенности переноса и трансформации аэрозольных и газовых примесей атмосферы в береговой зоне оз. Байкал // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 12. С. 968–973.
 15. *Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydyпов V.V.* A hardware-software system for monitoring the content of atmospheric impurities // *Meas. Tech.* 2006. V. 19, N 7. P. 635–640.
 16. *Балин Ю.С., Еришов А.Д., Пеннер И.Э., Макухин В.Л., Маринайте И.И., Потемкин В.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П.* Экспериментальные и модельные исследования пространственного распределения атмосферного аэрозоля над акваторией оз. Байкал // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 2. С. 114–121.
 17. *Балин Ю.С., Еришов А.Д., Пеннер И.Э.* Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 1. Продольные разрезы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16, № 5–6. С. 438–446.
 18. *Draxler R.R., Rolph G.D.*, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html> (last access: 6.11.2018).
 19. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (last access: 22.12.2018).
 20. URL: <https://aviales.ru/> (last access: 6.11.2018).
 21. URL: www.aari.ru (last access: 10.11.2018).
 22. *Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I.* 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 // *Int. J. Environ. Stud.* 2016. N 73(3). P. 452–461.
 23. *Levine J.S., Cofer W.R., Cahoon D.R., Winstead E.L., Stocks B.J., Krasovoc V.A., Mtetwa L.* Gaseous and particulate emission from burning in the boreal forest // *Disturbance in Boreal Forest Ecosystems: Human Impacts and Natural Processes.* Washington DC: USDA, 2000. P. 164–174.
 24. *Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П., Ельников А.В.* Результаты лидарных наблюдений аэрозоля от лесных пожаров Северной Америки в стратосфере над Томском в конце лета и осенью 2017 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 2. С. 162–167.
 25. *Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.* Аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-М2» // *Квант. электрон.* 2011. Т. 41, № 10. С. 945–949.

T.V. Khodzher, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, A.L. Dementeva, V.V. Tsydyпов, Yu.S. Balin, I.E. Penner, G.P. Kokhanenko, S.V. Nasonov, M.G. Klemasheva, L.P. Golobokova, V.L. Potemkin. **The results of shipborne studies of the aerosol-gas impurities of the atmosphere over Lake Baikal.**

The paper presents the results of complex experimental studies of gas impurities and the vertical structure of aerosol in the atmosphere above Lake Baikal in July 2018 from the research vessel “Academik V.A. Koptuyug”. Simultaneous observations were made at the “Boyarsky” station, located in the south-eastern part of Lake Baikal. A brief description of the equipment used in the experiments is given; some preliminary results of the analysis of the data obtained are discussed.

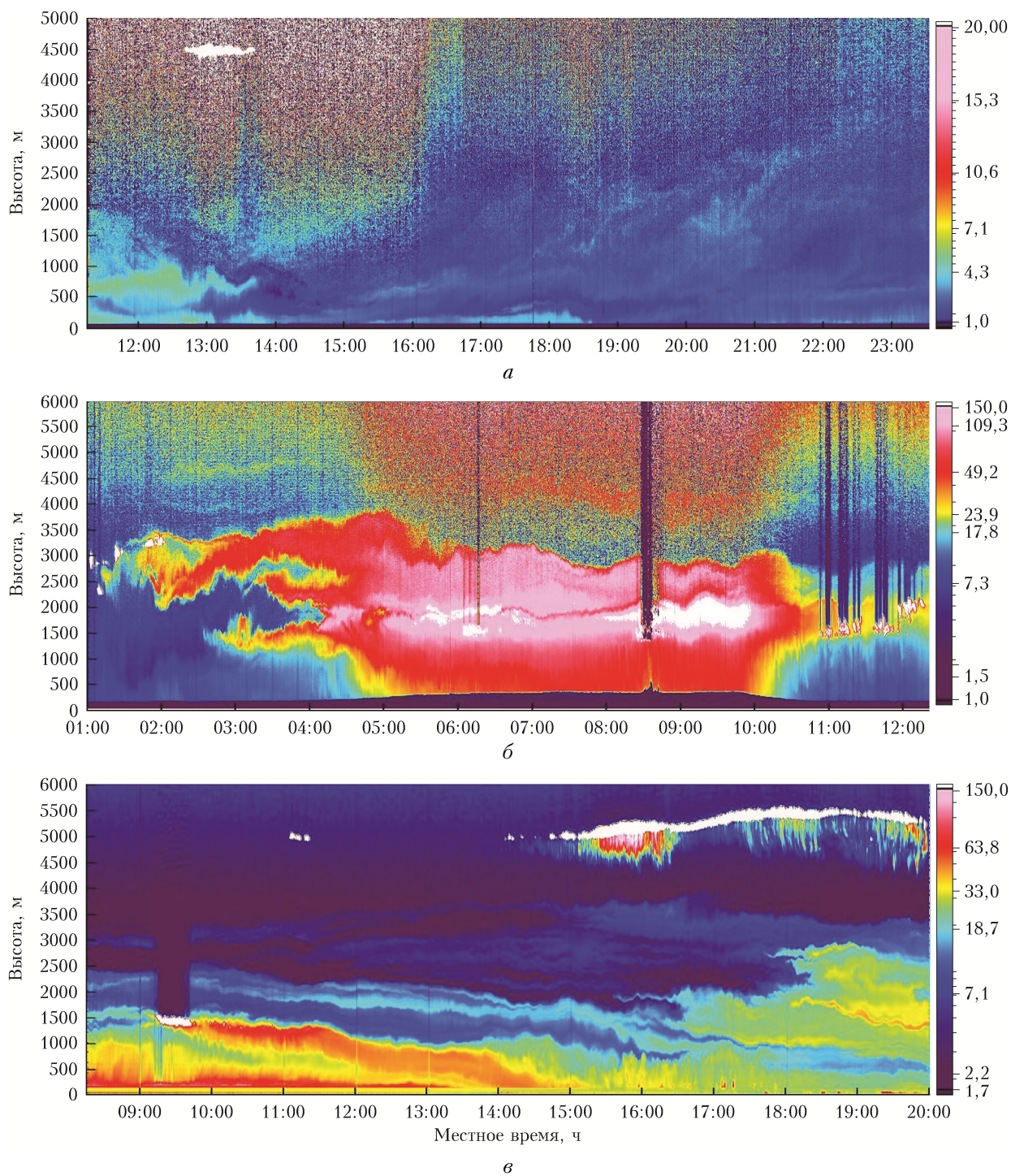


Рис. 6. Пространственно-временная структура аэрозольного поля, полученная 19.07.2018 г. (*a*), 22.07.2018 г. (*б*) лидаром на НИС «Академик В.А. Коптюг»; 22.07.2018 г. на стационаре «Боярский» (*в*). Цветовая шкала представлена в единицах отношения рассеяния