

УДК 551.510.42

## Особенности переноса и трансформации аэрозольных и газовых примесей атмосферы в береговой зоне оз. Байкал

А.С. Заяханов<sup>1</sup>, Г.С. Жамсуева<sup>1</sup>, В.В. Цыдыпов<sup>1</sup>, Т.С. Бальжанов<sup>1</sup>,  
Ю.С. Балин<sup>2</sup>, Г.П. Коханенко<sup>2</sup>, И.Э. Пеннер<sup>2</sup>, С.В. Насонов<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований суточной динамики атмосферных газов и метеорологических характеристик атмосферы на разных высотах на юго-восточном побережье оз. Байкал. Измерения проводились в июле–августе 2015–2016 гг. на стационаре «Боярский» (51,84° с.ш., 106,06° в.д.). Одновременно проводились лидарные измерения, направленные на изучение процессов формирования вертикальной структуры аэрозольных полей как в естественных (фоновых) условиях, так и при наличии источников дымов, вызванных лесными пожарами.

*Ключевые слова:* озеро Байкал, тропосферный озон, окислы азота, аэрозоль, лидар, метеорологические параметры; Lake Baikal, tropospheric ozone, nitrogen oxides, aerosol, lidar, meteorological parameters.

### Введение

Озеро Байкал – уникальное творение природы, которое в 1996 г. признано объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. По глубине и запасам пресной воды ему нет равных в мире. Такие особенности озера, как большая его протяженность с севера на юг, огромная масса воды и горное окружение (высота до 2500 м над ур. м.), обуславливают особый микроклимат и значительные различия в распределении метеорологических характеристик в его котловине, связанные с резкими температурными градиентами, приводящими к формированию температурных инверсий, восходящих и нисходящих потоков в приземном слое атмосферы, которые по-разному влияют на перенос и формирование высотных профилей концентрации газов и аэрозоля.

Исследование тропосферного озона в настоящее время представляет значительный интерес с точки зрения его влияния не только на климат, но и на биосферу в целом. В стратосфере озон играет положительную роль, защищая биосферу от жесткого ультрафиолетового излучения. В тропосфере озон

определяет ее окислительный потенциал в силу своей высокой реакционной способности.

Приземный озон – вторичный загрязнитель атмосферы, его появление в больших концентрациях свидетельствует о значительном загрязнении воздуха за счет эмиссий газов-предшественников озона. Повышенные концентрации озона могут быть связаны и с переносом воздушных масс из областей с более высоким его содержанием [1]. При этом роль и соотношение фотохимических и динамических процессов формирования поля приземного озона во многом остаются еще не до конца исследованными. В одних случаях доминирующими являются фотохимические процессы, в других – динамические, такие как фоновые явления [2], горно-долинная циркуляция [3, 4], бризовые явления [5–7].

Отдельно стоит отметить исследования аэрозольных полей атмосферы [8–11], пространственно-временная изменчивость которых существенно влияет на климатические и экологические изменения. Попадающий в атмосферу аэрозоль может иметь различное происхождение. Повышенное загрязнение аэрозольными примесями атмосферы может быть вызвано как чрезвычайными ситуациями природного характера, к которым относятся лесные пожары, извержения вулканов, песчаные бури, так и техногенного – промышленные выбросы, аварии на химических и радиационно-опасных объектах.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований суточной динамики приземного озона, окислов азота, диоксида серы,

\* Александр Савельевич Заяханов (lmza@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (lmza@mail.ru); Вадим Владимирович Цыдыпов (lmza@mail.ru); Тумэн Станиславович Бальжанов (lmza@mail.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@gmail.com).

метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы на разных высотных уровнях с использованием 30-метровой метеорологической мачты на юго-восточном побережье оз. Байкал в июле–августе 2015–2016 гг. (стационар «Боярский», 51,84° с.ш., 106,06° в.д.). Одновременно проводились лидарные измерения, направленные на изучение процессов формирования вертикальной структуры аэрозольных полей (особенно в области температурных инверсий) под воздействием атмосферных физических процессов, имеющих различные временные и пространственные масштабы от микрометеорологической до синоптической областей спектра, а также обусловленных топографией горной местности оз. Байкал.

### Аппаратура и методика измерений

Для детального изучения влияния динамических процессов, термической стратификации атмосферы на содержание газовых примесей в условиях бризовых ситуаций проведены специальные измерения с использованием 30-метровой метеорологической мачты. Отбор проб воздуха для определения содержания приземного озона, окислов азота, диоксида серы проводился на двух высотах — 2 и 20 м над уровнем земли. Для наблюдений использовались газоанализаторы озона 3-02 П-А, окислов азота Р-310, диоксида серы С-310 (ЗАО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург). Для контроля погрешности измерений осуществлялась калибровка газоанализаторов с помощью прибора Mod. 8500 Monitor Labs (Monitor Labs, Inc., USA). Одновременно на этих же высотах проводились измерения метеорологических параметров атмосферы с помощью акустических метеорологических комплексов АМК-03 ЭКСМЕТЕО (ООО «Сибаналитприбор», г. Томск). Метеокомплекс АМК-03 выдает информацию о мгновенных значениях скорости ветра (по трем взаимно перпендикулярным направлениям) и температуры воздуха с частотой измерений этих значений от 10 до 160 Гц с последующим автоматическим вычислением до 60 статистических и турбулентных параметров атмосферы, в том числе градиентов температуры (расчет на основе теории подобия Монина–Обухова; программа расчета ИМКЭС СО РАН). При вычислении средних десятиминутных значений градиентов температуры произведена выборка из соответствующего массива значений температуры, в которых удалены отдельные ее скачки, выходящие за пределы доверительного интервала значений (95%).

Высотные распределения аэрозольных полей исследовались с помощью мобильного аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-М2» [12]. Зондирование проводилось на двух длинах волн излучения лазера  $\lambda_1 = 1064$  и  $\lambda_2 = 532$  нм. Прием упругого обратно рассеянного излучения на этих длинах волн осуществлялся в аналоговом режиме, а для  $\lambda_2$  еще и в режиме счета фотонов. Кроме того, дополнительно регистрировался сигнал на смещенной длине волны  $\lambda_3 = 607$  нм спонтанного комбинационного рассеяния в режиме счета фотонов. Предваритель-

ная интерпретация данных проводится на основе анализа вертикальных разрезов аэрозольных полей, выраженных в единицах отношения рассеяния (например, для  $\lambda_1 = 1064$  нм). Основное внимание было уделено изучению временного изменения вертикальной структуры аэрозольных полей и выявлению физических механизмов их формирования.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены суточные вариации средних часовых значений концентрации озона и температуры воздуха на высотах 2 и 20 м за период летних экспериментов 2015–2016 гг. Наблюдаются существенные различия в суточных вариациях озона в приповерхностном (2 м) и приземном (20 м) слоях, где влияние подстилающей поверхности заметно снижается. Суточный ход  $O_3$  на высотах, удаленных от земной поверхности, более сглаженный, чем у поверхности земли, так же как и суточный ход температуры воздуха. Наибольшие различия температуры воздуха в пределах 5–6 °С на разных высотных уровнях наблюдаются в дневные часы. Различия в концентрациях озона начинают заметно проявляться в вечерние и ночные часы, при этом содержание  $O_3$  на нижнем уровне (2 м) чаще всего ниже, чем на верхнем (20 м). В дневное время с ростом температуры и усилением турбулентных процессов в приземном слое атмосферы концентрации озона на разных высотах выравниваются.

На рис. 2 более подробно представлены результаты синхронных измерений приземного озона в зависимости от направления ветровых потоков ( $D$ ), коэффициента турбулентного обмена ( $Kh$ ), градиента температуры ( $dT/dz$ ), вертикальной скорости ветра ( $W$ ) на разных высотах 6–10.08.2015 г. как наиболее типичных условий слабой синоптической активности, когда внешний синоптический поток был минимален.

В утренние часы с прогревом земной поверхности за счет формирования конвективных потоков происходит разрушение приземной инверсии, усиливаются турбулентные процессы (рис. 2, б), которые приводят к постепенному росту и выравниванию концентрации озона на разных высотах (рис. 2, а). В эти часы наблюдается смена направления ветра (см. рис. 2, б), береговой бриз сменяется дневным, с озера (09:00–10:00). В вечернее время с заходом солнца и понижением температуры почвы происходят формирование инверсий температуры в приземном слое атмосферы и снижение интенсивности турбулентных процессов. При отсутствии вертикального обмена, особенно в самом нижнем приповерхностном слое, содержание  $O_3$  резко падает за счет сухого осаждения на подстилающую поверхность. В приземном слое скорость распада озона ниже, чем в приповерхностном, за счет более низких температур и отсутствия стока озона на подстилающую поверхность в условиях формирования инверсии температуры в слое 2–20 м. Кроме того, за счет нисходящих потоков на высоте 20 м (рис. 2, в) поддерживается

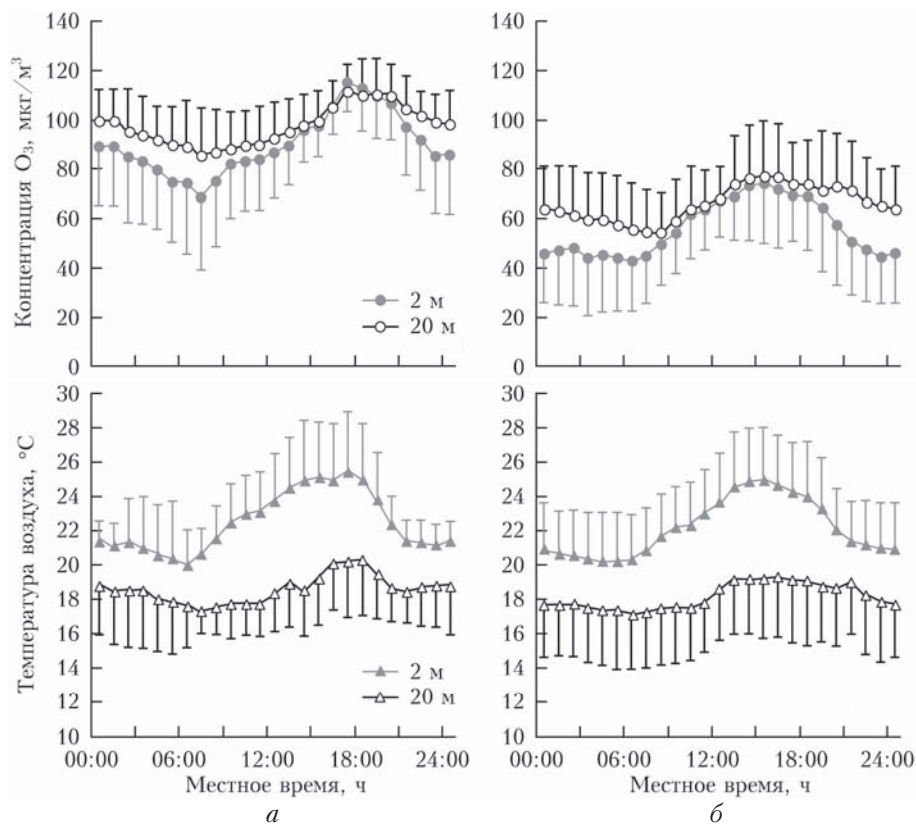


Рис. 1. Суточный ход среднечасовых значений концентрации приземного озона, температуры воздуха на стационаре «Боярский» на высотах 2 и 20 м и их среднеквадратичные отклонения: 1–17.08.2015 г. (а); 27.07–19.08.2016 г. (б)

более высокое содержание  $O_3$ , поступающего с верхних слоев атмосферы.

В период экспериментов в августе 2015 г. в регионе оз. Байкал наблюдалась высокая задымленность воздуха вследствие лесных и торфяных пожаров. Отмечены высокие концентрации окислов азота, диоксида серы до  $40 \text{ мкг/м}^3$  (см. рис. 2, а), не характерные для стационара «Боярский», удаленного на значительное расстояние от территорий крупных промышленных центров. Наблюдались и высокие концентрации приземного озона: максимальные достигали  $147 \text{ мкг/м}^3$  при среднесуточной концентрации  $72 \text{ мкг/м}^3$ .

Результаты лидарных исследований аэрозольных полей подтверждают наличие смоговой ситуации в регионе оз. Байкал. На рис. 3 (цв. вкладка) приведен двумерный разрез аэрозольного поля тропосферы в координатах высота–время в утренние и дневные часы 9.08.2015 г. на стационаре «Боярский» ( $\lambda_1 = 1064 \text{ нм}$ ). В цветовой шкале справа от панели приведены единицы отношения рассеяния, которые отражают содержание аэрозоля в атмосфере по отношению к составу молекулярного воздуха.

В ночь с 8 на 9.08 была отмечена чистая атмосфера со слабо заполненным пограничным слоем. Утром 9.08 с юго-запада к месту наблюдений начало заносить дымовой аэрозоль (левая часть рис. 3). Постепенно высокая концентрация аэрозоля достаточно однородно заполнила устойчивый пограничный слой атмосферы до его верхней границы на уровне

2 км. Поступления дымового аэрозоля в канал свободной атмосферы (высоты от 3 до 6 км), в котором осуществляется дальний трансграничный перенос, практически не происходит.

Высотное распределение аэрозоля, его пространственно-временные вариации позволяют выявить некоторые особенности структуры и динамики метеорологических процессов в приземном слое атмосферы в береговой зоне оз. Байкал, влияющих на высотный профиль приземной концентрации озона и других малых газовых примесей, а также их суточные вариации.

На рис. 4 (цв. вкладка) приведен суточный ход высотного распределения аэрозоля в условиях малоградиентного барического поля, при которых чаще всего формируются бризовые циркуляции. Высокое содержание аэрозоля наблюдается в нижнем внутреннем слое перемешивания до уровня 500 м длительное время. Над озером в этот период сохранялась высокая задымленность воздуха за счет лесных и торфяных пожаров в регионе оз. Байкал. Однако выше уровня 500 м до 4 км отмечена слабая заполненность аэрозолем, судя по небольшим значениям величин отношения рассеяния. В утренние часы с началом прогрева воздуха над сушей (с 09:00) развивается конвективно неустойчивый пограничный слой, распространяющийся в дневные часы до высот 1,5–2 км. Отчетливо проявляется циркуляционная ячейка в вертикальной плоскости в условиях формирования дневного бриза, доходящая до высоты

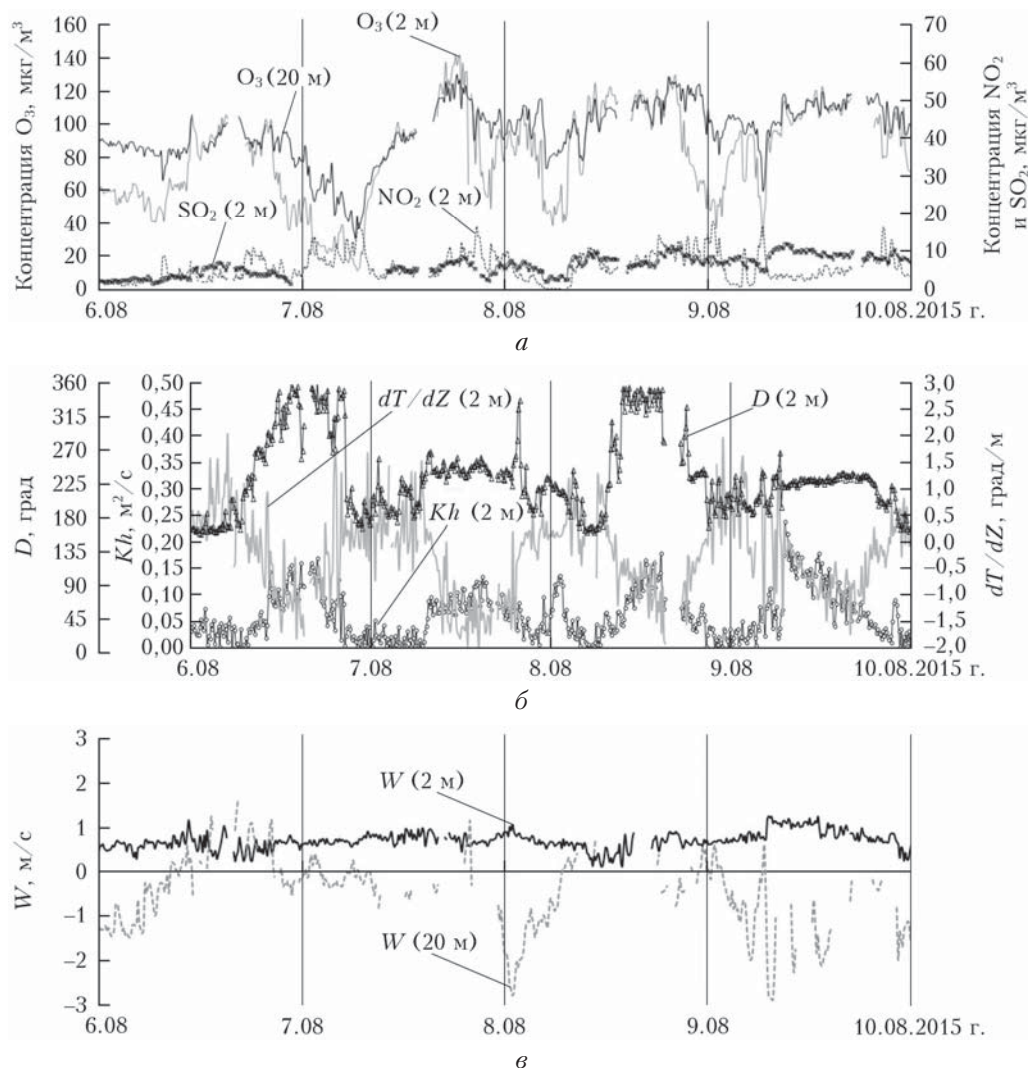


Рис. 2. Суточные вариации концентрации  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  на стационаре «Боярский» (а);  $D$ ,  $Kh$ ,  $dT/dZ$  (б);  $W$  (в) на разных высотах 6–10.08.2015 г.

около 2 км над поверхностью земли. Граница раздела прямой (с озера на берег) и обратной (на высоте около 2 км) циркуляций хорошо прослеживается как течение, вытесняющее аэрозоль в пределах пограничного слоя. Отличием ночного бриза является то, что он образуется одновременно на больших расстояниях от берега начиная с момента формирования устойчивого стратифицированного приземного пограничного слоя.

Влияние локальных переносов воздушных масс на содержание приземного озона заметно проявляется в периоды заноса загрязненных воздушных масс, как, например, 16.08.2016 г. В это время наблюдалась неустойчивая облачная погода без резких суточных колебаний температуры и скорости ветра. Процесс бризовой циркуляции в этих условиях происходит с наличием разнонаправленных движений воздушных потоков на уровнях 2 и 20 м (рис. 5, б). В течение суток при слабом ветре происходит частая смена направления ветра, особенно на верхнем уровне 20 м (скорости верхнего нисхо-

дящего потока и горизонтального ветра одного порядка).

Смена направления ветра в вечерние часы (18:00–22:00) с северо-западного на северное привела к тому, что в пункт наблюдения был внесен шлейф загрязненных воздушных масс со стороны близкорасположенных тлеющих очагов торфяных пожаров в северо-восточной части побережья оз. Байкал. Об этом также свидетельствуют рост содержания  $NO_2$  и резкое снижение концентрации  $O_3$  (рис. 5, а).

Результаты лидарных исследований аэрозольных полей наглядно подтверждают присутствие дымового аэрозоля в период измерений. На рис. 6 (цв. вкладка) приведен двумерный разрез аэрозольного поля тропосферы 16.08.2016 г. на стационаре «Боярский». Видно, что в послеполуденные часы аэрозольные слои устойчиво заполняют пограничный слой до 2 км. В нижнем приземном слое наблюдается значительный рост концентрации аэрозоля (на высоте 200–300 м) при смене направления ветра после 17:00 за счет переноса дымового шлейфа

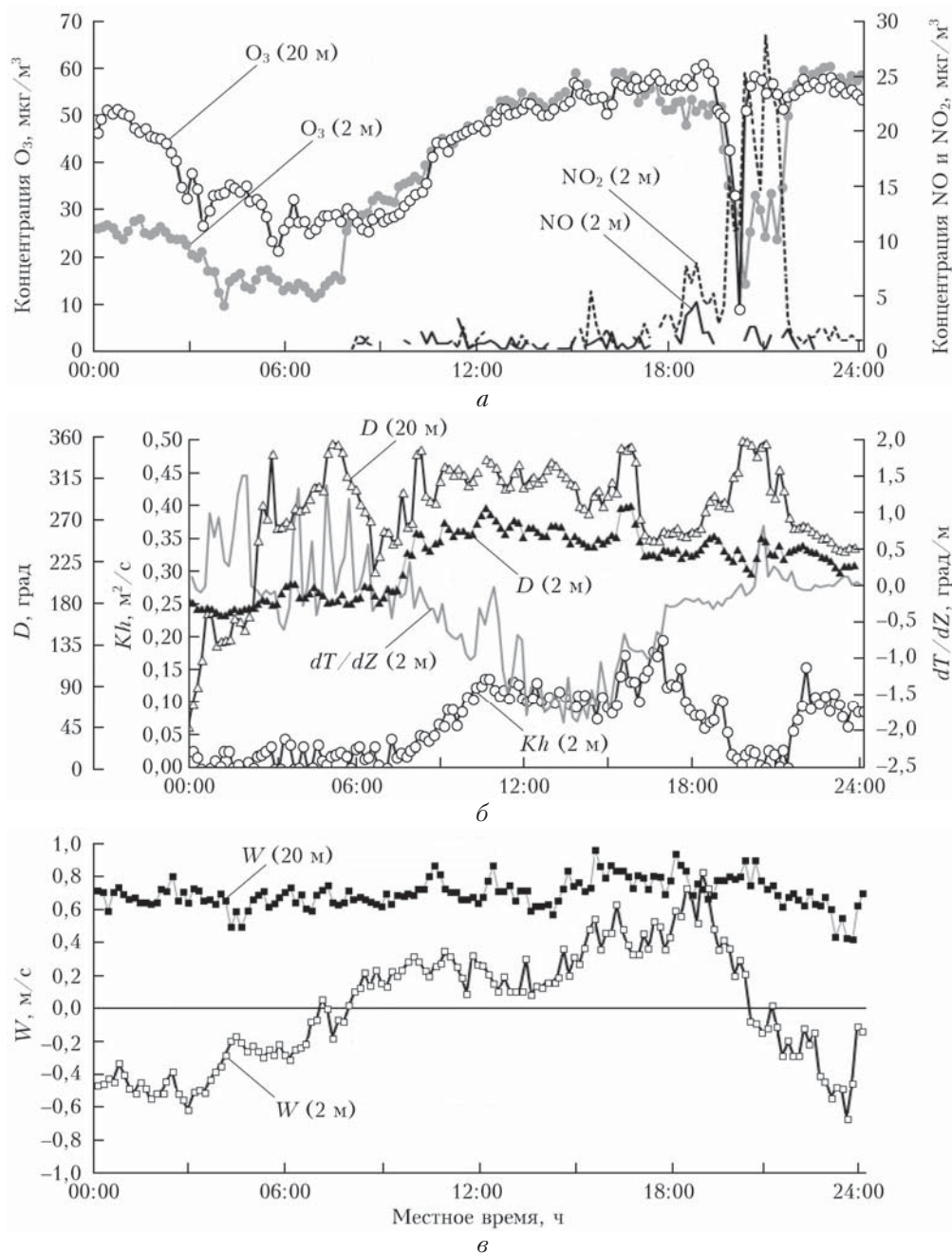
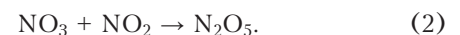
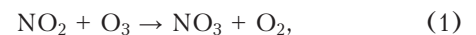


Рис. 5. Суточный ход приземной концентрации  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  (а),  $D$ ,  $Kh$ ,  $dT/dZ$  (б),  $W$  (в) на стационаре «Боярский» на разных высотах 16.08.2016 г.

с направлений, где отмечены тлеющие очаги торфяных пожаров в береговой зоне юго-восточного побережья оз. Байкал. Перенос дымового аэрозоля способствовал также и образованию облачности на высотах 2 км за счет конденсационных процессов с участием аэрозольных частиц. В этот время периодически отмечалось резкое снижение концентрации  $O_3$  синхронно с ростом концентрации оксидов азота до  $30 \mu\text{kg}/\text{m}^3$  (см. рис. 5, а).

Следует отметить, что оксиды азота играют очень важную роль не только в механизмах генерации озона, но и его деструкции. Ряд работ [13–15] указы-

вает на взаимодействие оксидов азота с  $O_3$  и последующие их взаимодействие с органическим аэрозолем. Согласно [13] начало процесса идет по схеме



В [14] показано, что  $N_2O_5$  может поглощаться органическим аэрозолем, а  $NO_2$  конверсироваться в азотистую кислоту с последующим его удалением [15]:



Такая схема взаимодействия, по-видимому, наблюдалась и в период измерений. Так, после снижения концентрации  $\text{NO}_2$  до фоновых значений в результате смены направления переноса воздушных масс концентрации  $\text{O}_3$  снова возросли до прежних значений.

В ночные часы из-за прекращения фотогенерации  $\text{O}_3$  концентрация его постепенно падает в связи с расходом на окислительные процессы в атмосфере и поглощением подстилающей поверхностью.

## Заключение

В работе приведены результаты наблюдений особенностей суточной динамики концентрации озона в атмосфере, полученные в ходе экспериментов 2015–2016 гг. Показаны различия в суточных вариациях концентрации озона в приповерхностном (2 м) и приземном слоях (20 м). Суточный ход озона в приземном слое более сглаженный, чем у поверхности земли, за счет меньшего влияния подстилающей поверхности. Проведен анализ распределения концентрации приземного озона в зависимости от изменения метеорологических параметров атмосферы, а также при различных синоптических условиях.

Отдельно рассмотрены случаи повышенного загрязнения атмосферы аэрозольными и газовыми примесями вследствие лесных и торфяных пожаров в регионе оз. Байкал. В этот период наблюдений зафиксированы превышение естественной концентрации окислов азота и диоксида серы, а также изменение концентрации приземного озона в атмосфере. На вертикальных разрезах высотного распределения аэрозоля, полученных в ходе синхронных лидарных измерений, показаны моменты начала заноса дымового аэрозоля в атмосферу над местом наблюдений и дальнейший значительный рост его содержания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-05044\_офи).

1. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 487 с.
2. Демин В.И., Белоглазов М.И., Мокров Е.Г. Фоновые эффекты над Хибинами в изменениях концентрации приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 613–617.

3. Демин В.И., Белоглазов М.И. О влиянии местных циркуляционных процессов на динамику приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 331–333.
4. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдытов В.В., Балжанов Т.С. Результаты мониторинга приземного озона в атмосфере г. Улан-Удэ // Метеорол. и гидрол. 2013. № 12. С. 76–84.
5. Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф. О связи приземной концентрации озона и высоты слоя перемешивания // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 8. С. 662–665.
6. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдытов В.В., Балжанов Т.С. Влияние динамических процессов на вариации озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны озера Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 505–511.
7. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Бутуханов В.П., Ломухин Ю.Л. Концентрация озона и окислов азота в приземном слое атмосферы оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 635–640.
8. Куценогий К.П., Потемкин В.Л., Куценогий П.К., Смирнова А.И. Влияние аэрозолей на спектральную оптическую плотность атмосферы на юге оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 7. С. 872–879.
9. Анохин Ю.А., Кокорин А.О., Прохорова Т.А., Анисимов М.П. Аэрозольные загрязнения атмосферы над озером Байкал и влияние на него промышленных источников // Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 44–50.
10. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С. Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 463–472.
11. Балин Ю.С., Еришов А.Д. Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы в котловине оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 633–638.
12. 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.
13. Aleya F.N., Cunnold D.M., Prinn R.G. Meteorological constraints on tropospheric halocarbon and nitrous oxide destructions by siliceous land surfaces // Atmos. Environ. 1978. V. 12, N 5. P. 1009–1011.
14. Tourance G. Mesure et comportement du PAN dans l'atmosphère // Pollut. Atmos. 1991. V. 33, N. Spec. P. 142–150.
15. Kamm S., Mohler O., Naumann K.-H. Heterogeneous interaction of ozone,  $\text{NO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}_5$  with soot aerosol // Proc. EUROTRAC Sumpodium-98. 1999. V. 1. P. 649–655.

*A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva, V.V. Tsydyпов, T.S. Balzhanov, Yu.S. Balin, I.E. Penner, G.P. Koxhanenko, S.V. Nasonov. Features of the transport and transformation of aerosol and gas impurities in the atmosphere in the coastal zone of the Lake Baikal.*

The results of experimental studies of the daily dynamics of atmospheric gases and the meteorological characteristics of the atmosphere at different altitudes on the southeastern coast of Lake Baikal are presented. Measurements were carried out in July–August 2015–2016 at the “Boyarsky” station (51.84°N, 106.06°E). At the same time, lidar measurements were made aimed at studying the formation of vertical structure of aerosol fields both in background conditions and in the presence of sources of smoke caused by forest fires.

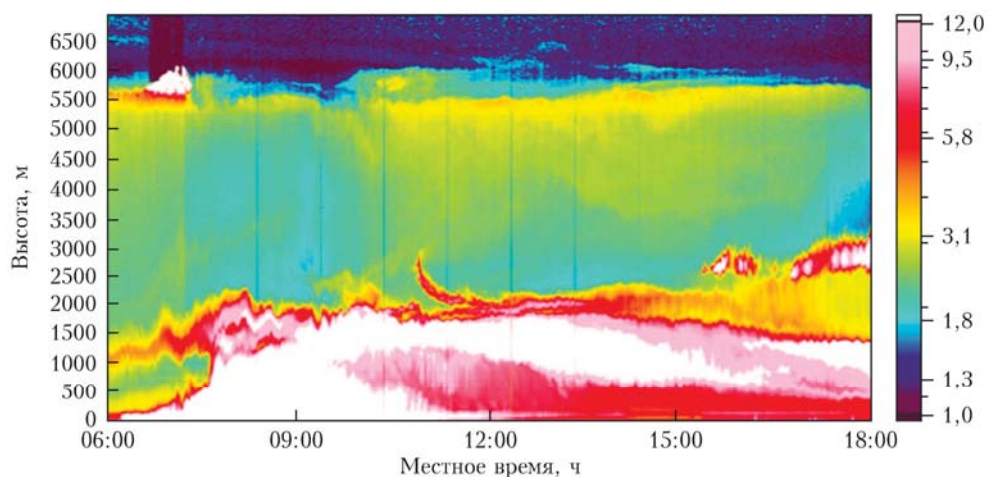


Рис. 3. Пространственно-временной разрез аэрозольного поля, полученный 9.08.2015 г. на стационаре «Боярский». Цветовая шкала представлена в единицах отношения рассеяния

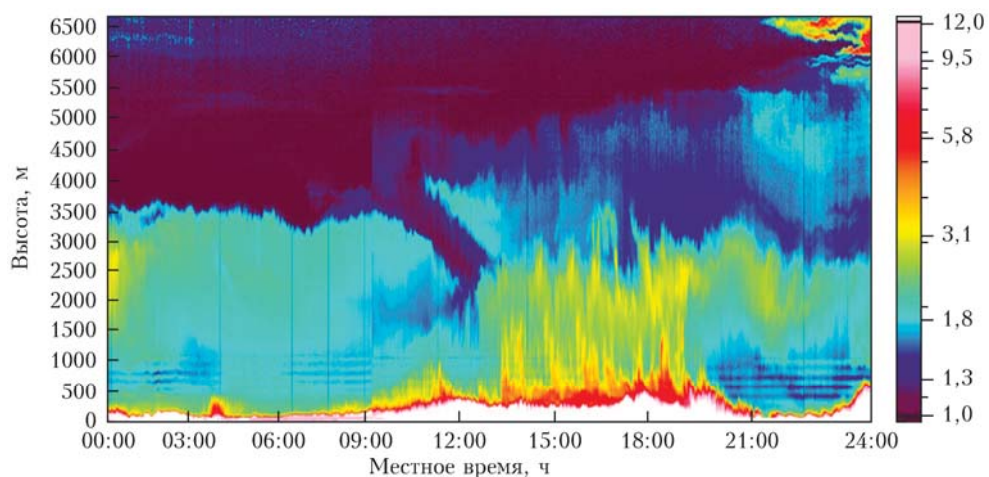


Рис. 4. Пространственно-временной разрез аэрозольного поля, полученный 7.08.2015 г. на стационаре «Боярский»

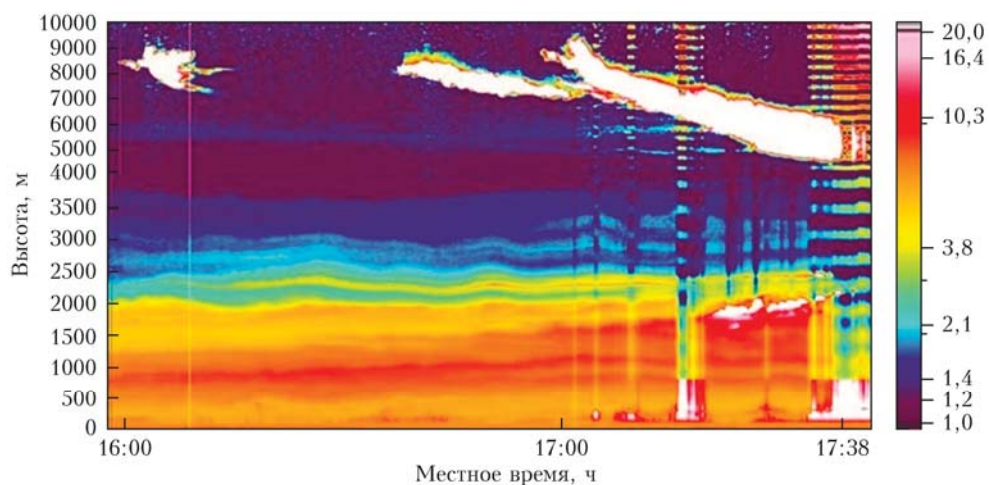


Рис. 6. Пространственно-временной разрез аэрозольного поля, полученный 16.08.2016 г. на стационаре «Боярский»