

Синхронные лидарные наблюдения пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля в прибрежной зоне озера Байкал

С.В. Насонов[✉], Ю.С. Балин, М.Г. Клемашева, Г.П. Коханенко,
А.С. Насонова, М.М. Новоселов, И.Э. Пеннер*

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

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.;
после доработки 15.05.2023 г.;
принята к печати 3.07.2023 г.

Представлены результаты синхронных лидарных наблюдений переноса аэрозольных полей атмосферы над оз. Байкал в летней экспедиции 2018 г. Эксперимент проводился с использованием двух лидаров, один из которых располагался на судне, а второй — на стационаре, на удалении 732 м от судна. На основе корреляционного анализа полученных данных сделаны оценки времени переноса атмосферных аэрозольных неоднородностей между точками наблюдений на разных высотах над горной котловиной. Выявлено, что для высотного диапазона 100–350 м время переноса составляет 5 мин 20 с, для 1250–1500 м — 7 мин 12 с, для 2100–2500 м — 5 мин 20 с и для диапазона 4200–4300 м — 6 мин 24 с. Подобное неравномерное высотное распределение времени переноса аэрозольных объектов обусловлено сложным механизмом циркуляции воздушных потоков в горной котловине.

Ключевые слова: озеро Байкал, аэрозоль, лидар, взаимно корреляционная функция, метеопараметры атмосферы; Lake Baikal, aerosol, lidar, cross-correlation function, meteorological parameters.

Введение

Специфические особенности ветрового режима в горной котловине оз. Байкал отмечены во многих работах [1–5]. При формировании ветровых условий над Байкалом определяющими являются орографические факторы данного региона. За счет окружающего озеро со всех сторон сложного горного рельефа, с множеством ущелий и межгорных котловин, здесь наблюдаются такие локальные ветра, как Сарма, Баргузин, Верховик и Култук [6]. Кроме того горные хребты препятствуют проникновению внешних потоков ветра к озеру. Благодаря большому запасу воды температура поверхности озера мало изменяется в течение суток и, следовательно, слабо воздействует на нижнюю часть пограничного слоя.

Во время самолетных наблюдений над Байкалом обнаружен эффект внутренней котловинной

циркуляции воздуха [1]. Он не связан с основным переносом и проявляется в движении воздуха вдоль западного побережья с севера на юг, а вдоль восточного — с юга на север. В работе [2] была определена вертикальная протяженность циркуляционных ячеек. Нижняя граница располагается на высоте 300 м, верхняя — 1400 м. Центр ячейки находится на высоте 800 м. Котловинная циркуляция является достаточно устойчивой во времени, но может разрушаться при прохождении атмосферных фронтов.

В свою очередь, локальные циркуляции воздушных потоков над Байкалом оказывают влияние на пространственное распределение и перенос атмосферных примесей над акваторией озера. Изолированность территории способствует длительному сохранению в котловине как загрязняющих веществ от локальных источников, так и от удаленных и привнесенных за счет трансграничного переноса. Под действием ветровых течений происходят оседание примесей в нижележащие слои и дальнейшее загрязнение воды Байкала, поэтому вопрос контроля состояния атмосферы является актуальным.

Настоящая работа — продолжение регулярных лидарных исследований процессов формирования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы в горной котловине, проводимых с использованием однопозиционного лидара [7].

* Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@iao.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Марина Георгиевна Клемашева (marina@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Анна Сергеевна Насонова (anna.s.nasonova@gmail.com); Михаил Михайлович Новоселов (novoselov@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).

Цель настоящей работы заключается в изучении переноса аэрозольных примесей атмосферы с применением двух пространственно-разнесенных однотипных аэрозольных лидаров, что позволяет оценить время переноса на различных высотах.

Аппаратура и методы

Исследования вертикальной структуры аэрозольных полей нижней тропосферы на оз. Байкал регулярно проводятся авторами с использованием лидаров серии «ЛОЗА», разработанных в Институте оптики атмосферы СО РАН [8, 9]. На протяжении нескольких лет наземные измерения осуществляются с помощью многочастотного мобильного аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-М2» [10] в восточной части акватории оз. Байкал, на стационаре «Боярский» Института физического материаловедения СО РАН (51,84° с.ш., 106,06° в.д.).

В 2018 г. специально для исследований в сложных экспедиционных условиях был создан мобильный аэрозольно-рамановский поляризационный лидар «ЛОЗА-А2» [11]. С этого же года он использо-

вался как один из основных инструментов контроля состояния атмосферы в комплексных корабельных исследованиях на научно-исследовательских судах Лимнологического института СО РАН.

Более подробные сведения о технических характеристиках и конструктивных особенностях применяемых на Байкале лидарных систем приведены в работах [10, 11]. В настоящей статье ограничимся лишь основными параметрами лидаров (таблица).

Первоначальная интерпретация данных лазерного зондирования атмосферы происходит на основе анализа временной динамики вертикальных разрезов лидарных сигналов аэрозольных полей тропосферы.

Общий анализ синоптической обстановки над регионом наблюдений проводился с использованием открытых данных ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (Россия) [15]. Более подробная информация о ветровых потоках заимствована из приложения Ventusky компании InMeteo (Чехия) [16], основными источниками метеорологической информации для которого являются DWD (Метеорологическая служба

Технические характеристики используемых в экспериментах лидарных систем

Параметр	Название лидара, место расположения	
	«ЛОЗА-М2», Стационар «Боярский»	«ЛОЗА-А2», НИС «Академик В.А. Коптюг»
<i>Передачик</i>		
Nd:YAG-лазер	LOTIS LS-2135 (Беларусь)	LOTIS LS-2131M (Беларусь)
Энергия на длинах волн, мДж:		
1064 нм	340	240
532 нм	170	120
Длительность импульса, нс	10–12	8
Частота повторения импульсов, Гц	10	1–20
<i>Коллиматор</i>		
Расходимость пучка, мрад	0,5	0,2
Диаметр пучка, мм	60	50
Поляризация на выходе	линейная	линейная
<i>Приемник</i>		
Приемный телескоп	Два (для ближней и дальней зон)	Два (для видимого и ИК-диапазона)
Диаметр телескопа, мм	50 и 250	110
Фокусное расстояние, мм	200 и 1000	500
Поля зрения телескопа, мрад	1	1–10
1. Приемный канал 532 нм Режим приема	аналоговый (без учета поляризации) H11526-20-NF Hammamatsu (Япония) [12]	аналоговый (поляризованный, кросс-поляризованный) H11526-20-NF Hammamatsu (Япония) [12]
Приемник		
2. Приемный канал 1064 нм Режим приема	аналоговый фотомодуль на основе лавинного фотодиода С30956Е-ЕС (ИОА, Россия) [13]	аналоговый фотомодуль на основе лавинного фотодиода С30956Е-ЕС (ИОА, Россия) [13]
Приемник		
3. Приемный канал 607 нм Режим приема	счет фотонов (в темное время суток) H11706P-40-MOD Hammamatsu (Япония) [14]	счет фотонов (в темное время суток) H11706P-40-MOD Hammamatsu (Япония) [14]
Приемник		
<i>Условия эксплуатации</i>		
Температура, °С	0–40	0–40
Влажность, %	10–95	10–95

Германии) и NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США). Также при изучении процессов переноса атмосферного аэрозоля рассчитывались обратные траектории с использованием гибридной модели интегральных лагранжевых траекторий частиц (NOAA HYSPLIT, США) [17].

Для определения метеоусловий, при которых происходят формирование и перенос наблюдаемых пространственно-временных структур аэрозольных и облачных полей, использовались данные о высотных изменениях метеопараметров атмосферы, взятые из базы данных Вайомингского университета [18]. В этой базе доступны данные ближайших к месту проведения лидарных измерений станций аэрологического зондирования, расположенных в г. Усть-Баргузин на восточном берегу озера на расстоянии 260 км от стационара «Боярский» и в г. Ангарск на расстоянии 160 км на запад. Для измерения метеорологических параметров в приземном слое атмосферы в непосредственной близости от лидара на территории стационара были установлены два акустических метеорологических комплекса АМК-03 «ЭКСМЕТЕО» (Россия) [19] на мачтах на высоте 3 и 20 м над уровнем земли.

Результаты и обсуждение

В 2018–2021 гг. был проведен ряд комплексных корабельных экспедиций на Байкале, направленных на исследование переноса аэрозольно-газовых примесей атмосферы [20]. В настоящей работе представлен эпизод наблюдений, проводившихся 18 июля 2018 г. одновременно двумя пространственно разнесенными лидарами «ЛОЗА». В этот день научное судно «Академик В.А. Коптюг» с измерительным оборудованием подошло к береговой линии на расстоянии 276 м. Расстояние между лидарами составляло 732 м. Лидары относительно берега располагались по линии северо-запад – юго-восток (~300°).

На рис. 1 показаны аэрозольные и облачные поля тропосферы, полученные синхронно с помощью лидаров «ЛОЗА-M2» (рис. 1, а) и «ЛОЗА-A2» (рис. 1, б). Во время измерений наблюдались аэрозольные и облачные слои на разных высотах от 0 до 5 км. Учитывалось, что стационар расположен на 50 м выше уровня озера.

По оси x представлена временная шкала с разрешением 16 с, соответствующая промежутку наблюдений с 10:00 до 14:00 по местному времени. Так как частота следования импульсов и время накопления одного профиля у двух лидаров были разные, то сигналы были просуммированы по 16 с, что позволило получить их одинаковое количество для обоих лидаров (891 шт.) в указанный промежуток времени. Для анализа были использованы данные на длине волны излучения 532 нм. Пространственное разрешение у обоих лидаров одинаковое и составляет 6 м. Диапазон высот выбран от 0 до 5 км, что позволяло исследовать вертикальную структуру аэрозольных и облачных полей как в горной котловине, так и в свободной атмосфере. В случае на-

блюдений с помощью лидара «ЛОЗА-M2» на стационаре «Боярский» сигналы получены «сшиванием» сигналов от приемников ближней и дальней зон на высоте 800 м. Методика этой процедуры подробно изложена в работе [10].

Применение одновременно двух лидаров позволяет оценить время переноса атмосферных аэрозольных объектов между двумя точками наблюдения. Для оценки временного сдвига двух наблюдаемых с помощью лидаров пространственно-временных структур аэрозольных неоднородностей атмосферы использовался известный способ измерения скорости их движения по двухточечной методике временного корреляционного анализа [21], который позволяет определять временной сдвиг между двумя реализациями лидарных сигналов по положению максимума взаимно корреляционной функции (ВКФ). ВКФ показывает степень схожести двух различных сигналов $x(t)$ и $y(t)$, сдвинутых на время τ друг относительно друга [22]:

$$R_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t + \tau) d\tau,$$

где $x(\tau)$ — сигналы, полученные лидаром на судне; $y(t)$ — сигналы, полученные лидаром на стационаре, после предварительной обработки [21]. Двухточечная методика измерений применима и при несовпадении расположения измерительной базы лидаров с направлением ветра.

Время жизни аэрозольных неоднородностей можно оценить по полуширине главного максимума автокорреляционной функции (АКФ), которая рассчитывается как [22]:

$$R_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) x^*(t - \tau) d\tau,$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение.

Благодаря тому, что 18 июля 2018 г. наблюдались аэрозольные и облачные образования на разных высотах, была проведена корреляционная оценка времени их перемещения между точками расположения лидаров на разных высотах — от приземного слоя до средней тропосферы. Корреляционный анализ основывался на пространственно-временных реализациях сигналов двух лидаров, полученных синхронно в одно время в вертикальном направлении. На рис. 2–4 в качестве примеров приведены горизонтальные профили высот нижних границ атмосферных образований на разных высотах и рассчитанные по ним ВКФ и АКФ.

Корреляционные расчеты показали, что время переноса на разных высотах различалось на несколько минут и составляло: 5 мин 20 с (рис. 2, б); 7 мин 12 с (рис. 3, б); 5 мин 20 с (рис. 4, б) и 6 мин 24 с (рис. 5, б). Сначала аэрозольные образования наблюдаются над кораблем, затем — над стационаром. Необходимо отметить, что в нижних слоях (см. рис. 2) появление аэрозольного слоя обусловлено именно влиянием озера. О том, что аэрозольный слой образован водными частицами, свидетельствует степень деполаризации рассеянного

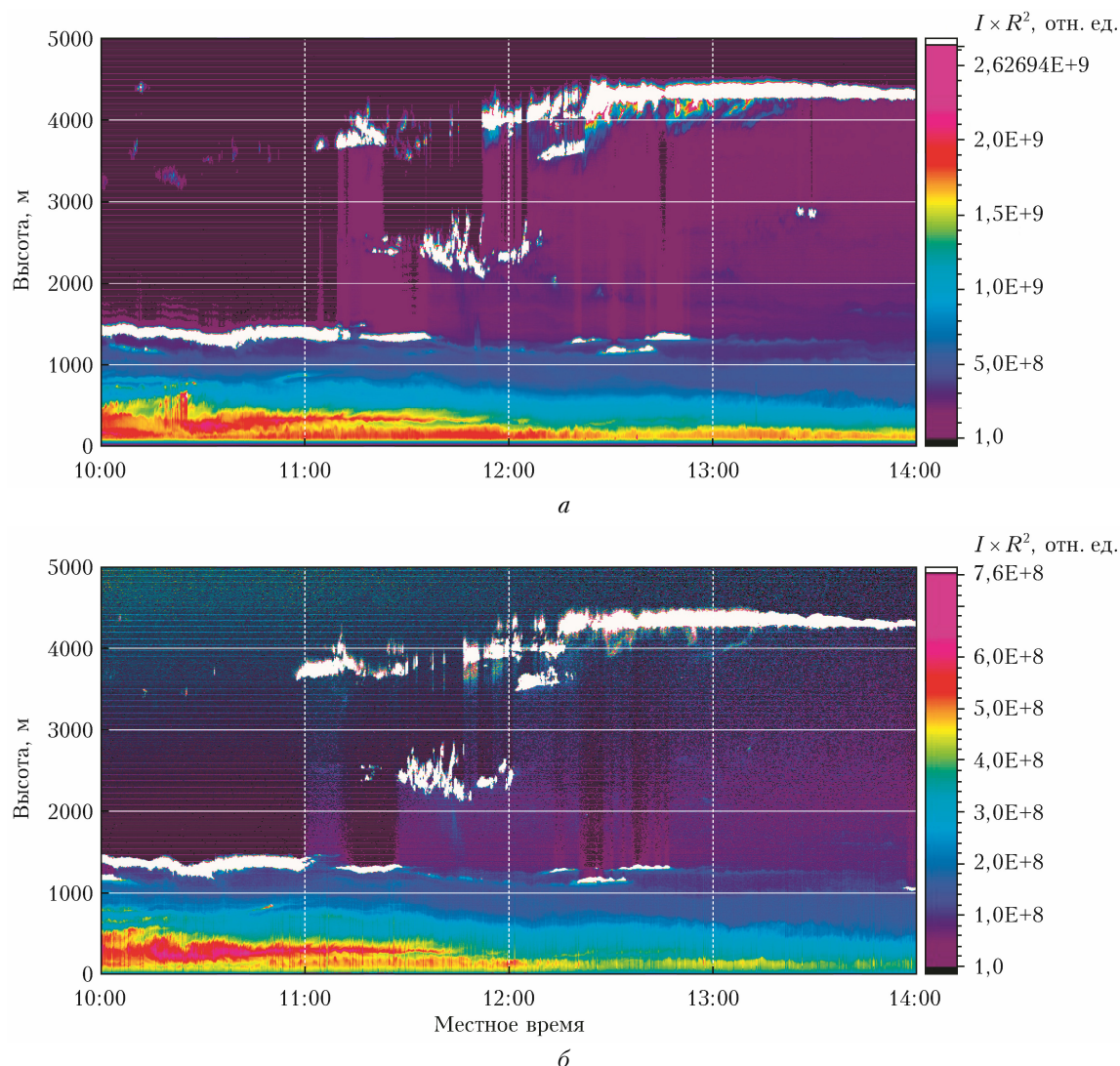


Рис. 1. Пространственно-временная структура аэрозольного поля тропосферы ($\lambda = 532$ нм), полученная 18 июля 2018 г.: лидаром «ЛОЗА-М2» на стационаре «Боярский» (а); «ЛОЗА-А2» на НИС «Академик В.А. Коптюг» (б). Цветовая шкала справа обозначает скорректированный на квадрат расстояния лидарный сигнал: I — интенсивность сигнала; R — расстояние (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

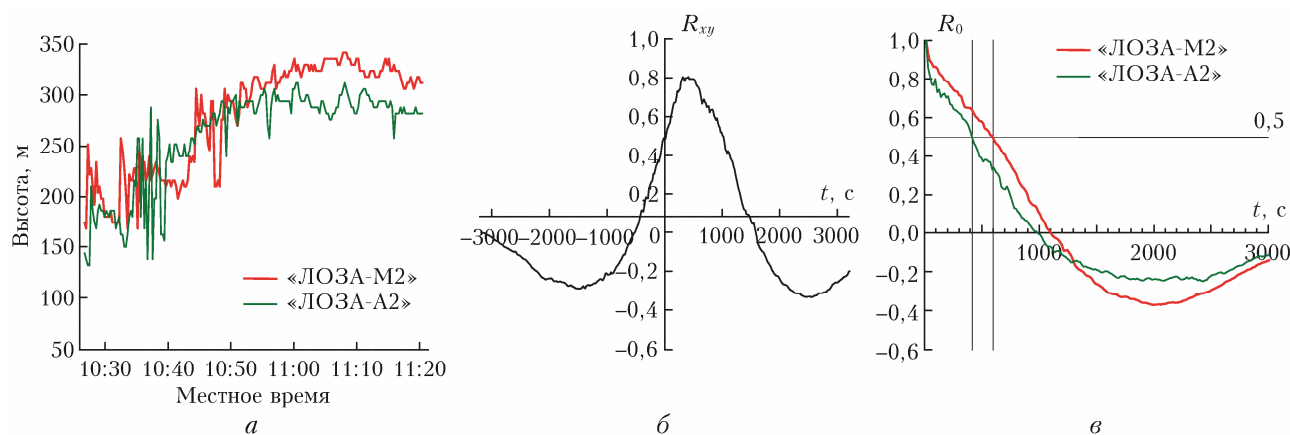


Рис. 2. Фрагмент эксперимента для диапазона высот 100–350 м: временные реализации лидарных сигналов от нижней границы приподнятого аэрозольного слоя (а); нормированная ВКФ (б) и АКФ (в) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

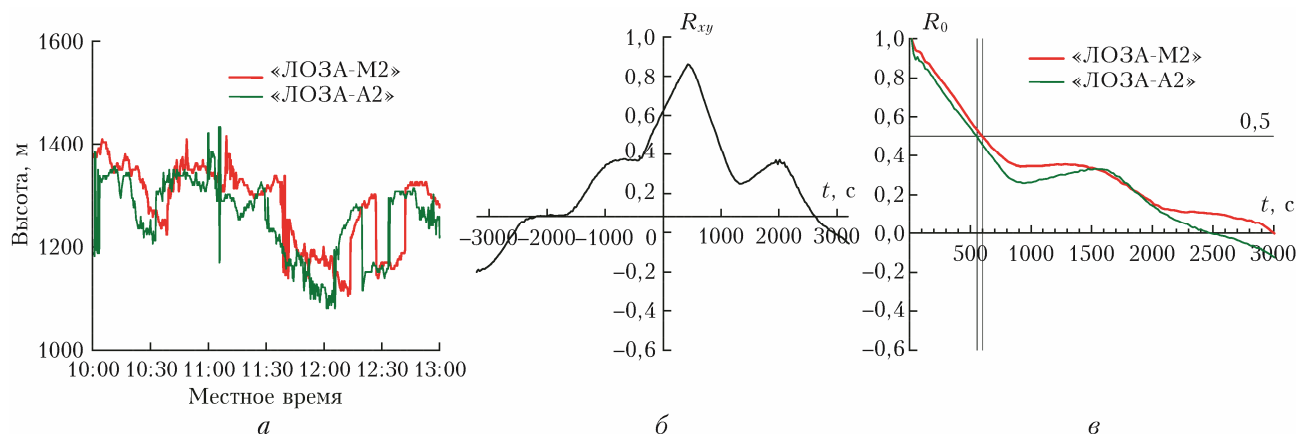


Рис. 3. Фрагмент эксперимента для диапазона высот 1200–1500 м: временные реализации лидарных сигналов от нижней границы облака (а); нормированная ВКФ (б) и АКФ (в) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

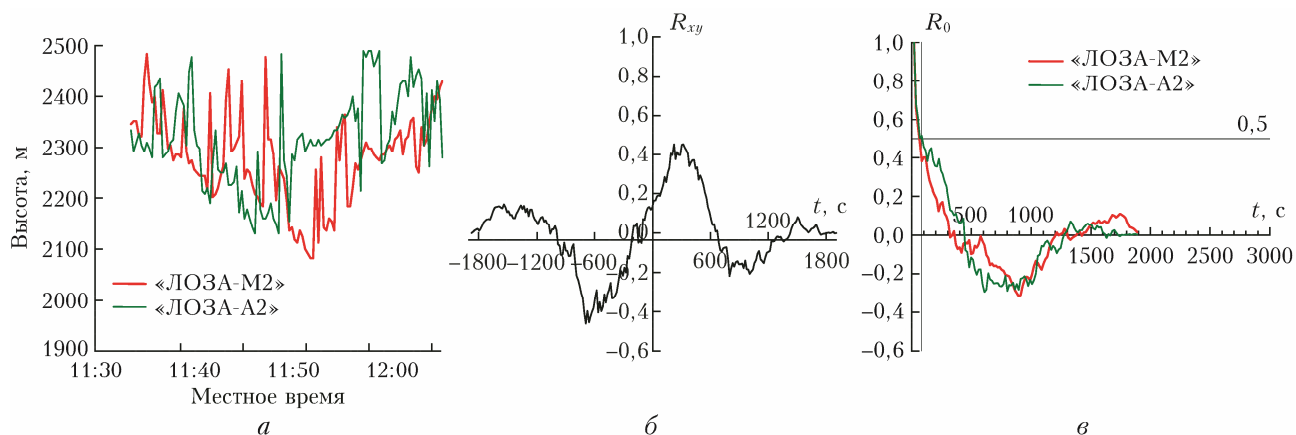


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для высот 2100–2500 м (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

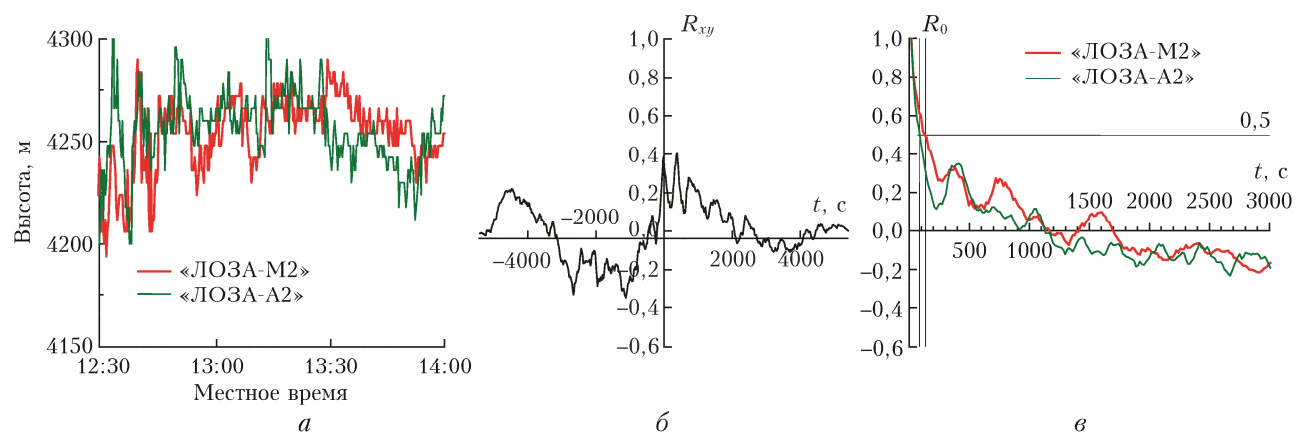


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для высот 4200–4300 м (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

излучения (5–7%), рассчитанная по данным лидара «ЛОЗА-A2». Из общего вида представленных зависимостей следует, что чем больше высота до наблюдаемых неоднородностей, тем сложнее становится форма ВКФ, корреляция уменьшается и начинают проявляться побочные максимумы. Полуширина главного максимума АКФ уменьшается с высотой,

время жизни неоднородностей уменьшается с ~ 500 до ~ 100 с. Обычно для инерционного интервала длин волн время жизни составляет десятки секунд [21, 23].

На рис. 6 точками обозначена скорость переноса аэрозольных образований на разных высотах, рассчитанная по сдвигу максимума ВКФ, а линиями —

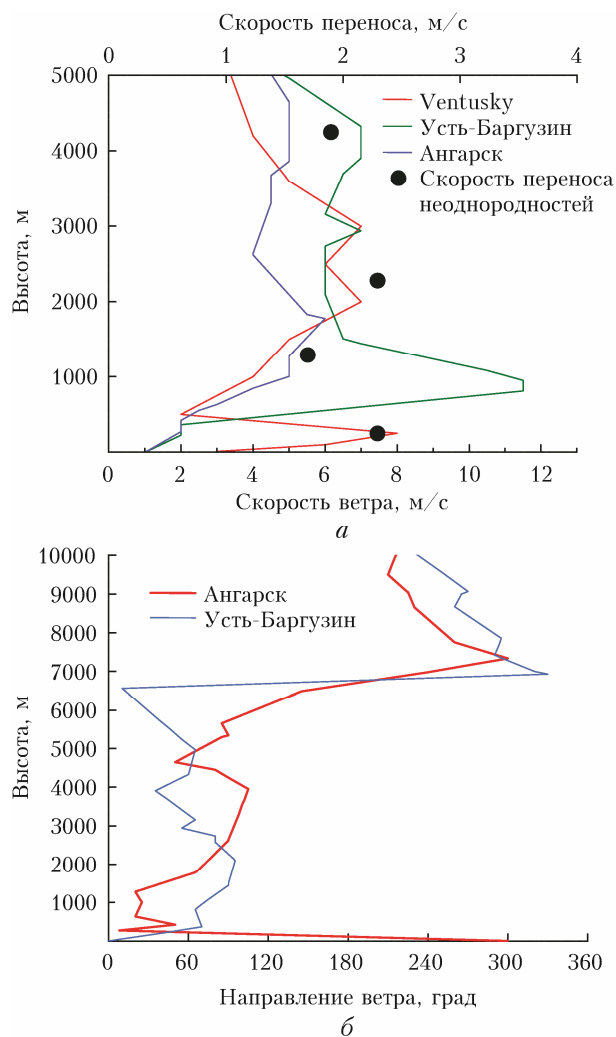


Рис. 6. Изменение с высотой скорости переноса неоднородностей между точками наблюдений и скорость ветра по данным приложения Ventusky [16] и базы данных Вайомингского университета (а); изменение направления ветра с высотой по данным Вайомингского университета [18] (б) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

изменение скорости и направления ветра на разных высотах по данным приложения Ventusky [16] и базы данных Вайомингского университета [18].

Согласно приведенным на графиках данным при скорости ветра от 2 до 12 м/с расстояние в 732 м по прямой между точками расположения лидаров атмосферные неоднородности, переносимые ветровыми потоками, преодолевали бы за время от 6 мин 6 с до 1 мин 1 с соответственно. Рассчитанная по лидарным наблюдениям длительность переноса на высоте 1,3 км больше указанного временного диапазона.

По данным метеостанции, расположенной в Боярске на высоте 40 м над землей, утром 18 июля 2018 г. направление ветра составило 250° (ветер вдоль берега), а после полудня постепенно сменилось на 300° (с озера). Скорость ветра уменьшалась с 6 до 1 м/с. Сменой направления переноса воздушных масс объясняется наблюдаемая по лидарным

данным картина изменения высоты аэрозольных полей в атмосфере в течение дня, когда по мере дневного прогрева воздуха не происходит подъема аэрозоля пограничного слоя в вышележащие слои. Ситуация становится противоположной, когда аэрозоль постепенно начинает «прижиматься» к земле. Холодный воздух, приходящий с озера, не дает аэрозолю подниматься выше. Ослабляется интенсивность турбулентного перемешивания. Температура воздуха в Боярске, в приземном слое атмосферы, с момента восхода солнца выросла лишь на 4 °С к вечеру того же дня.

По данным Ventusky [16] и результатам траекторного анализа с использованием модели HYSPLIT [17], в масштабах региона синоптическая ситуация определялась действием циклона юго-восточнее Байкала с центром на западе Забайкальского края. Анализ карт направления ветровых потоков показывает, что основной перенос над южной частью Байкала был с востока. Скорость ветра уменьшалась с высотой. На высотах 6–9 км происходит смена направления ветра на западное. Аналогичная картина изменения направления ветра с высотой наблюдалась и по данным аэрологических станций в г. Усть-Баргузин и в г. Ангарске (рис. 6, б). До высот 6 км преобладающее направление ветра – восточное. Выше 6 км происходит поворот ветровых потоков.

Однако, согласно проведенным лидарным измерениям в Боярске, атмосферные неоднородности на всех высотах до 5 км перемещаются со стороны озера, сначала появляясь над точкой наблюдений на корабле, затем – над сушей. Изменяется только скорость переноса неоднородностей. Наибольшее время переноса зарегистрировано для диапазона высот 1,2–1,5 км (7 мин 12 с). Такую временную задержку можно объяснить тем, что воздушные потоки западного направления на этой высоте начинают замедляться. По-видимому, это вызвано действием бризовой циркуляции – процесса, конкурирующего с внутренней котловинной циркуляцией. Согласно работе [24] вертикальные масштабы таких ячеек определяются следующим образом: до 600 м – направление переноса с озера на сушу, с 700 до 1000 м – переходный слой, где равновероятно может быть перенос и в ту и в другую сторону, а выше 1100 м – направление переноса меняется на обратное, с суши на озеро. Дневной бриз на Байкале является достаточно частым явлением в летний период, так как температура воды озера очень низкая (8 °С в июле).

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что глобальная модель прогнозирования изменения метеопараметров атмосферы плохо применима в условиях Байкальской котловины и дает лишь качественное представление о синоптической обстановке в масштабах целого региона. Это связано с недостаточной плотностью аэрологических станций на данной территории.

Проведенный эксперимент с использованием двух пространственно-разнесенных лидаров показывает, что в условиях сложной топографии местности Байкала необходимо больше информации о характере локальных воздушных течений, чтобы более точно прогнозировать экологические и климатические изменения в данном регионе. Локальные ветровые потоки влияют на распределение аэрозольных примесей в горной котловине. Примеси могут быть занесены в те районы, где в обычных (например, равнинных) условиях они редко наблюдаются. Кроме того, такие исследования помогают понять, как формируется и изменяется местный климат прибрежной территории.

Также стоит отметить еще одну особенность Байкальского региона. Результаты проведенного анализа автокорреляционных функций позволили оценить время жизни атмосферных неоднородностей — порядка 500 с, в то время как обычно для инерционного интервала длин волн оно составляет десятки секунд. Воздушные массы, сформированные над относительно холодным озером, приобретают устойчивую стратификацию, за счет чего аэрозольные слои на разных высотах сохраняют свою структуру длительное время.

В дальнейшем авторы планируют проводить измерения скорости и направления ветра на выделенных высотах, используя методику одновременных видео- и лидарных наблюдений аэрозольных образований.

Результаты ежегодных лидарных исследований атмосферы над оз. Байкал в летний период (в виде пространственно-временных распределений аэрозоля совместно с метеоданными во время наблюдений) доступны на сайте Института оптики атмосферы (<https://loza.iao.ru/Data/baikal>).

Благодарности. В экспедициях были задействованы аппаратура и научно-исследовательские суда Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск), а также оборудование и материально-техническая база стационара «Боярский» Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ). Авторы выражают признательность руководителям экспедиционных отрядов Т.В. Ходжер и Г.С. Жамсуйевой, а также сотрудникам указанных институтов за помощь в организации и проведении исследований на оз. Байкал.

Финансирование. Обработка и анализ лидарных данных, а также расчет корреляционных характеристик сигналов проводились при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-77-10043) (<https://rscf.ru/project/22-77-10043>).

Список литературы

1. 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.
2. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Поданев А.В., Покровский Е.В., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К. Некоторые характеристики циркуляции воздуха вдоль периметра оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. 1999. № 8. С. 66–71.
3. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М. Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 4. С. 290–293.
4. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 10. P. 5239–5248. DOI: 10.5194/amt-9-5239-2016.
5. Смалихо И.Н., Банах В.А., Сухарев А.А. Определение параметров турбулентности из спектров вертикальной компоненты скорости ветра, измеряемой импульсным когерентным доплеровским лидаром. Часть III. Эксперимент на побережье озера Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 891–897. DOI: 10.15372/AOO20211109.
6. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: уч. пособие. Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. 291 с.
7. 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.
8. Балин Ю.С., Еришов А.Д., Пеннер И.Э. Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 1. Продольные разрезы // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 438–446.
9. Балин Ю.С., Еришов А.Д., Пеннер И.Э. Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 2. Поперечные разрезы // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 7. С. 587–597.
10. Balin Yu.S., Bairashin G.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoilova S.V. LOSA-M2 aerosol Raman lidar // Quantum Electron. 2011. V. 41, N 10. P. 945. DOI: 10.1070/QE2011v041n10ABEH014574.
11. Nasonov S., Balin Yu., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I., Samoilova S., Khodzhher T. Mobile aerosol Raman polarizing lidar LOSA-A2 for atmospheric sounding // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1032. P. 1–12. DOI: 10.3390/atmos11101032.
12. Hamamatsu Photonics. URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-module/current-output-type/H11526-20.html>.
13. Слесарь А.С., Чайковский А.П., Иванов А.П., Денисов С.В., Король М.М., Осипенко Ф.П., Балин Ю.С., Куханенко Г.П., Пеннер И.Э. Фотоприемные модули для лидарных станций в сети CIS-LiNet // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1073–1081.
14. URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-module/current-output-type/H11706P-40.html> (last access: 15.03.2023).
15. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. URL: <http://old.aari.ru/odata/d0010.php> (дата обращения: 30.03.2023).
16. Ventusky. URL: <https://www.ventusky.com/> (last access: 30.03.2023).
17. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html> (last access: 15.03.2023).
18. University of Wyoming. URL: <http://www.weather.uwyo.edu/sounding> (last access: 30.03.2023).

19. Стационарные метеорологические комплексы SAP URL: <http://meteosap.ru/catalog/amk-03/> (дата обращения: 20.03.2023).
20. Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokova L., Vratolis S., Eleftheriadis K., Khodzer T. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal // J. Environ. Sci. 2021. V. 107. P. 49–64. DOI: 10.1016/j.jes.2021.01.011.
21. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С., Колесов И.Н., Аврамова Р.П. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
22. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление / под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. 4063 с.
23. Балин Ю.С., Бельский М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В. Пространственно-временная структура сигналов аэрозольного лидара // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 8. С. 77–83.
24. Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 324 с.

S.V. Nasonov, Yu.S. Balin, M.G. Klemasheva, G.P. Kokhanenko, A.S. Nasonova, M.M. Novoselov, I.E. Penner. Synchronous lidar observations of the spatiotemporal structure of atmospheric aerosol in the coastal zone of Lake Baikal.

The results of synchronous lidar observations of the transfer of atmospheric aerosol fields over Lake Baikal during the summer expedition of 2018 are presented. The experiment was carried out using two lidars, one of which was located on a ship, and the second, at a distance of 732 m at a stationary station. Based on the correlation analysis of the lidar data, the transfer time of atmospheric aerosol heterogeneities between observation points at different altitudes above the mountain basin is estimated. It is found that the transfer time is 5 min 20 s for the altitude range 100–350 m, 7 min 12 s for 1250–1500 m, 5 min 20 s for 2100–2500 m, and 6 min 24 s for the range 4200–4300 m. Such uneven altitude distribution of the transfer time of aerosol objects is due to the complex air flow circulation in the mountain basin.