

УДК 551.521.3

Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы над озером Байкал в период лесных пожаров

Ю.С. Балин, М.Г. Клемашева, Г.П. Коханенко,
С.В. Насонов, 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 25.01.2016 г.

Представлены результаты исследований временного изменения вертикальной структуры аэрозольных полей в горной котловине оз. Байкал при наличии источников дымов как от удаленных, так и локальных лесных пожаров. Измерения проводились с помощью лидара «ЛОЗА-М2», располагавшегося на восточном берегу оз. Байкал, во время экспедиций 2013 и 2015 гг., когда наблюдались экстремально высокие значения содержания аэрозоля в тропосфере, обусловленные лесными пожарами. Отмечается существенное отличие пространственно-временной структуры дымовых аэрозольных полей от локальных лесных пожаров в акватории озера от случая, когда источники примесей расположены на значительном удалении.

Ключевые слова: лидар, дымовой аэрозоль, параметр Ангстрема, озеро Байкал, лесные пожары; lidar, biomass burning aerosol, Angstrom exponent, Lake Baikal, forest fires.

Введение

Озеро Байкал, расположенное в южной части Восточной Сибири, является глубочайшим озером планеты Земля, уникальным творением природы и природным объектом, включенным ЮНЕСКО в список Всемирного наследия. Изучению и охране окружающей среды акватории оз. Байкал уделяется особое внимание [1, 2]. Немаловажное место в этом ряду занимают исследования аэрозольных полей атмосферы [3–5], содержащих в себе различные примеси как естественного, так и антропогенного происхождения. Аэрозольные примеси являются радиационно-активными компонентами атмосферы, и их пространственно-временная изменчивость оказывает существенное влияние на климат и экосистемные изменения в регионе оз. Байкал [6].

Лидары являются незаменимым инструментом в исследовании вертикальной структуры аэрозольных полей нижней тропосферы. В последние годы в составе комплексных экспедиций по изучению атмосферы оз. Байкал проводятся планомерные лидарные измерения в летний период в юго-восточной части берега на полигоне ст. Боярский

(51,84° с.ш., 106,06° в.д.). Зондирование выполняется практически круглосуточно, что дает возможность в режиме непрерывного мониторинга в течение 2–3 нед исследовать вертикальную структуру заполнения тропосферы аэрозолем в зависимости от влияния процессов синоптического и суточного масштаба.

Отличительной особенностью проведения комплексной экспедиции «Атмосфера-15» в сезоне 2015 г. было наличие обширных очагов лесных пожаров в Байкальском регионе за весь измерительный период с 30 июля по 15 августа. Лесные пожары оказывают существенное влияние на состав приземного слоя атмосферы и, как следствие, на экологическую обстановку в региональном и глобальном масштабах [7, 8]. Цель настоящей статьи – показать особенности вертикальной структуры аэрозоля в горной котловине, в которой находится Байкал, при наличии источников дымовой эмиссии, вызванных как удаленными, так и локальными, находящимися в пределах прибрежной территории озера, лесными пожарами.

1. Методы

Зондирование аэрозольных полей выполнялось многочастотным мобильным аэрозольно-рамановским лидаром «ЛОЗА-М2» на двух длинах волн излучения лазера $\lambda_1 = 1064$ нм и $\lambda_2 = 532$ нм [9]. Дополнительно к приему в аналоговом режиме упругого обратнорассеянного излучения на этих длинах волн

* Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Марина Георгиевна Клемашева, Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsergeyvlad@sibmail.com); Михаил Михайлович Новоселов, Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).

осуществлялась регистрация на смещенной длине волны $\lambda_1 = 607$ нм спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота в режиме счета фотонов.

Общая предварительная интерпретация данных зондирования производится на основе анализа вертикальных разрезов аэрозольного поля тропосферы, выраженных в единицах отношения рассеяния

$$R(\lambda_1, z) = (\beta^a(\lambda_1, z) + \beta^m(\lambda_1, z)) / \beta^m(\lambda_1, z),$$

где $\beta^a(\lambda_1, z)$, $\beta^m(\lambda_1, z)$ – коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния на длине волны $\lambda_1 = 1064$ нм. На данной длине волны зондирования наиболее контрастно выделяется интенсивность рассеяния аэрозольной составляющей атмосферы. Для периодов темного времени суток оценивается методом СКР аэрозольная оптическая толщина (АОТ) для длины волны $\lambda_2 = 532$ нм. Методы и алгоритмы восстановления оптических характеристик аэрозоля представлены в работе [10], средняя погрешность восстановлений не превышает 10%. Для исследования высотного изменения спектрального хода оптических свойств аэрозоля, по аналогии с классической формулой степенного закона Ангстрема (Angström) для АОТ [11], мы будем рассматривать параметр Ангстрема η_β для коэффициентов обратного рассеяния аэрозолем:

$$\eta_\beta(\lambda_1, \lambda_2, z) = \ln[\beta_\pi(\lambda_1, z) / \beta_\pi(\lambda_2, z)] / \ln[\lambda_2 / \lambda_1].$$

Модельные расчеты, выполненные на основе теории Ми в работе [12], показали, что параметр η_β информативен относительно эффективного радиуса аэрозольных частиц и слабо зависит от их объемной концентрации. Следует отметить, что, хотя параметр Ангстрема для коэффициента обратного рассеяния эквивалентен параметру Ангстрема для ослабления, в большинстве случаев они не равны.

2. Результаты

Пример результатов зондирования атмосферы показан на рис. 1 (цв. вкладка). Он представлен фрагментом пространственно-временного разреза аэрозольного поля в единицах отношения рассеяния R (1064 нм) (цветовая шкала), полученным в условиях «чистой» (слабо замутненной) атмосферы 2 августа 2015 г. с 04:00 до 16:00 местного времени.

Как показал анализ высотных синоптических карт (выставляемых на веб-сайте <http://www.aagi.ru>), такое состояние было обусловлено циклоном, который прошел над Байкальским регионом в направлении с севера-запада на юго-восток с 1 на 2 августа. Он привнес в регион чистые арктические массы воздуха в средние слои свободной тропосферы, а нижние слои атмосферы (пограничный слой) были очищены дождем, выпавшим в ночь на 2 августа из облачности, образовавшейся в его тылу. Для летних условий типичное строение атмосферы представляет собой некоторое устойчивое высотное

разделение на ряд аэрозольных слоев, что отмечалось в раннее проведенных исследованиях на Байкале [13]. На рассматриваемом фрагменте также в утренние часы выделяются основные слои аэрозоля (приземный слой до 250 м, планетарный пограничный слой (ППС) до 2500 м, слои свободной атмосферы до 4500 м), но со слабо выраженной стратификацией вследствие размывания инверсных градиентов температуры в синоптических условиях прошедшего циклона. С течением дневного прогрева отчетливо прослеживается характерный суточный ход, в результате которого приземный слой аэрозоля приподнимается и за счет турбулентного обмена перерастает во внутренний слой перемешивания (ВСП) до высот 600–800 м. К обеденному времени возрастают конвективные потоки в ППС, верхняя граница которого поднимается до 3000 м и к 14:00 на ней образуются кучевые облака хорошей погоды Su_{fw} . Оценка АОТ $\tau_{0,53}$ в пределах 5 км на длине волны 532 нм методом СКР в ближайшие часы темного времени суток дает значение $\tau_{0,53} \approx 0,10$, что соответствует средним значениям за многолетние измерения фотометрическими методами в летний сезон для фоновых условий атмосферы на Байкале $\tau_{0,53} \approx 0,11$ [14].

На панель разреза аэрозольного поля рис. 1 нанесены средние за 3 ч (с 07:00 до 10:00) профили коэффициентов обратного рассеяния β_π для двух длин волн зондирования (шкала единиц внизу) и восстановленный по ним параметр Ангстрема η_β (шкала единиц сверху). Среднее значение η_β по всей толще приведенного фрагмента аэрозольного поля составляет $1,68 \pm 0,28$, что указывает на преобладание в атмосфере очень мелкодисперсного аэрозоля, а вертикальный профиль достаточно четко выделяет различие качественного состава аэрозоля по основным выделенным слоям, несмотря на относительно гладкий ход профилей обратного рассеяния.

Первые признаки дымового аэрозоля были выявлены к 12:30 3 августа 2015 г. (рис. 2, а (цв. вкладка)). Пожар наблюдался в пределах прямой видимости на противоположном берегу Байкала в северо-западном направлении на удалении 60–70 км. Дым поднимался по прибрежному склону Приморского хребта (высота которого в среднем 1000 м) выше гор и затем распространялся над озером. К 14:00–15:00 интенсивность и площадь очагов горения леса увеличились. Анализ обратных траекторий переноса воздушных масс по модели HYSPLIT [15] показал, что они проходили над районом пожаров и доставлялись к месту проведения зондирования за 2–3 ч в зависимости от высотных эшелонов ППС.

На рис. 2, б представлен фрагмент пространственно-временного разреза аэрозольного поля с 16:30 до 20:00 местного времени 3 августа 2015 г. Следует отметить, что на рис. 2 шкала цветности единиц отношения рассеяния R (1064 нм) подобна рис. 1, но абсолютные значения R в 2 раза выше. Данный фрагмент интересен тем, что, как показал анализ синоптических карт высотного (500 мб)

и приземного давления, на тот период времени происходила смена барического поля. На Байкал с юго-запада заходил гребень азиатского антициклона, вследствие этого происходило изменение направления и скорости ветра на разных эшелонах высоты и перестройка на них метеорологических полей. И в первую очередь это проявилось в ППС, где (как видно из рис. 2 с 16:30 до 18:30) дымовой шлейф представлял собой неоднородную структуру в виде ряда тонких аэрозольных слоев, в которых интенсивность обратного рассеяния на порядок превышала фоновое значение.

К 20:00 сформировался устойчивый пограничный слой с практически однородным заполнением дымовым аэрозолем внутри него и с образованием облачности на его верхней границе на высоте ~2500 м. Для оценки неискаженных средних вертикальных профилей оптических характеристик аэрозоля в рассматриваемом фрагменте был выбран интервал времени измерений (~с 17:20 до 18:40) в отсутствие облачности на всех высотных ярусах. Результаты восстановления представлены на рис. 3, а (цв. вкладка). Так же, как и в рассмотренном выше случае для «чистой» атмосферы, отмечаем, что градиентное изменение в вертикальном ходе параметра Ангстрема для обратного рассеяния η_{β} происходит по границам основных аэрозольных слоев. Это указывает на однородность качественного состава аэрозоля по слоям, несмотря на значительные флуктуации коэффициентов обратного рассеяния внутри них, которые вызваны в таком случае флуктуациями объемной концентрации аэрозоля. Средние значения составляют η_{β} : во внутреннем слое перемешивания (250–750 м) — $0,94 \pm 0,02$; в основном пограничном слое (750–2600 м) — $1,09 \pm 0,04$; в слое свободной атмосферы (3500–5000 м) — $1,72 \pm 0,11$.

Верхняя граница ППС размыта, вследствие перестройки барического поля на тот период времени, и так называемый в таких атмосферных условиях слой вовлечения простирается от ~2750 до ~3500 м. В нем происходит плавное изменение качественного состава аэрозоля от грубодисперсного на нижних до мелкодисперсного на верхних эшелонах высоты. В верхней части (150–250 м) приземного слоя минимальные значения $\eta_{\beta} = 0,76$, что сопоставимо со значениями параметра Ангстрема для обратного рассеяния ($\eta_{\beta} = 0,71$) в небольшом облаке на высоте 2700–2740 м. Это говорит о наличии в приземном слое очень крупных частиц малой концентрации ($R \leq 2$), присутствие которых можно объяснить оседанием конгломератов дымового аэрозоля из шлейфа от ближних пожаров.

В последующие дни измерительной кампании присутствие дымового аэрозоля в атмосфере увеличилось до смогового состояния. Причиной этого было возросшее количество очагов лесных пожаров в прибрежных районах Южного и Среднего Байкала. Синоптическая обстановка определялась влиянием азиатского антициклона, вследствие этого в регионе установилось малоградиентное поле по-

вышенного давления, что приводило к накоплению дымового аэрозоля в ППС, а особенности внутрикотловинной циркуляции воздуха [16] способствовали его распространению по всей акватории озера. Как показал анализ прогностических карт распределения аэрозоля по данным глобальной аэрозольной модели Navy Aerosol Analysis and Prediction System (NAAPS) [17] в Восточноазиатском регионе, основной вклад в оптическую толщину атмосферы над Байкалом вносил дымовой аэрозоль. При этом его массовая концентрация в отдельные дни в сотни раз превышала фоновое содержание.

Результат зондирования вертикальной структуры аэрозольного поля в таких атмосферных условиях представлен на рис. 3, б с 7:00 до 10:00 местного времени 14 августа 2015 г. На фрагмент восстановленного разреза в единицах отношения рассеяния R (1064 нм) наложены средние за этот период профили коэффициентов обратного рассеяния β_{π} (532), β_{π} (1064) и параметр Ангстрема η_{β} (532/1064). В условиях слабой стратификации, исключая утреннюю температурную инверсию на высотах до ≤ 1000 м, заполнение дымовым аэрозолем произошло во всей нижней тропосфере вплоть до 5 км со средним значением $\eta_{\beta} = 1,16 \pm 0,12$. Это указывает на содержание во всей толще более грубодисперсного аэрозоля, чем в фоновых условиях. Высотный ход параметра Ангстрема отчетливо отражает изменение дисперсной размерности аэрозоля по слоям, внутри которых он однороден (относительный разброс не превышает 5%). Наиболее крупные частицы находятся в ВСП (150–750 м) со значениями $\eta_{\beta} = 0,97 \pm 0,03$. Траекторный анализ показал, что перенос воздушных масс на этих высотах осуществлялся из прибрежных районов юго-западного направления, где в прошедшие дни наблюдались локальные очаги пожаров леса.

К 10:00 верхняя граница ВСП повышается до 1000 м и происходит уменьшение размерности аэрозоля к слою (1000–2200 м) до значений $\eta_{\beta} = 1,28 \pm 0,04$ в нем. Примерно те же значения параметра Ангстрема $\eta_{\beta} = 1,26 \pm 0,05$ в верхних слоях на высотах 3800–5000 м, направление переноса в них северо-западное. Средний слой на высотах 2500–3700 м имеет повышенную фракцию грубодисперсного аэрозоля ($\eta_{\beta} = 1,05 \pm 0,01$) по отношению к ниже- и вышележащим слоям. На этих высотах направление переноса было западное и воздушные массы проходили большую часть своего пути над акваторией озера. Относительная влажность в них составляла 70–80% (анализ данных высотного зондирования на ближайших станциях высотного зондирования Ангарск и Усть-Баргузин с сайта университета Wyoming — <http://www.weather.uwyo.edu/sounding>), что почти в 2 раза превышало влажность в ниже- и вышерасположенных слоях с других направлений. Это приводило к конденсационному росту размеров аэрозолей внутри них. Высокая степень корреляции содержания водяного пара и аэрозоля по слоям отмечалась в работе [18].

Заключение

В качестве примера удаленного источника дыма рассмотрена ситуация лета 2013 г. на побережье оз. Байкал с повышенным содержанием аэрозоля в тропосфере в результате заноса дымового аэрозоля от масштабных пожаров лесотундры в Якутии в июле–августе. Анализ прогностических карт распределения аэрозоля по данным глобальной аэрозольной модели NAAPS показал, что дымовой аэрозоль в этот период времени был распространен на большей части Восточной и Западной Сибири в основном по северным районам. К утру 7 августа 2013 г. под воздействием невысокого северного циклона массы воздуха, содержащие максимальные концентрации дымового аэрозоля, достигли южного побережья Байкала. Они были доставлены из районов пожаров, как показал траекторный анализ по модели HYSPLIT, за 4–5 дней преодолев расстояние в ~1500–2000 км. На рис. 3, в показан фрагмент разреза аэрозольного поля тропосферы в единицах отношения рассеяния, восстановленного по результатам зондирования с 00:00 до 03:00 7 августа 2013 г. Основное содержание дымового аэрозоля равномерно распределено в пределах ППС до высоты его верхней границы ~2200 м с высокой концентрацией, на что указывают большие значения отношения рассеяния $R \approx 20–30$ и оптической толщи по этому слою $AOT = 0,64$. На однородность состава указывает параметр Ангстрема для обратного рассеяния, который на всех высотах от приземного до верхней границы ППС имеет стабильный вертикальный ход со значением $\eta_{\beta} = 1,39 \pm 0,05$, что характерно для тонкодисперсной субмикронной размерности аэрозоля. При приближении к верхней границе ППС происходит перестройка размерности в сторону более мелкодисперсной фракции и на самой границе с примыкающими слоями среднее значение на высотах 2000–2800 м $\eta_{\beta} = 1,58 \pm 0,09$. В свободной атмосфере на высотах 2800–4500 м значения параметра Ангстрема меньше — $\eta_{\beta} = 1,33 \pm 0,10$, что при малых значениях $R \leq 2$ может быть следствием остаточных следов облачности, присутствующих на этих высотах в предшествующие часы.

В таблице сведены средние значения параметра Ангстрема для обратного рассеяния и аэрозольной оптической толщи в ППС, восстановленные из лидарных измерений в различных атмосферных условиях.

Рассмотренные выше атмосферные условия определялись наличием дымовых аэрозолей от очагов лесных пожаров различного удаления и временем переноса к месту измерений, а также синоптической обстановкой. Проведенное временное усреднение в течение 2–3 ч дает достаточно репрезентативную оценку оптических характеристик аэрозоля для конкретной атмосферной ситуации. В рассмотренной ситуации «дальнего переноса дыма» от 7 августа 2013 г. значение параметра Ангстрема перекрывается в пределах стандартного отклонения со значением параметра для «чистой атмосферы» от 2 августа 2015 г., что указывает на однотипность дисперсного состава аэрозоля, хотя значения АОТ отличаются в разы (~7 раз). В распределении аэрозольных частиц по размерам в этих атмосферных ситуациях преобладает мелкодисперсная фракция, с той лишь разницей, что в случае дальнего переноса дымового аэрозоля она более тонкодисперсная и смещена в сторону больших размеров.

Дисперсное распределение размеров аэрозоля дымовой эмиссии от лесных пожаров на прибрежной территории оз. Байкал для двух атмосферных ситуаций «ближнего переноса дыма» от 3 августа и «длительного переноса дыма» от 14 августа 2015 г. практически не различается. Это следует из того, что параметры Ангстрема, восстановленные из измерений в этих условиях, совпадают в своих медианных значениях —1,092 для 03.08.2015 г. и 1,094 для 14.08.2015 г. при равных стандартных отклонениях по толще пограничного слоя. Сами значения указывают на содержание в спектре размеров дымового аэрозоля грубодисперсной фракции. Вертикальный ход профиля параметра Ангстрема в этих ситуациях имеет схожую тенденцию (описанную выше отдельно для каждой атмосферной ситуации). Происходит послойное уменьшение размерности аэрозоля от приземного слоя, где определяются наиболее крупные частицы, до более мелких в слоях свободной атмосферы. Это выполняется, несмотря на контрастно различающуюся плотность заполнения по слоям, что видно по разрезу аэрозольного поля, представленного в количественной характеристике единиц отношения рассеяния на рис. 3, а, б. Для случая «ближнего переноса

Средние значения параметра Ангстрема для обратного рассеяния и АОТ в планетарном пограничном слое в различных атмосферных условиях измерений

Дата и «атмосферные условия измерений»	Диапазон высот ППС, м	Параметр Ангстрема η_{β}	АОТ
02.08.2015 — «чистая атмосфера»	150–2400	$1,54 \pm 0,14$	0,09
03.08.2015 — «ближний перенос дыма»	150–3500	$1,09 \pm 0,11$	0,25
14.08.2015 — «длительный перенос дыма»	150–3750	$1,13 \pm 0,12$	0,26
07.08.2013 — «дальний перенос дыма»	150–2250	$1,41 \pm 0,07$	0,64

дыма» (рис. 3, а) имеем разорванную шлейфовую структуру в основном слое ППС и слабое заполнение в ВСП ($R \leq 3$). По истечению 10-дневного присутствия дымов от лесных пожаров в атмосфере Байкальского региона для ситуации «длительного переноса дыма» (рис. 3, б) имеем однородное заполнение аэрозолями по всей толще ППС и максимальное его содержание в ВСП ($R \geq 30$).

Подобие вертикальных профилей параметра Ангстрема и схожесть дисперсионного состава аэрозоля в различных атмосферных условиях в августе 2015 г. определяются единой морфологической природой происхождения дымовой аэрозольной эмиссии от горения хвойных лесов на побережье Байкала, в отличие от оптических характеристик дымового аэрозоля при горении лесотундры в регионе Якутии в августе 2013 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в части теоретических исследований (соглашение № 14-27-00022) и гранта РФФИ в части экспериментальных исследований (№ 14-05-92003_ННС-а).

1. Куценогий К.П., Потемкин В.Л., Куценогий П.К., Смирнова А.И. Влияние аэрозолей на спектральную оптическую плотность атмосферы на юге оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 7. С. 872–879.
2. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С. Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 463–472.
3. Балин Ю.С., Ершов 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.
4. Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 2. Поперечные разрезы // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 7. С. 587–597.
5. Балин Ю.С., Ершов 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.
6. Буфал В.В. Радиационный режим котловины оз. Байкал и его роль в формировании климата // Климат озера Байкал и Прибайкалья. М.: Наука, 1966. С. 34–70.
7. Самсонов Ю.Н., Беленко О.А., Иванов В.А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 423–431; Samsonov Yu.N., Belenko O.A., Ivanov V.A. Dispersal and morphological characteristics

of smoke particulate emission from fires in the boreal forests of Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 485–493.

8. Исаков А.А., Аникин П.П., Елохов А.С., Курбатов Г.А. О характеристиках дымов лесных и торфяных пожаров в Центральной России летом 2010 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 478–482.
9. 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.
10. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э. Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 1. Методы восстановления оптических параметров // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 344–357; Samoilova S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E. Investigations of the vertical distribution of troposphere aerosol layers based on the data of multifrequency raman lidar sensing. Part I. Method of optical parameter retrieval // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 302–315.
11. Ångström A. Circumsolar radiation as a measure of the turbidity of the atmosphere. Part 2 // Appl. Opt. 1974. V. 13, N 6. P. 1477–1480.
12. Самойлова С.В. Спектральное поведение оптических коэффициентов и микрофизические характеристики аэрозольных частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 114–118; Samoilova S.V. Spectral behavior of optical coefficients and microphysical characteristics of aerosol particles // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 4. P. 362–368.
13. Балин Ю.С., Ершов А.Д. Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы в котловине оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 633–638.
14. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагусланов С.А., Цыдыпов В.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Таццлин М.А. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 466–470.
15. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2015.
16. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М. Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14, № 4. С. 290–293.
17. Naval Research Laboratory [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol>.
18. Пеннер И.Э., Балин Ю.С., Макарова М.В., Аршинов М.Ю., Воронин Б.А., Белан Б.Д., Васильченко С.С., Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Половцева Е.Р., Кабанов Д.М., Коханенко Г.П. Измерения содержания водяного пара различными методами. Сравнения профилей водяного пара и аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 728–738.

Yu.S. Balin, M.G. Klemasheva, G.P. Kokhanenko, S.V. Nasonov, M.M. Novoselov, I.E. Penner. Lidar study of the vertical structure of aerosol fields in the atmosphere over Lake Baikal during forest fires.

The paper presents the results of investigation of temporary changes in the vertical structure of aerosol fields in the mountain valley of Lake Baikal, in the presence of sources of smoke, from both remote and local forest fires. Measurements were carried out using the LOSA-M2 lidar, located on the east coast of Lake Baikal, during the expeditions of 2013 and 2015, when extremely high values of aerosol content in the troposphere caused by forest fires were observed. There is a significant difference between the space-time structures of the smoke aerosol from local forest fires in the basin of the lake, from the case when the impurity sources are located at a considerable distance.

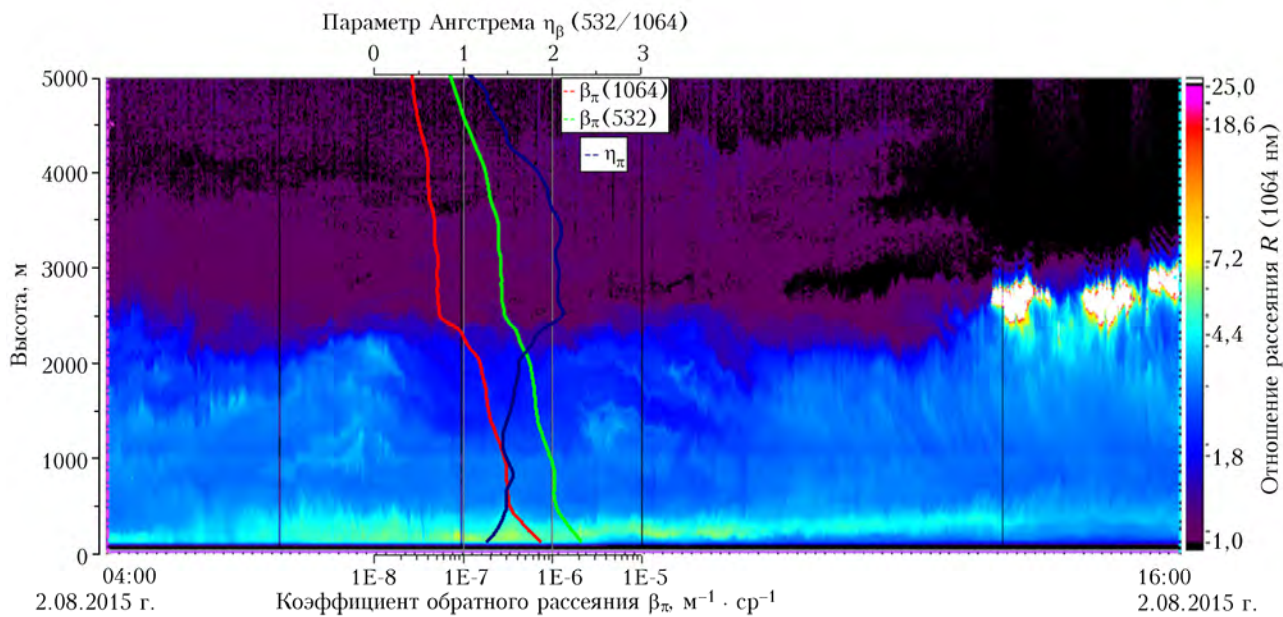


Рис. 1. Пространственно-временная структура аэрозольного поля в единицах отношения рассеяния на $\lambda_1 = 1064$ нм, полученная 2 августа 2015 г. на ст. Боярский; в центре профили коэффициентов обратного рассеяния β_π для двух длин волн зондирования (шкала единиц внизу) и параметра Ангрстрема η_β (шкала единиц сверху)

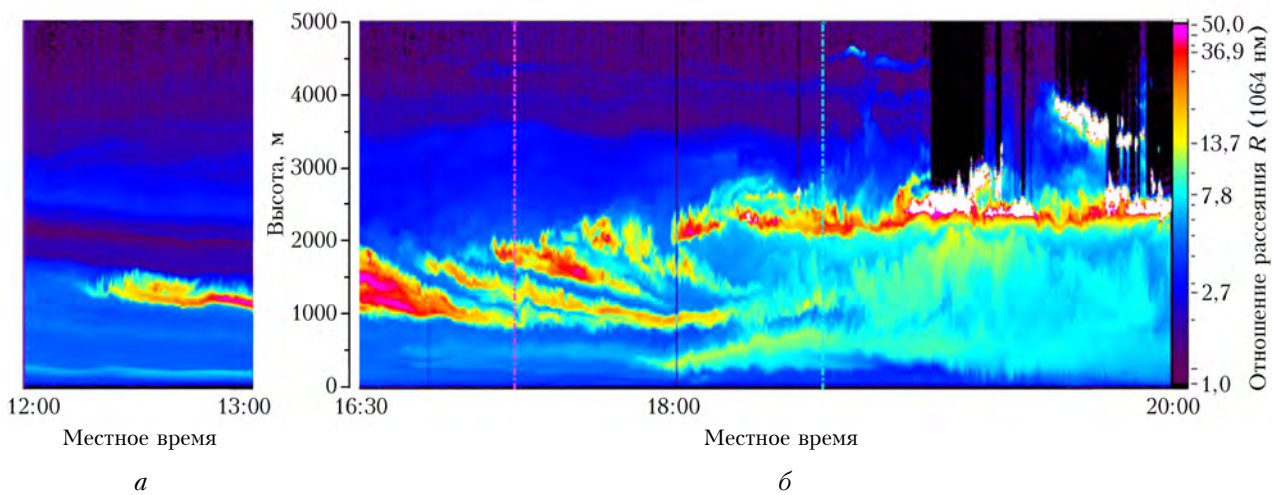


Рис. 2. Пространственно-временная структура аэрозольного поля в единицах отношения рассеяния на $\lambda_1 = 1064$ нм, полученная 3 августа 2015 г. на ст. Боярский

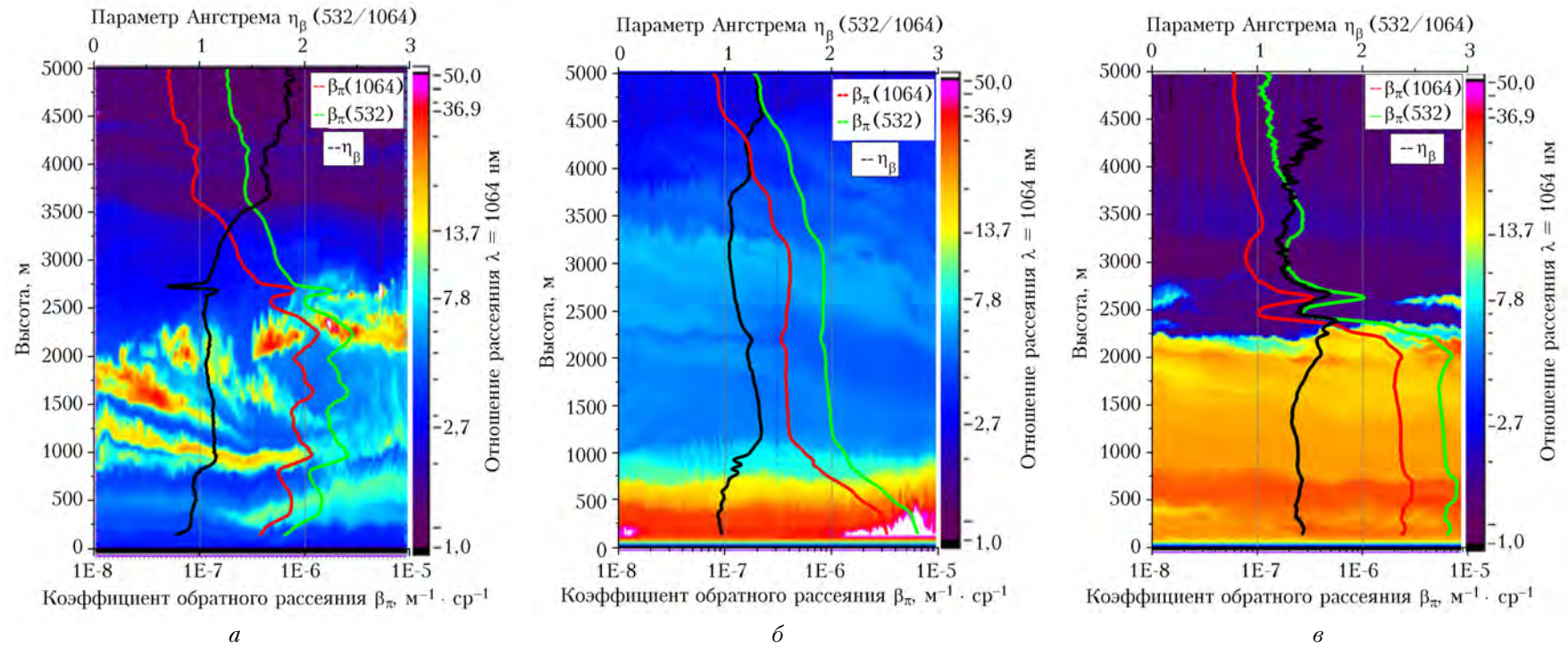


Рис. 3. Пространственно-временная структура аэрозольного поля, полученная на ст. Боярский: *a* – 3 августа 2015 г.; *б* – 14 августа 2015 г.; *в* – 7 августа 2013 г.