

Ю.С. Балин, А.Д. Ершов, И.Э. Пеннер

Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал. Часть 1. Продольные разрезы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 10.12.2002 г.

Приводятся результаты лидарных исследований высотной структуры аэрозольных полей на основе массива данных, полученных в период корабельной экспедиции на оз. Байкал в июле – августе 2002 г. Анализ продольных и поперечных аэрозольных разрезов позволил выявить существенное влияние на формирование структуры поля орографических особенностей местности.

Проведен корреляционный анализ высотного распределения оптической толщи вдоль маршрута следования корабля с пространственным профилем вершин Приморского хребта.

Обнаружено, что наибольшая корреляция наблюдается в нижнем слое атмосферы $0,5 \pm 1,5$ км.

Байкал – уникальное природное образование нашей планеты, включенное ЮНЕСКО в реестр объектов мирового природного наследия, поэтому понятно то внимание, которое уделяется научным сообществом изучению изменений окружающей среды в его акватории. В последние годы особый акцент придается атмосферным исследованиям пространственно-временной структуры аэрозольно-газовых полей, а также трансграничному переносу примесей, поскольку один из источников антропогенного воздействия на озеро – атмосферный канал.

К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных теоретическому моделированию процессов распространения, трансформации и осаждения примесей в регионе оз. Байкал [1–7], а также экспериментальному изучению концентрации атмосферных примесей в различных точках акватории [8–12]. Применительно к оз. Байкал моделирование процессов переноса и трансформации загрязняющих примесей осуществляется как на мезорегиональном масштабе, так и на масштабе данного региона, с учетом интенсивности и местоположения местных и удаленных до 70 км от береговой линии промышленных предприятий [1–5]. Конечной целью подобных теоретических исследований, как справедливо отмечается в [1], «должно стать создание адекватных математических моделей формирования полей концентрации атмосферных примесей» с учетом конкретных физико-географических условий. Необходимым этапом достижения этой цели по прогнозу состояния воздушного бассейна котловины озера является этап верификации моделей на основе данных экспериментальных наблюдений.

Инструментальные исследования физико-химического состава байкальского аэрозоля путем отбора проб ведутся довольно давно как на стационарных пунктах, так и на научно-исследовательском судне [8–16]. Использование последнего позволило

осуществить аэрозольную съемку практически по всей акватории озера и сопоставить результаты полевых измерений с расчетами усредненных полей концентраций окислов серы и азота, сульфатов и нитратов на основе трехмерной модели [2].

По мнению авторов [2], сопоставление показало удовлетворительное согласие результатов теоретических и экспериментальных исследований. Но сравнение проводилось только по данным анализа аэрозольных и газовых примесей приземного слоя. Публикации по исследованиям вертикальной структуры примесей акватории малочисленны. К ним можно отнести первые наземные лидарные измерения на Байкале [14], благодаря которым был обнаружен суточный ход высотного распределения коэффициента рассеяния и соответствующих автокорреляционных матриц.

Полученные данные позволили сделать оценки вертикальной протяженности ветровых ячеек циркуляции при условии, что аэрозоль – это трассер. Попытки получения двумерной картины (вертикаль-горизонт) распределения примесей по акватории были сделаны в [11, 12] путем установки локальных датчиков на самолет. Но вследствие специфики самих измерений наблюдения были проведены только на высотах 400 и 900 м в дневное время. Исходя из изложенного, вполне понятно, что для полноценной верификации моделей вертикальной структуры аэрозольных полей необходимы эмпирические высотные данные по акватории, в полной мере отражающие как минимум два фактора.

Первый – пространственный, учитывающий орографию местности. В горных районах при натекании воздушных потоков на горный хребет возникают подветренные волны, создающие восходящие и нисходящие движения воздуха [15, 16], которые влияют на формирование структуры аэрозольного поля.

Второй фактор обусловлен величиной временного интервала получения единичного измерения атмосферного параметра. Например, при исследованиях химического состава аэрозольных примесей методом их осаждения на фильтры время экспозиции составляет 10–12 ч [1, 8]. Поэтому рассматриваться могут только некие средние характеристики. При измерениях в стационарных условиях – это среднесуточные значения концентрации. При установке аппаратуры на борт судна и измерениях во время движения – это значение концентрации, пространственно осредненное для некоторого района. В [1, 8], например, выделены три участка озера: северная, средняя и южная котловины. При этом, естественно, нужно учитывать синоптическую обстановку, поскольку за такой длительный промежуток времени может измениться как направление ветра, так и в целом тип воздушной массы.

От временных ограничений в этом смысле свободны оптические измерения, которые в каждой точке пространства позволяют получить мгновенную информацию о состоянии атмосферы.

Для получения двухмерных пространственных разрезов аэрозольных полей в июле–августе 2002 г. была проведена комплексная экспедиция «Байкал-02», в которой аэрозольный одночастотный лидар «ЛОЗА-М» [18] был установлен на НИС «Г. Титов» Лимнологического института СО РАН. Зондирование проводилось в основном в районах Среднего и Южного Байкала для получения продольных (вдоль береговой линии) и поперечных (от берега к берегу) разрезов. Организация подобного эксперимента позволяет решить две крупные задачи.

Первая заключается в сопоставлении профилей коэффициентов рассеяния и их статистических характеристик в разных частях Байкала с аналогичными данными, полученными ранее в стационарных условиях [14]. Вторая – в исследовании влияния рельефа местности на особенности формирования вертикальной структуры аэрозольного поля, что является наиболее важным для верификации моделей.

В настоящей статье приводятся первые результаты обработки данных зондирования только двух дней корабельной экспедиции – 31.07 и 01.08.2002 г. Условно маршрут судна этих дней можно разбить на ряд отрезков, охватывающих различные по своим орографическим признакам участки озера (рис. 1).

Первый участок – продольный разрез, полученный в дневное время с 11:00 до 17:00 в районе Малого моря 31 июля. Ограниченный с одной стороны о. Ольхон, а с другой – Приморским хребтом участок этого маршрута характеризуется наиболее сложной орографией местности с высокогорной частью хребта материка.

Второй участок также представляет собой продольный разрез, наиболее протяженный по дистанции и продолжительный по времени из всех реализованных в период экспедиции, чем, собственно, и был обусловлен выбор данного маршрута для обработки в первую очередь. Маршрут начинается с выхода из Малого моря через пролив Ольхонские ворота, затем проходит вдоль береговой линии и заканчивается в средней части Байкала напротив пос. Большая Голоустная, охватывая по времени вечерний и ночной периоды суток с 18:30 31 июля до 03:20 1 августа.

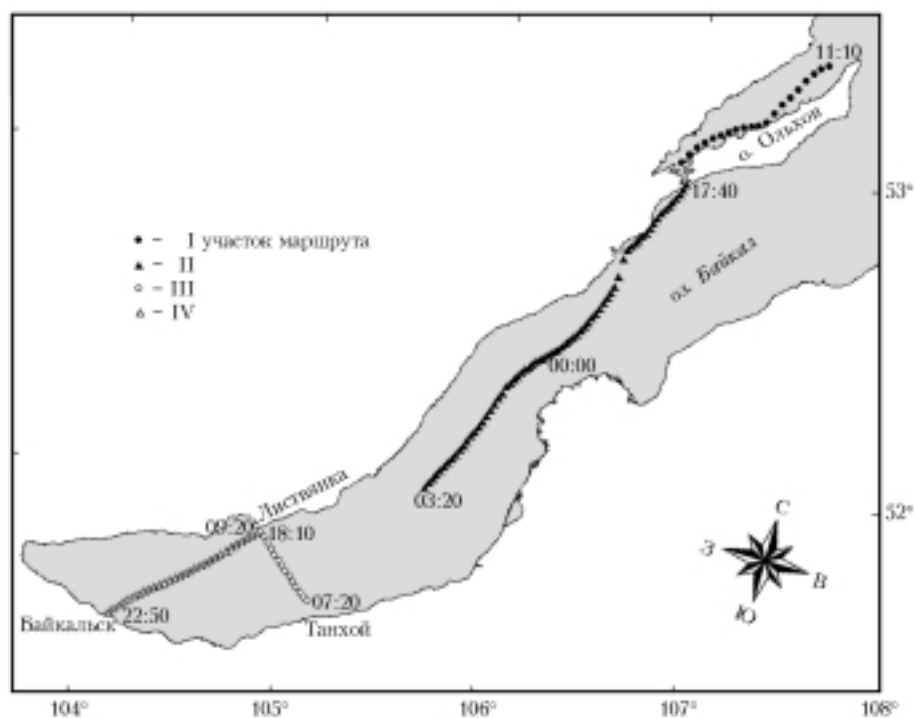


Рис. 1. Схема маршрута следования НИС «Г. Титов» за 31 июля – 1 августа 2002 г. Отдельные участки маршрута выделены различными графическими символами

При планировании третьего участка маршрута ставилась задача изучения вертикальных разрезов пограничного слоя Южного Байкала в поперечном направлении вдоль долины р. Ангары при северо-западном переносе воздушных масс из Иркутска. Поперечное сечение выполнено в направлении гг. Танхой—Листвянка в утренние часы 1 августа.

Последний, четвертый, разрез этого дня реализован в вечерние часы в наиболее загрязненной части воздушного бассейна Южного Байкала по линии Листвянка—Байкальск.

Общая синоптическая ситуация складывалась достаточно благоприятно для выделенных дней с точки зрения стабильного по времени северо-западного переноса воздушных масс. В ночь с 30 по 31 июля циклон, перемещающийся на север в Восточной Сибири, накрыл своей южной периферией весь регион. На большей части акватории Среднего Байкала прошли дожди, очистив атмосферу, тем самым обеспечив дополнительный контраст высотной структуры переносимого аэрозоля.

При выполнении I маршрута на всех высотах направление ветра примерно сохраняло свое значение с увеличением модуля от 5 м/с в приземном слое до 10 м/с на высотах 1,5–3 км.

Во II маршруте синоптическая обстановка практически не изменялась вплоть до 4 ч 1 августа, когда наблюдалось некоторое повышение скорости по высоте. В эту же ситуацию попадает III маршрут. Последний, IV маршрут характеризуется сменой воздушных масс (умеренная арктическая) и аномальным распределением модуля скорости по высоте, когда в приземном слое значение достигает 15 м/с, а на верхней границе 5 м/с.

Рассмотрим результаты, полученные в рамках решения первой задачи. На рис. 2 представлены выборочные профили коэффициентов рассеяния σ на выделенных маршрутах движения. В целом все профили имеют схожий характер, кроме зависимостей профилей $\sigma(H)$ I маршрута, относящихся к району Малого моря. Анализ всех данных I маршрута, в том числе и приведенных на рис. 2, а, показывает, что имеют место очень широкие колебания значений профиля $\sigma(H)$ по высоте как в нижних, так и в верхних слоях атмосферы. Очевидно, это связано именно со спецификой района измерений, поскольку в остальных случаях (рис. 2, б–г) дисперсия колебаний не столь значительна. Обращает на себя внимание то, что на всех профилях рис. 2 наблюдается аномальный ход $\sigma(H)$, так как примерно до высоты 1 км коэффициент рассеяния возрастает. Подобное распределение примесей в нижних слоях было отмечено ранее как в лидарных измерениях [14], так и по данным прямого забора проб при самолетных обследованиях, в том числе при сопоставлении последних результатов судовых наблюдений газовых и аэрозольных компонент атмосферы в приземном слое [11].

Для количественной оценки взаимосвязей оптических параметров на обследуемых высотах были рассчитаны, как это сделано в [14], статистические характеристики $\sigma(H)$ в виде высотных нормирован-

ных автокорреляционных матриц $R(H)$, отнесенных к выделенным типам маршрутов. Матрицы рассчитаны с вертикальным разрешением 30 м.

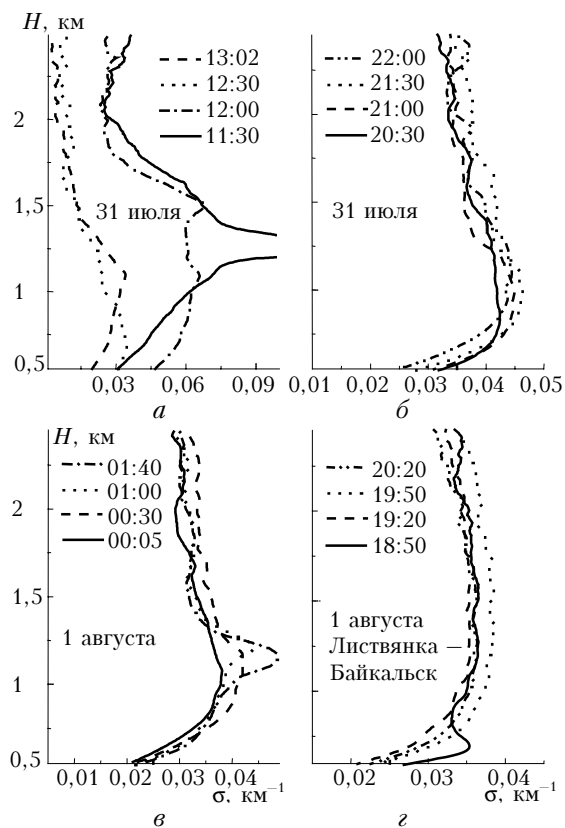


Рис. 2. Профили коэффициента рассеяния на выделенных участках маршрута движения: а — I участок; б, в — II; г — IV

Характер поведения высотного хода автокорреляционных матриц в зависимости от района измерений, т.е. номера маршрута, показан на рис. 3. Здесь же приведено количество профилей, на основании которых были рассчитаны матрицы. Поскольку вид матриц может в значительной степени определяться орографическими условиями района измерений независимо от времени суток, следует обратиться к анализу закономерностей, которые были получены ранее на Байкале в стационарных условиях [14]. Тогда были выбраны четыре временных интервала, характеризующих процессы трансформации профилей в различные часы: утренний (05÷10 ч), дневной (11÷17 ч), вечерний (18÷22 ч) и ночной (23÷04 ч).

Для этих интервалов матрицы имеют совершенно отличный друг от друга характер в различное время суток. Отличия проявляются прежде всего при сопоставлении данных, полученных в ночные и утренние часы по отношению к остальным периодам, в которых автокорреляционные функции монотонно убывают по высоте.

Графики для ночного и утреннего интервалов показали наличие четкой зависимости между изменениями коэффициентов рассеяния на верхней (1400–1500 м) и нижней (300 м) границах, в то время как взаимосвязь $\sigma(H)$ между нижней границей

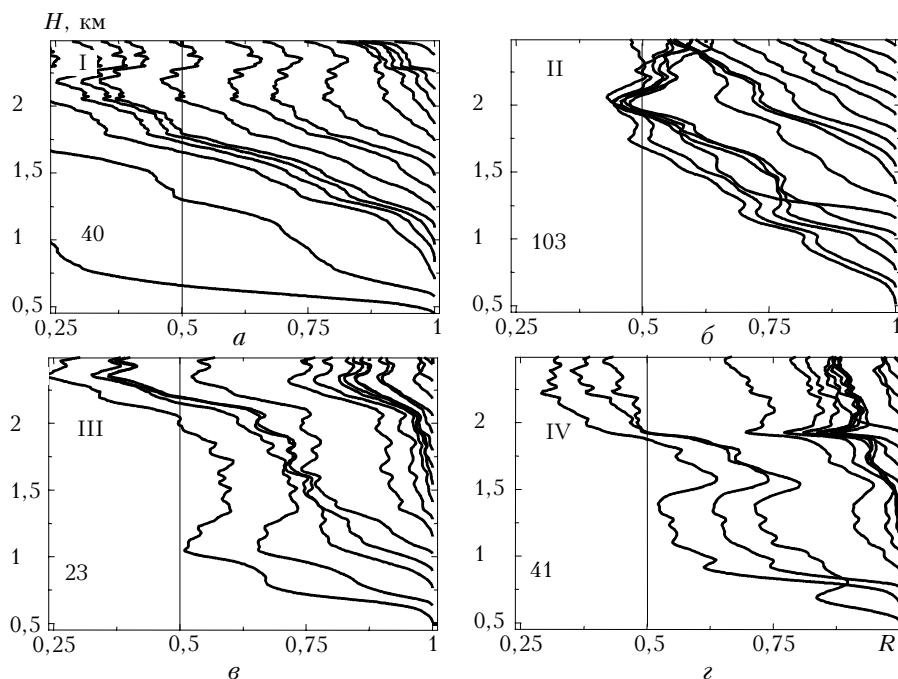


Рис. 3. Автокорреляционные матрицы высотного хода коэффициента рассеяния на выделенных участках маршрута движения

и последующими высотами незначительна. Это свидетельствует о едином механизме формирования высотной структуры $\sigma(H)$, обусловленном спецификой циркуляции потоков атмосферы озера [13, 17]. В дневные и вечерние часы процессы турбулентного обмена приводят к более равномерным устойчивым связям между отклонениями $\sigma(H)$ на всех высотах. Представленные для этих временных интервалов матрицы имеют сходный характер с полученными ранее для континентальных условий [19] и в целом определяют поведение обобщенной автокорреляционной матрицы для всего периода суток. Интересны диапазоны высот, где наблюдается сгущение всех кривых высотных зависимостей $R(H)$, а ниже значения коэффициента рассеяния хорошо коррелированы между собой ($R \geq 0,5$). По этому признаку [20] предложено определять высоту основного слоя перемешивания. В нашем случае это скорее высота слоя коррелированности параметров [19], которая для дневных условий составляет 1800 м, для вечерних 1500 м.

В корабельных измерениях в чистом виде суточный ход выявить затруднительно, поскольку дополнительным фактором, влияющим на высотную структуру аэрозольного поля, является сложная орография местности, что наглядно будет показано в дальнейшем. Из рис. 3 видно, что матрицы имеют различный характер в зависимости от района проведения измерений. Как и предполагалось, даже из анализа первичных профилей $\sigma(H)$ на рис. 2 наименьшую взаимосвязь между высотами следовало ожидать в районе Малого моря (I участка маршрута). Это подтверждает и высотный ход автокорреляционной матрицы, когда значения коэффициента взаимной корреляции на высоте 1 км падают до величины менее 0,25 (рис. 3,а). В даль-

нейших маршрутах (рис. 3,б–г) эти значения всегда превышают граничную величину 0,5, но высотный характер поведения матриц различный.

Для наиболее длительного по времени II маршрута вдоль береговой линии наблюдается монотонное убывание корреляции вплоть до высоты 2 км. Для опорных точек нижнего 1-км слоя корреляция имеет тенденцию к возрастанию в диапазоне высот 2,0÷2,5 км. Это свидетельствует о том, что основной поток на этих высотах оказывает влияние именно на нижние слои, способствуя накоплению аэрозоля.

Последующие участки маршрута (III и IV) соответствовали поперечным разрезам по маршрутам Танхой–Листвянка, Листвянка–Байкальск. Здесь выявлена аналогичная картина, но возрастание корреляционных функций наблюдается в более низком высотном диапазоне (1÷2 км), что, вероятно, объясняется понижением рельефа горного хребта этой части Байкала.

Как следует из представленных материалов, существенное влияние на структуру аэрозольного поля оказывает орография исследуемого района оз. Байкал. Рассмотрим эту задачу более подробно, сопоставляя высотные профили оптических параметров по маршруту следования корабля с соответствующим профилем рельефа хребтов береговой линии.

В течение указанных дней во время движения проводилось практически непрерывное (за исключением неблагоприятных погодных условий: низкая облачность, осадки, сильный штормовой ветер) вертикальное зондирование атмосферы. Запись эхосигналов лидара, работающего с частотой посылок зондирующих импульсов 5 Гц, производилась в виде одномоментных сеансов через каждые 5 мин. Сеанс зондирования оформлялся в файл данных

с временной привязкой, а затем посредством мобильной системы GPS (Global Positioning System) соотносился с пространственными координатами положения судна. Обработка сигналов и восстановление профилей коэффициентов рассеяния проводились для каждого выстрела в соответствии с алгоритмами обработки для двухкомпонентной (аэрозольное и молекулярное рассеяние) среды [21] с последующим усреднением в пределах сеанса измерений. Тогда при средней скорости судна около 14 км/ч получается пространственное сечение профилей $\sigma(H)$ с вертикальным разрешением 8 м и горизонтальным $\sim 1,3$ км разрешением. Верхняя граница сечения составляла ~ 3 км, а нижняя $\sim 0,5$ км. Выбор последней обусловлен в основном геометрией лидара, определяющей динамику лидарного сигнала.

Таким образом, при зондировании регистрируются двумерные разрезы аэрозольного поля на пространственно-временных масштабах от метров (в одном сеансе) до сотен километров, а по времени — от минут до суток. Формируемый при этом массив данных позволяет исследовать атмосферные явления, связанные с переносом и циркуляцией аэрозоля в мезометеорологическом масштабе. В качестве одного из параметров, характеризующего изменения пространственной структуры аэрозольных полей, рассмотрим вариации оптической толщины τ как по всему исследуемому диапазону высот, так и в пределах некоторых выделенных слоев. Оценка на основе интегральной оптической толщины по выде-

ленным слоям позволяет получить одномерные реализации на характерных высотах.

На рис. 4 показаны реализации $\tau(t)$, полученные в трех высотных слоях при зондировании атмосферы на маршруте следования НИС «Г. Титов» за 31 июля и 1 августа. Маршрут был выполнен от середины (Малое море) до южной оконечности оз. Байкал (г. Байкальск) и охватывал на продольном разрезе дистанцию $L \approx 300$ км. Первая (в вертикальном направлении от поверхности) реализация значений τ получена в толще атмосферы от 0,5 до 1,5 км, характерной для пограничного слоя. Вторая реализация τ получена в промежуточном слое от 1,5 до 2,2 км, а третья — в диапазоне от 2,2 до 3 км. Последние высоты уже характерны для нижнего уровня свободной тропосферы, в которой флуктуации оптических характеристик воздушных масс подвержены преимущественному влиянию атмосферных процессов синоптического характера. Как видно из рис. 4, наибольшие вариации τ наблюдаются в пограничном слое, а в более верхних слоях они сопоставимы и имеют меньшую степень вариаций. Следует отметить существенную нестационарность всего процесса флуктуаций значений оптической толщины во всех диапазонах высот. Однако если выделить характерные временные масштабы (порядка 5–7 ч), в пределах которых выполняется условная стационарность, и принять во внимание факторы воздействия только атмосферных явлений, то вариации τ можно отнести на субсиноптические процессы переноса воздушных масс.

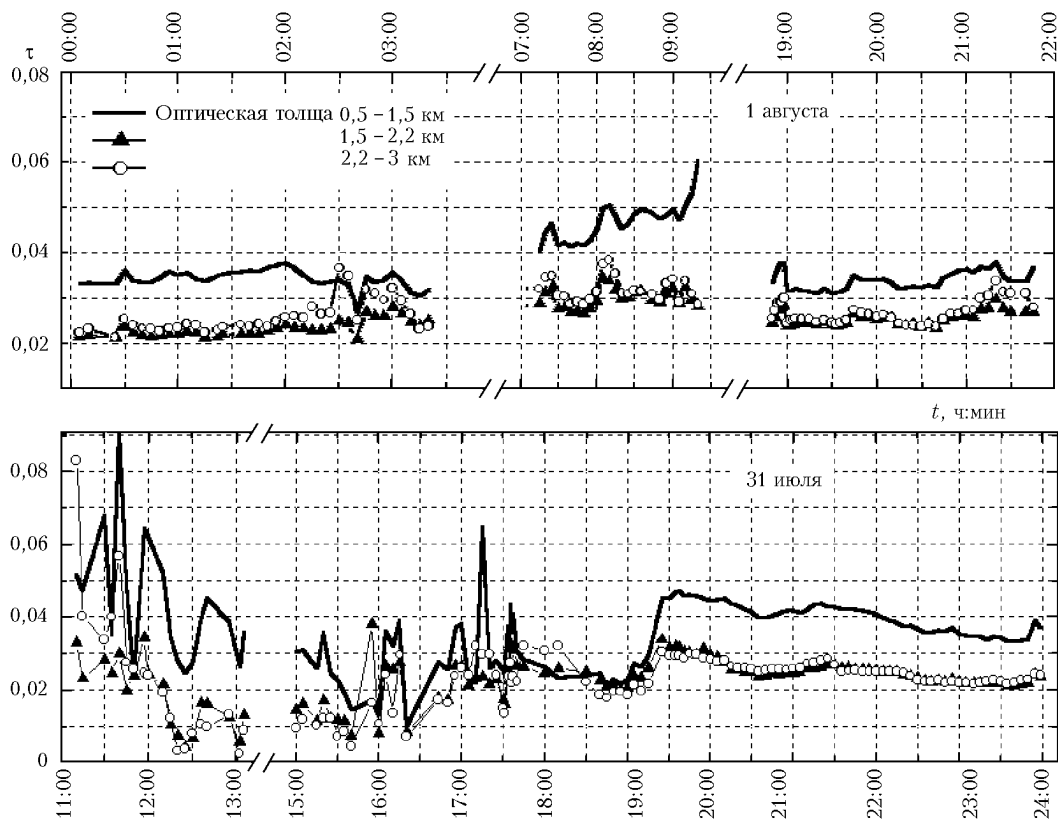


Рис. 4. Значение оптической толщины τ в трех высотных слоях атмосферы по всему маршруту следования НИС «Г. Титов»

Тем не менее в рамках поставленной задачи рассмотрим в первую очередь влияние рельефа местности на особенности формирования пространственной структуры аэрозольного поля.

В период проведения эксперимента наблюдалось преимущественно северо-западное направление скорости ветра с незначительными изменениями по высоте. Практически перпендикулярно к данному направлению оказались расположены горы Приморского хребта, как это изображено на рис. 5. Они являются самым высоким препятствием на пути воздушного потока, несущего в своей массе антропогенный аэрозоль из промышленных районов Иркутской области. В первом приближении можно предположить, что высокогорный рельеф хребта играет роль загрязняющего фильтра на пути переноса примесей в пограничном слое, поскольку максимальные высоты вершин сопоставимы с уровнем высоты пограничного слоя. Соответственно далее можно ожидать, что структура аэрозольного поля по данным лидарной съемки, произведенной на маршруте, параллельном хребту и удаленном от него не более чем на 20 км, будет пространственно промодулирована в зависимости от профиля высокогорного рельефа.

На рис. 5 показаны нанесенные на маршрут следования НИС «Г. Титов» значения оптической толщины τ пограничного слоя атмосферы в виде графического символа — кружка, соразмерного шкале, проградированной по величине τ . Высотный профиль Приморского хребта представлен в виде графического символа — треугольника, соразмерного шкале, проградированной по высоте хребта.

Изображение рельефа было получено на базе данных ГИС (геоинформационных систем) высокого пространственного разрешения с применением пакета программ трехмерного анализа. Одномерная реализация профиля создавалась методом проекции максимальных значений высот, находящихся в направлении нормали к вертикальной плоскости разреза вдоль хребта и в полосе рельефа шириной 10 км.

Из рис. 5 видна связь между высотой гор и пространственным распределением оптической толщины. Для более детальной оценки подобного влияния рассмотрим взаимную корреляцию реализации значений высот хребта и реализаций значений τ на выделенных высотах, предполагая, что они носят стохастический характер. Выполним предварительную подготовку данных реализаций для проведения корреляционного анализа. Она представляет собой стандартные процедуры статистического анализа — нахождение и удаление среднего значения, т.е. «отбеливание» стохастического процесса и нормирование его на среднюю дисперсию. Кроме того, чтобы сохранить и выявить пространственную взаимосвязь, необходимо провести начальную привязку и рассчитать последовательную проекцию пространственных точек реализаций τ по направлению нормали к одномерному разрезу высотного профиля хребта. После определения общей длины реализаций, которая составила в нашем случае порядка 200 км, разобьем все реализации на эквидистантные отсчеты методом интерполирования в пределах общего числа точек. Таким образом, получаются подготовленные реализации по 150 отсчетов, с равным минимальным пространственным шагом 1,33 км, что дает полную длину реализации 200 км.

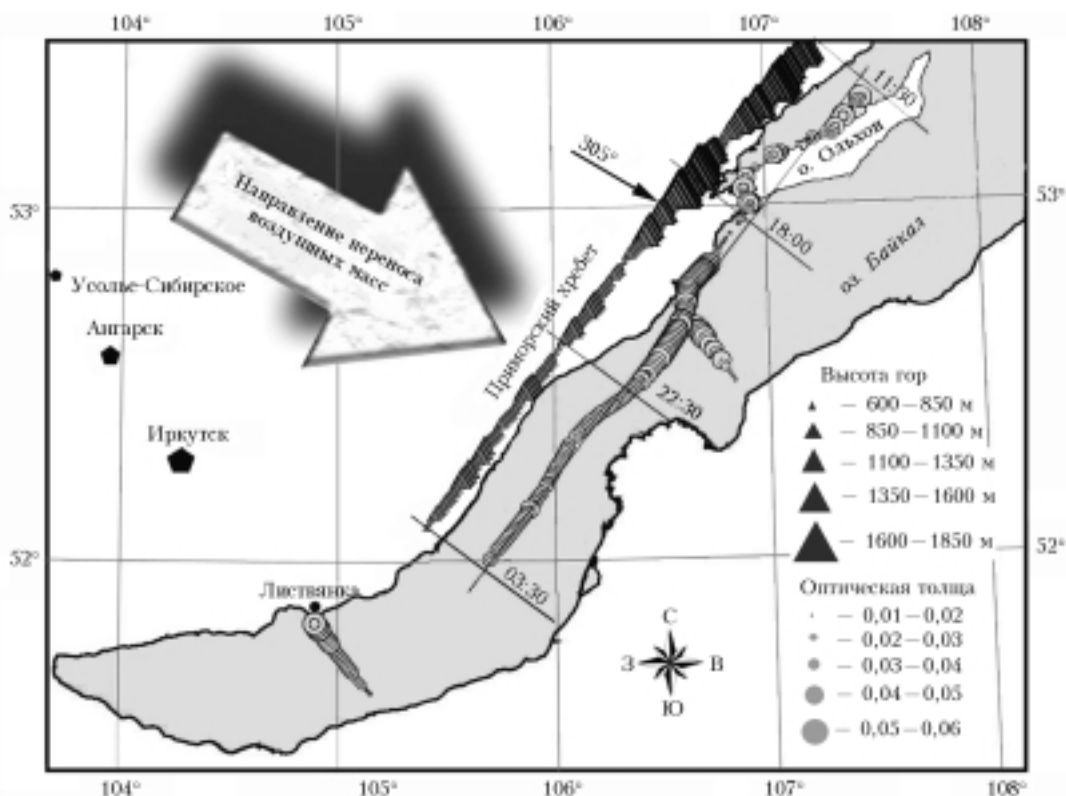


Рис. 5. Схема корабельного эксперимента (стрелка показывает направление нормали к хребту)

Оценки функций взаимной корреляции $\rho(H, \tau)$ показаны на рис. 6. Следует обратить внимание, что оценки этих функций по всей дистанции являются некорректными из-за явной нестационарности реализаций τ на полном временном масштабе, как это уже было замечено выше (см. рис. 4). Поэтому после предварительного анализа было выбрано корреляционное окно с максимальным числом сдвигов, равным 50, которое попадало при сканировании по всей дистанции на характерные временные масштабы, где выполнялось условие стационарности. Показательно, что выделенный временной масштаб (порядка 5 ч) совпал с определенным ранее масштабом субсиноптических изменений в атмосферных явлениях и вполне адекватно описывается синоптической сводкой на рассматриваемый период времени. Не менее важным является и тот факт, что последовательное положение характерных масштабов корреляции по трассе зондирования совпадает с характерным пространственным масштабом изменения высотного профиля рельефа Приморского хребта. Выявленные пространственно-временные масштабы показаны на рис. 5 и 6.

Как явно видно из рис. 6, все функции $\rho(H, \tau)$ имеют отрицательное значение с разной степенью значимости, что свидетельствует об обратной коррелированности высотного профиля гор с пространственными вариациями оптической толщи по трассе зондирования и вполне адекватно подтверждает сделанные выше предположения в постановке задачи. Ошибки оценивания значений коэффициентов взаимной корреляции в основных максимумах не превосходят 30% для первого временного интервала с 11:30 до 18:00 и не более 50% для второго временного интервала с 18:00 до 22:30. Вторичные максимумы коэффициентов $\rho(H, \tau)$ здесь не рассматриваются ввиду их малой статистической значимости. Для третьего временного интервала с 22:0 до 03:30 наблюдается полное отсутствие корреляции. Это обусловлено в большей степени сменной погодных условий к этому времени, вызванной усилением антициклона, соответствующим ослаблением модуля скорости ветра по высоте и изменением его направления.

Уменьшение значений коэффициента взаимной корреляции от первого временного интервала до

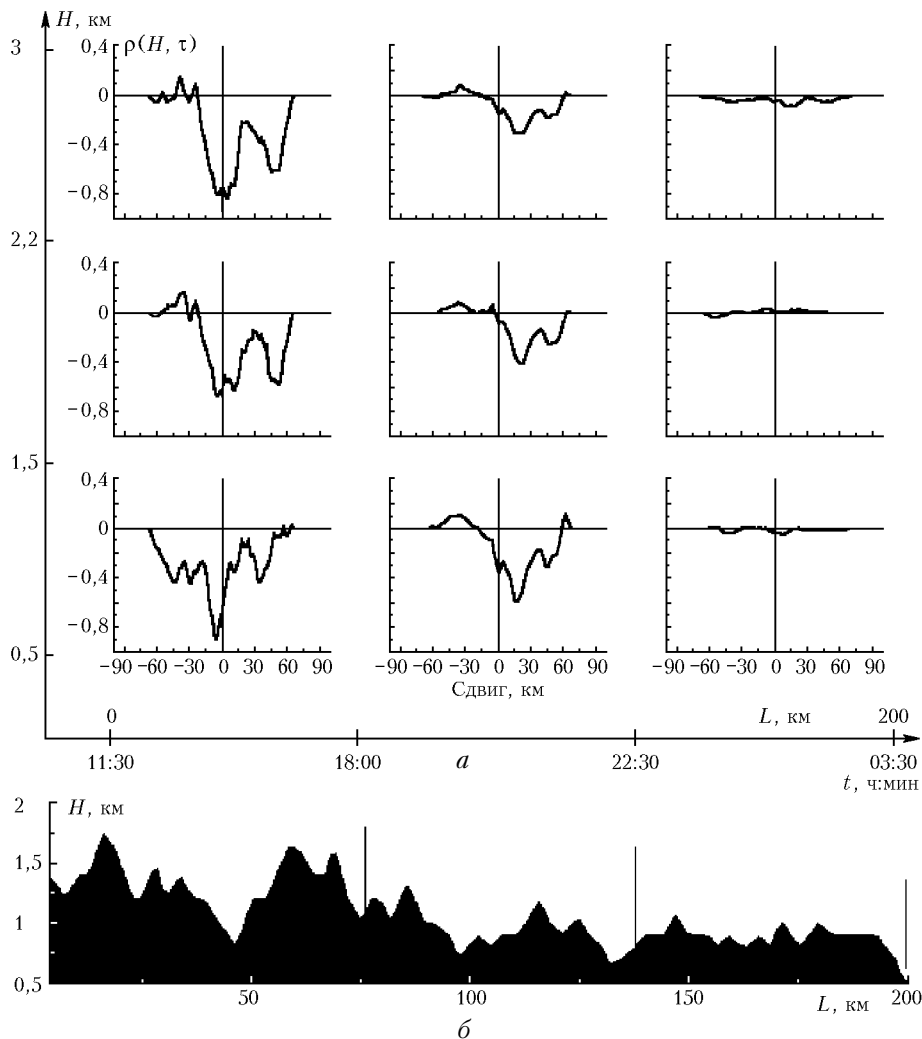


Рис. 6. Функция взаимной корреляции $\rho(H, \tau)$ высотного профиля гор с пространственными вариациями оптической толщи

второго объясняется понижением абсолютной высоты гор и соответственно ослаблением их влияния на переносимый воздушный поток и нарушением взаимосвязи с вариациями измеряемой оптической толщи. А то, что такое влияние возможно, подтверждается сдвигом максимума коэффициента корреляции во втором временном интервале, так как положительное запаздывание в сдвиге корреляционной функции соответствует изменению направления переноса воздушного потока с северо-западного в сторону западного. Было оценено (из схемы проекций рис. 5 на географическую сетку), что сдвиг на 14 км соответствует изменению направления примерно на 30° . Имеющийся сдвиг на 16 км во втором временном интервале отвечает изменению направления потока на 35° , что находит подтверждение в синоптических данных.

Обнаружено, что пространственные изменения интегральных оптических параметров самого нижнего слоя наиболее взаимосвязаны с профилем рельефа, когда эта корреляция вообще имеет место. В этом плане представляет интерес проследить по маршруту пространственное распределение дифференциальной характеристики — коэффициента рассеяния. Результаты картирования профилей $\sigma(H)$ вдоль Приморского хребта иллюстрируются рис. 7. Аэрозольное поле в разрезе представлено в виде интенсивности почернений, шкала отображений которых дана в верхней части рис. 7. В нижней части представлен соответствующий маршруту корабля (I и II участки) схематический высотный профиль вершин Приморского хребта.

Внешний вид аэрозольного разреза представляет собой довольно пеструю мозаичную картину. В начале маршрута с 11:30 до 18:30 в районе Малого моря наблюдается ярко выраженная ячеистая вихревая структура аэрозольного поля, диагностируемая относительно постоянством коэффициентов рассеяния по высоте внутри ячейки и вариациями горизонтальных размеров ячеек от 1,5 до 8 км.

По мере удаления от Малого моря, начиная с 18:30 (рис. 7, б, в), вихревая структура поля разрушается, приобретая все большую горизонтальную однородность к концу дистанции маршрута. Подобная структура характерна для воздушного потока, набегающего на перпендикулярный к нему горный хребет, в этом случае на подветренной стороне возникают так называемые волны препятствий [15].

В [22] подробно описано поведение мелкомасштабных возмущений потока, которое в основном зависит от следующих факторов: 1) вертикального профиля ветра; 2) фактора устойчивости атмосферы; 3) формы препятствия. При слабых ветрах поток плавно течет над хребтом, образуя пологую волну — ламинарное течение. При более сильных ветрах на подветренной стороне образуется стоячий вихрь, а при увеличении вертикального градиента скорости ветра создается последовательность подветренных волн. Как отмечено в [22], возникновение подветренных волн возможно для низких хребтов (1 км) при горизонтальной скорости ветра не менее 7 м/с на уровне гребня и от 15 м/с — для хребтов высотой 4 км.

В [23] теория подветренных волн рассматривалась для случая обтекания потоком хребта в форме полуцилиндра и предложено решение задачи путем введения безразмерного параметра

$$\xi_0 = \omega H_{cp} / U_{cp},$$

где ω — частота гравитационных колебаний Брейта-Вайсала, имеющая порядок 10^{-2} с^{-1} ; H_{cp} — средняя высота хребта; U_{cp} — средняя скорость воздушного потока.

В результате расчетов получено, что при $\xi_0 < 0,4$ возникающие подветренные волны очень слабы, а при $\xi_0 > 1 \div 2$ за хребтом образуются замкнутые вихри. Полагая, поскольку он не измерялся, вертикальный градиент температуры постоянным ($0,65^\circ/100 \text{ м}$), можно рассчитать параметр ξ_0 для нашего случая. Для участка маршрута Малого моря (рис. 7, а) $H_{cp} = 1350 \text{ м}$; $U_{cp} = 8 \text{ м/с}$, тогда $\xi_0 \approx 2$.

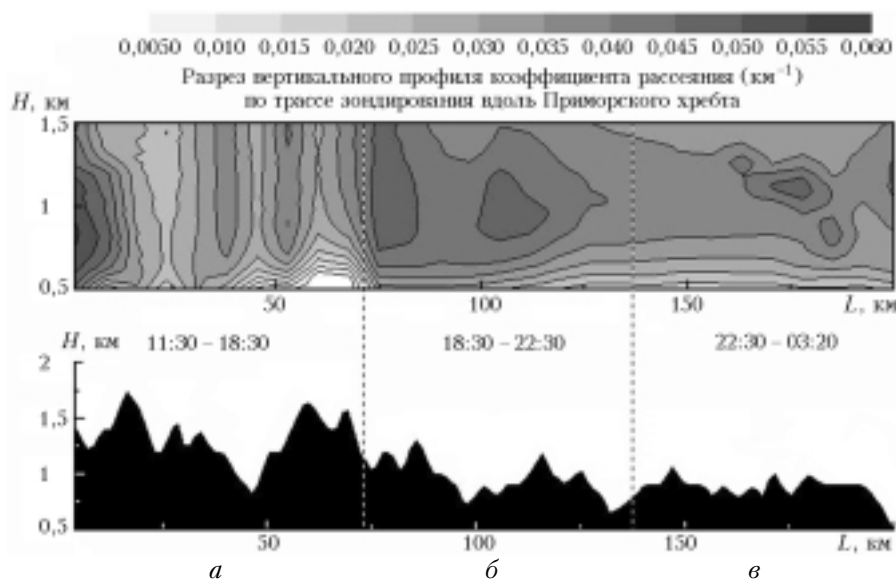


Рис. 7. Сопоставление вертикальных разрезов $\sigma(H, L)$ и горных вершин вдоль хребта

Характеристики последующих участков составляют: $H_{cp} = 990$ м, $U_{cp} = 7$ м/с, $\xi_0 \approx 1,5$ (см. рис. 7,б) и $H_{cp} = 850$ м, $U_{cp} = 9$ м/с, $\xi_0 \approx 1,0$ (см. рис. 7,в).

Таким образом, полученная в эксперименте структура аэрозольного поля (см. рис. 7) в целом удовлетворительно согласуется с выкладками теории подветренных волн [15, 23]. В то же время теории воздушного потока над горами математически достаточно сложны, требуют учета многих факторов (наличие инверсий, стратификации и т.д.), поэтому данный вывод можно рассматривать лишь как первое приближение.

Полученный материал скорее является отправной точкой для проведения уже специально направленных для этих целей экспериментов. Во второй части статьи авторы планируют рассмотреть особенности распределения аэрозольных полей на основе поперечных лидарных разрезов в различных областях оз. Байкал.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность всем участникам комплексной экспедиции «Байкал-02», а особенно сотруднику лидарной группы Г.С. Байрашину, обеспечившему бесперебойную работу аэрозольного лидара.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 02-05-64486 и 01-05-97240.

1. Аргуинцев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование распространения серы и азота в приводном слое оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 8. № 6. С. 748–753.
2. Аргуинцев В.К., Куценогий К.П., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Экспериментальное исследование и численное моделирование аэрозолей и газовых примесей в атмосфере южного Байкала // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 598–604.
3. Аргуинцев В.К., Макухин В.Л. Моделирование распределения в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 594–601.
4. Аргуинцев В.К., Макухин В.Л. Моделирование вертикального распределения концентраций соединений серы и азота в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 544–546.
5. Аргуинцев В.К., Макухин В.Л. Численное моделирование распространения, трансформации и осаждения соединений серы, азота и углерода в регионе оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 456–459.
6. Кузин В.И., Крупчатников В.Н., Фоменко А.А., Крылова А.И., Голубева Е.Н., Моисеев В.М., Щербанов А.В. Совместная модель «атмосфера–биосфера–почва–океан» для изучения климата Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 476–484.
7. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах

климатоэкологического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5–6. С. 482–487.

8. Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А. Химический состав аэрозоля и малые газовые примеси в атмосфере над Байкалом // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1059–1066.
9. Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. О роли атмосферы в формировании химического состава вод оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 512–515.
10. Мониторинг состояния оз. Байкал: Сб. статей. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 262 с.
11. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Панченко М.В., Покровский Е.В., Поданев А.В., Рассказчикова Т.М., Толмачев Г.Н. Комплексная оценка состояния воздушного бассейна над Прибайкальем и озером Байкал // Метеорол. и гидрол. 1996. № 10. С. 39–50.
12. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманов 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.
13. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Поданев А.В., Покровский Е.В., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К. Некоторые характеристики циркуляции воздуха вдоль береговой линии оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. 1999. № 8. С. 66–72.
14. Балин Ю.С., Ершов 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.
15. Хризан А.Х. Физика атмосферы. Т. 2. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 319 с.
16. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.А., Федоров В.А. Анализ структуры поля ветра в нижнем слое атмосферы на побережье оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 902–908.
17. Аршинов 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.
18. Байрашин Г.С., Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. Сканирующий лидар «ЛОЗА-М» для контроля аэрозольных полей в атмосфере // Наука производству. 2003. (В печати).
19. Балин Ю.С., Ершов А.Д. Особенности формирования вертикальной структуры аэрозольных полей в летний период 1995 года в районе г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 616–623.
20. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1045–1054.
21. Балин Ю.С., Ершов А.Д., Самойлова С.В. Обращение лидарных данных при исследованиях оптических характеристик слабозамутненной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 894–899.
22. Барри Роджер Г. Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 310 с.
23. Кожевников В.Н. Орографические возмущения в двумерной стационарной задаче // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1968. Т. 4. № 1. С. 33–52.

Yu.S. Balin, A.D. Ershov, I.E. Penner. Shipborne lidar investigations of aerosol fields in the atmosphere of Lake Baikal. Part 1. Longitudinal sections.

The results of lidar investigations of the altitude structure of aerosol fields based on the data array obtained during the Lake Baikal ship mission in July–August 2002 are presented. Analysis of longitudinal and cross sections revealed the significant effect of local orography on formation of the field structure. The correlation analysis of the altitude distribution of the optical depth along the ship route with the spatial profile of the Primorski Ridge mountains was conducted. It was found that the highest correlation is observed in the lower atmospheric layer of 0.5–1.5 km.