

Ю.С. Балин, С.В. Самойлова, И.Э. Пеннер

Космическое и подспутниковое лазерное зондирование аэрозольных и облачных полей тропосферы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.02.2007 г.

Приводятся аспекты деятельности Института оптики атмосферы в сфере космического приборостроения на примере первого Российского лидара «БАЛКАН» орбитальной станции «Мир», в области методологии интерпретации данных космического лазерного зондирования кристаллических и водных облачных образований, результаты совместных наблюдений тропосферы в период сибирских лесных пожаров 2006 г. с использованием наземного лидара ИОА СО РАН «ЛОЗА-S» и космического лидара США CALIPSO.

С момента появления в 1963 г. первой пионерной работы G. Fiocco и L.D. Smullin по исследованию рассеивающих слоев верхней атмосферы с использованием оптического радара достигнут значительный прогресс в применении этих современных дистанционных средств контроля оптических и метеорологических параметров атмосферы, а также ее аэрозольного и газового состава.

Достаточно сказать, что в настоящее время развитие лидарных технологий позволило исследователям перейти к режиму постоянных атмосферных наблюдений и сформировать ряд крупных лидарных сетей. Сеть NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), объединяющая 16 лидарных станций по всему миру [1], создана для контроля озона, аэрозоля, температуры и влажности при изучении проблем климата. Для мониторинга тропосферного аэрозоля под эгидой NASA развивается лидарная сеть MPL-Net на основе микроимпульсных лидаров [2]. В 2000 г. сформирована Европейская лидарная сеть EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) [3], координирующая работу более чем 20 лидарных комплексов европейских стран по мониторингу крупномасштабного переноса аэрозольных примесей, в основном с района пустыни Сахара.

Дальнейшее развитие эта сеть получила в 2006 г., стартуя с модернизированным названием EARLINET-ASOS и новым пятилетним проектом, направленным на оптимизацию и стандартизацию оборудования, методов обработки и представления информации, создание общей базы данных [2]. Лидарные исследования выноса пылевого аэрозоля с пустынной территории Китая выполняются в рамках функционирования Азиатской лидарной сети AD-Net (Asian Dust Network) [4]. В стадии формирования находятся региональная Восточно-Американская лидарная мезосеть REALM (Regional East Atmospheric Lidar Mesonet) [5], лидарная сеть в Латинской Америке [6]. Мониторинг атмосферного аэрозоля и озона в регионах СНГ, начиная с 2006 г., регулярно осуществ-

ляется с использованием сети лидарных станций CIS-LiNet [7], расположенных в России, Беларуси и Киргизии. Тенденция развития региональных лидарных сетей приобретает планетарный характер, и на повестке дня стоит вопрос о создании Мировой лидарной сети GALION (GAW Aerosol Lidar Observation Network).

В этом плане, когда идет речь о глобальном мониторинге, естественной является постановка задачи об организации соответствующих космических лидарных наблюдений. В 70-х гг. под руководством NASA была создана Международная рабочая группа, которая на первом этапе определила основной перечень научных задач, решаемых с помощью космического лидара [8]. В 1994 г. на борту пилотируемого «Шаттла» состоялся запуск первого космического лидара NASA по программе LITE (Lidar In-space Technology Experiment). Результаты этих экспериментов неоднократно обсуждались впоследствии на многочисленных лидарных конференциях. Одиннадцатидневный полет лидара открыл новые возможности дистанционного лазерного зондирования атмосферы с космической орбиты, а отработка технологий послужила основой для создания специализированного автоматического лидарного спутника CALIPSO (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Observations). Космическая аппаратура, созданная совместно американскими (NASA, лидар CALIOP) и французскими (CNES, инфракрасный радиометр и широкоугольная видеокамера) специалистами была выведена на околоземную (705 км) орбиту весной 2006 г. В настоящее время она дает обширную информацию об аэрозольных и облачных полях атмосферы над всей территорией планеты [9].

Институт оптики атмосферы СО РАН также принимал и принимает участие в национальных и международных космических программах, охватывающих сферы космического приборостроения, теоретические исследования в области методологии интерпретации данных зондирования, а также непосредственно проведение космических экспериментов, включая

их валидацию с использованием наземных лидаров. В настоящей статье приводятся некоторые аспекты деятельности Института оптики атмосферы в этих областях в последнее десятилетие.

Космический лидар «БАЛКАН»

Первые проработки по созданию космического лидара были предприняты в ИОА СО АН СССР еще в 1975 г. Однако только в 1984 г., по заданию НПО «Энергия» (в настоящее время Российская космическая корпорация), были начаты опытно-конструкторские работы по созданию новой научной аппаратуры для многофункциональной орбитальной станции «Мир». Лидар «БАЛКАН» (бортовой аэрозольный лидарный комплекс Академии наук) создавался СКБ НИП «Оптика» СО АН СССР совместно с НИИ космического приборостроения. В 1990 г. все наземные испытания были завершены, и в составе модуля «Спектр» орбитальной станции «Мир» лидар был подготовлен для вывода в космос. Впервые о подготовленном к запуску первом российском космическом лидаре было заявлено на 15-й Международной лидарной конференции, проводившейся в Томске в июле 1990 г. [10]. Однако из-за отсутствия финансирования модуль был законсервирован и только в мае 1995 г., после проведения новых предстартовых испытаний, лидар был выведен на околоземную орбиту. Первый цикл работ был выполнен на лидаре в августе–сентябре 1995 г. Планирование, организация и проведение космических экспериментов осуществлялись в Центре управления полетами РКК «Энергия» в г. Королеве.

Лидар «БАЛКАН» предназначался для проведения следующих космических экспериментов:

- а) проверка потенциальных возможностей аппаратуры при зондировании облаков и подстилающей поверхности;
- б) измерение глобального распределения облачных образований;
- в) селекция различных видов облачности на фоне подстилающей поверхности на основе комплексирования с пассивными средствами зондирования;
- г) зондирование верхнего слоя океана;
- д) валидация параметров орбиты станции «Мир» методом лазерной локации.

По своему общему конструктивному принципу «БАЛКАН», подробное описание которого изложено в [11], представлял собой типичный лидарный комплекс, состоящий из совокупности следующих основных блоков: приемопередатчик, геодезический модуль определения дальности до объекта, система регистрации лидарных сигналов, пульт управления аппаратурой для космонавтов. Немаловажное значение имел разработанный комплект наземной контрольно-проверочной аппаратуры [12], который обеспечивал проверку технических параметров лидара во время проведения большого цикла наземных испытаний, имитирующих воздействия различных факторов внешней среды (механические, климатические, электромагнитные и т.д.) в условиях подготовки к запуску, в процессе запуска, а также во время космического полета.

Основные технические параметры лидара представлены ниже.

Длина волны, нм	532
Энергия импульса, мДж	0,20
Длительность импульса, нс	12
Частота посылок импульсов, Гц	0,18
Диаметр передающего коллиматора, мм	120
Расходимость излучения лазерного передатчика, мрад	0,15
Диаметр приемного телескопа, мм	275
Угол поля зрения, мрад	0,44
Ширина полосы пропускания интерференционного светофильтра, нм	3
Квантовая эффективность ФЭУ, %	13
Уровень световой пороговой мощности приемного тракта, Вт	$2 \cdot 10^{-8}$
Ширина полосы электронного усилителя, МГц	40
Погрешность канала точной дальности, м	0,75
Разрядность АЦП, бит	6
Временное разрешение АЦП, нс	20
Потребляемая электрическая мощность, Вт	200
Масса лидара, кг	120

Приемопередатчик лидара (рис. 1) был выполнен в виде единой отливки, что давало необходимую жесткость и обеспечивало параллельность оптических осей в период эксплуатации с погрешностью не более 10 угл.с. Приемопередатчик крепился внутри модуля перед иллюминатором, выполненным из специального стекла, диаметром 400 мм. Для защиты фотоприемного блока от переотраженного зондирующего излучения оптическая ось передатчика была повернута относительно оси иллюминатора на 1,5°. Оптическая антенна передатчика представляла собой телескоп Галилея, а приемная антенна — зеркально-линзовый телескоп схемы Манжена с внешним нанесением отражающих покрытий. Все это позволило существенно уменьшить линейный размер телескопа.

Для повышения надежности аппаратуры — как это принято в космическом приборостроении — использовались «холодное» и «горячее» резервирование отдельных блоков лидара. В «горячем» резервировании, т.е. в постоянной работе, находятся одновременно два фотоприемных канала. «Холодное» резервирование охватывает систему регистрации и лазерный блок.

В лидаре были использованы идентичные лазеры на ИАГ с удвоителем частоты, образующие два передающих канала — основной и резервный, которые переключались автоматически. В фотоприемном блоке в качестве оптического детектора был взят фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84, имеющий хорошую квантовую эффективность в видимой области спектра и обладающий наиболее хорошими характеристиками для работы в аналоговом режиме. В рабочем режиме синхронно работают два фотоумножителя, на торцах которых для повышения эффективности были укреплены призмы полного внутреннего отражения. После фотоэлектрического преобразования лидарные сигналы поступали на систему регистрации, состоящую из двух независимых каналов:

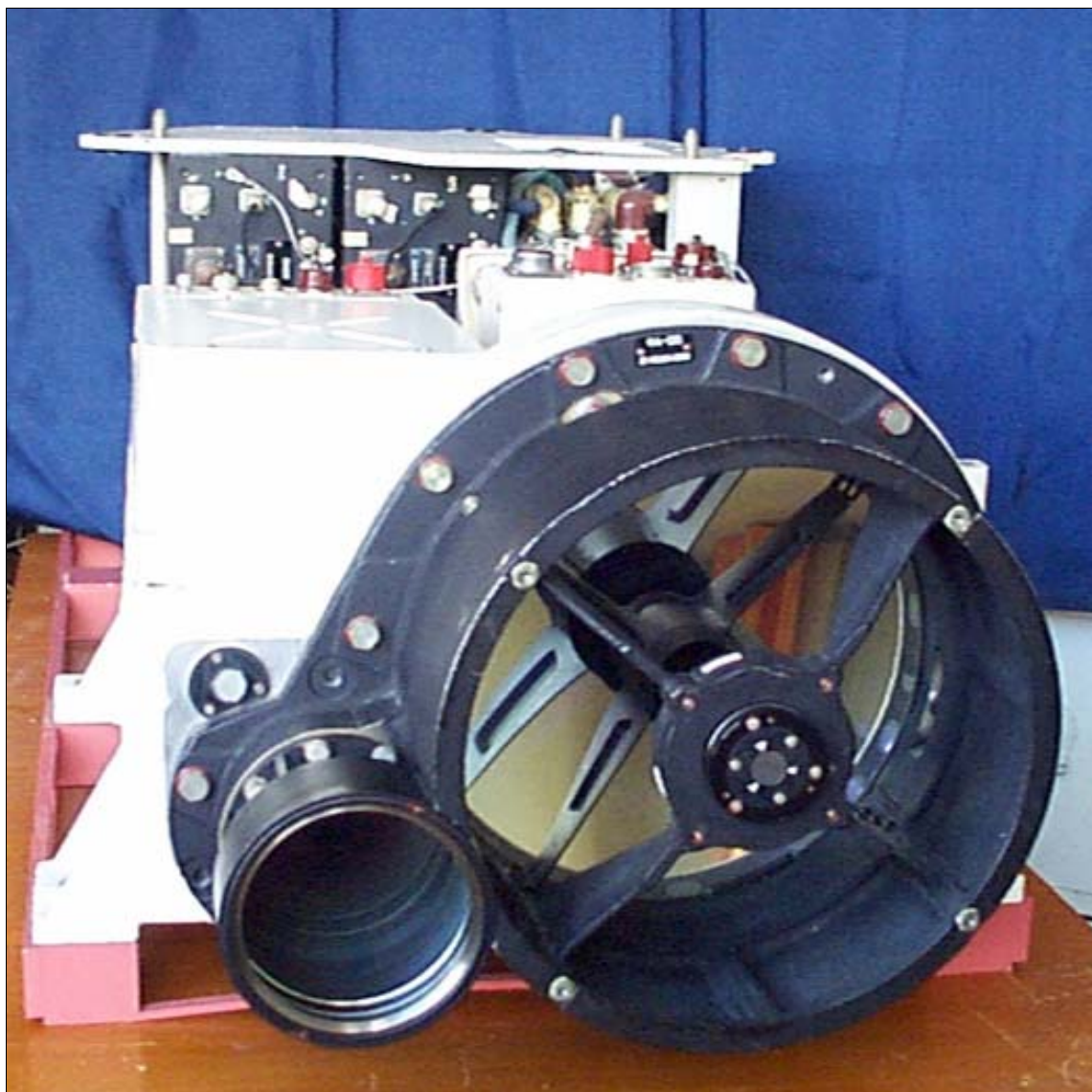


Рис. 1. Внешний вид приемопередатчика космического лидара «БАЛКАН»

дальнометрического (амплитуда — дальность) и лидарного (дальность — амплитуда). Первый канал обеспечивал измерения временного интервала между моментами излучения и приема отраженного сигнала, достигшего некоторого порогового значения. В лидарном канале был использован аналого-цифровой преобразователь с временным дискретом оцифровки 20 нс. Амплитудная выборка сигналов записывалась в оперативное запоминающее устройство, где формировались информационные строки, передаваемые бортовым вычислительным комплексом станции в Центр управления полетов для дальнейшей расшифровки и обработки.

Измерения с использованием космического лидара «БАЛКАН» проводились в течение 1995–1996 гг. тремя орбитальными экспедициями космонавтов ЭО-19÷ЭО-21. В июне 1996 г. из-за внешней аварии на модуле «Спектр» дальнейшие работы с лидаром были прекращены, хотя он отработал менее 10% своего ресурса. Предварительные результаты исследований [13] позволили осуществить технологическую проверку лидара, отработать методики совместного подспутникового эксперимента и получить массивы лидарных сигналов, пригодных для апробации алгоритмов обработки данных зондирования.

Интерпретация лидарных данных космического зондирования облачности

Целью лидарных космических измерений является получение информации о глобальном распределении облачных и аэрозольных слоев над поверхностью Земли. Лидар предоставляет возможность идентификации рассеивающего слоя (аэрозоль/облако), его местоположения (высота/толща) и фазового состава (лед и/или вода). Корректное восстановление оптических характеристик — коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, оптической толщи, деполаризационного и лидарного отношений — на рабочих длинах волн лидара (355/532/1064 нм по программе LITE и 532/1064 нм плюс деполаризация на 532 нм для CALIPSO) является ключевым моментом при решении вышеперечисленных задач (см., например, [14, 15]).

Интерпретация лидарных сигналов из космоса имеет ряд особенностей, связанных с большими дистанциями зондирования и, следовательно, высоким фоном многократного рассеяния (МР). Фон возникает за счет образования больших рассеивающих объемов в пределах конуса визирования лидара, когда поперечные размеры светового пучка на верхней границе облака оказываются сопоставимыми с толщиной зондируемого облачного слоя. Излучение, рассеянное в боковых направлениях, практически не выходит из угла поля зрения приемника и участвует в дальнейшем формировании отраженного светового потока [16, 17].

Таким образом, интерпретация сигналов представляет собой недоопределенную задачу, поскольку требует априорного введения информации об инди-

катрисе рассеяния (о матрице рассеяния при поляризационных измерениях). Ее решение осложняется отсутствием универсальной аналитической модели, описывающей вклад рассеяния для кратностей больше 2, и общих моделей полидисперсных матриц рассеяния для облаков кристаллического и смешанного фазового состава.

Существуют два способа интерпретации данных — коррекция фона МР и обращение сигналов традиционными методами [18, 19] либо восстановление информации непосредственно из части сигнала, определяемой МР. В любом случае первым этапом интерпретации является построение адекватной математической модели, описывающей лидарный сигнал с учетом вклада МР. Не вызывающим сомнения способом его учета является решение нестационарного уравнения переноса с помощью метода Монте-Карло (наиболее полный обзор методов для задач зондирования приведен в [17]). Недостаток подхода состоит в плохой автоматизируемости, особенно проявляющейся при обработке больших объемов лидарных измерений, что стимулировало разработку методов «квазианалитической» аппроксимации фона МР (см., например, [20, 21]). К данному классу исследований относится и наша модель.

Для линейно поляризованного излучения состояние поляризации описывается, как известно, вектором параметров Стокса:

$$\begin{pmatrix} S_1(z) \\ S_2(z) \\ S_3(z) \\ S_4(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{\parallel}(z) + F_{\perp}(z) \\ F_{\parallel}(z) - F_{\perp}(z) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где $F_{\parallel}(z)$ — параллельная и $F_{\perp}(z)$ — перпендикулярная составляющие сигнала обратного рассеяния. В работах [22, 23] была предложена относительно простая модель для первого компонента вектора параметров Стокса (интенсивности излучения), учитывающая вклад МР и используемая при интерпретации наземных измерений:

$$S_1(z) = S_1^{(1)}(z) \exp \left\{ 2 \int_{z_0}^z [\sigma(z') (1 - \eta_1(z'))] dz' \right\}, \quad (1)$$

где $S_1^{(1)}(z)$ — составляющая, обусловленная однократным рассеянием; $\sigma(z)$ — коэффициент ослабления излучения;

$$\eta_1(z) = 1 - \frac{\ln \{ S_1(z) / S_1^{(1)}(z) \}}{2\tau(z)} = 1 - \frac{m_1(z)}{2\tau(z)},$$

$$\tau(z) = \int_{z_0}^z \sigma(z') dz', \quad \eta_1 \in]0, 1[, m_1(z)$$

зависит от типа рассеивателей и определяется комбинацией элементов матрицы рассеяния [24]. В работах [25, 26] было показано, что аналогичная модель справедлива и для второго компонента вектора параметров Стокса:

$$S_2(z) = S_2^{(1)}(z) \exp \left\{ 2 \int_{z_0}^z [\sigma(z') (1 - \eta_2(z'))] dz' \right\}, \quad (2)$$

где

$$\eta_2(z) = 1 - \frac{\ln \{ S_2(z) / S_2^{(1)}(z) \}}{2\tau(z)} = 1 - \frac{m_2(z)}{2\tau(z)},$$

$\eta_2 \in]0, 1[$, $m_2(z)$ также зависит от элементов матрицы рассеяния [26]. Результаты расчетов параметра η_1 методом Монте-Карло для различных матриц рассеяния [26] показали, что на больших дистанциях зондирования

$$\eta_1(z) \cong \text{const}; \quad \eta_2(z) \cong \text{const}.$$

Значения этих величин полностью определяют типом рассеивателей.

Таким образом, модели (1) и (2) применимы для интерпретации космических измерений. Более того, в [26] было показано, что

$$\eta_1(z) / \eta_2(z) \cong \text{const},$$

и таким образом поляризационные характеристики лидарных сигналов для больших дистанций зондирования зависят от лидарного отношения и интеграла от функций, обусловленных комбинацией элементов матрицы рассеяния. Угловые различия в элементах матрицы, весьма существенные для разных типов кристаллов, при космическом зондировании не являются определяющими. Последний вывод очень важен для интерпретации сигналов, поскольку существенным образом сужает объем априорной информации, необходимой при их обращении относительно оптических параметров.

Ниже приведены результаты восстановления коэффициента ослабления на основе предложенного подхода. При расчетах фон МР считался помехой, описывался моделью (1) и корректировался итерационным методом [24]. Результаты являются примером совместной интерпретации космических и самолетных измерений и могут служить великолепным образцом синхронизации лидарных измерений на различных носителях. Мы использовали данные зондирования в рамках программы LITE (в дальнейшем «L») и данные подспутниковых измерений германским самолетным лидаром ALEX (Airborne Lidar Experiment, [27], в дальнейшем «A») 14 сентября 1994 г. (орбита 79), длина волны — 532 нм. Эти данные были любезно предоставлены космическими агентствами США и Германии. Из траектории полета был выбран участок зондирования ($8 \div 9,2^\circ$ в.д. и $56,9^\circ$ с.ш.), содержащий и водные (высота над Землей $z = 4,9 \div 8$ км, рис. 2) и кристаллические облака ($z = 8,9 \div 12$ км, рис. 3); время измерений составляло 19:16:00 ÷ 19:16:10 (UTC) для лидара «L» и 19:10:08 ÷ 19:04:22 (UTC) для лидара «A» (самолет и космический аппарат летели в противоположных направлениях). Участку соответствует массив измерений лидаром «L» из 100 сигналов через 800 м по горизонтали; для сопоставления массив данных самолетного лидара также был преобразован к 100 сигналами, каждый из которых

является усреднением по 21 выстрелу (в пределах пятна зондирования лидаром «L»), через 800 м.

Двумерные распределения коэффициента ослабления для самолетного лидара «A» приведены на рис. 2, а, 3, а и для «L» на рис. 2, б, 3, б. Соответствующие максимальные значения оптической толщины τ_{\max} (рис. 2, в, 3, в) и коэффициента ослабления σ_{\max} (рис. 2, г, 3, г) получены вдоль линии полета.

Анализ результатов показывает, что космические сигналы от плотных облаков (см. рис. 2) дают более пространственную информацию об их оптических характеристиках по сравнению с наземными (самолетными) измерениями, однако исключение фона МР из общего сигнала при обработке в данном случае нецелесообразно. Извлечения информации, содержащейся в фоне МР, методом Монте-Карло [28] или с помощью диффузионного приближения [29] позволяют использовать космические сигналы для определения таких характеристик плотных облаков, которые не могут быть получены с помощью иных лидарных измерений.

Для перистых и оптически неплотных водных облаков (см. рис. 3) допустимы исключение помехи МР из лидарного сигнала и его обработка методами, разработанными в приближении однократного рассеяния. Однако адекватное описание фона МР — это еще не все. Величина вклада МР зависит от матрицы рассеяния, которая априори неизвестна и, вообще говоря, должна быть найдена по самим сигналам. Проблема априорной неопределенности при выборе матрицы рассеяния является, наверное, самой сложной проблемой при интерпретации данных зондирования, в том числе и наземного.

Простейшей иллюстрацией является необходимость априорного задания лидарного отношения при восстановлении оптических параметров двухкомпонентной среды, полное решение обратной задачи возможно только при рамановском зондировании [30]. Отметим, что для водных облаков выбор матрицы рассеяния при обработке космических сигналов не является критичным, поскольку диапазон изменчивости лидарного отношения невелик, матрицы близки, а восстановление параметров при наличии фона МР устойчиво [28]. Для перистых облаков более перспективным представляется использование поляризационных характеристик излучения.

Используя модели (1) и (2), можно показать, что логарифмическая производная профиля поляризации (отношения второго компонента вектора Стокса к первому) пропорциональна профилю лидарного отношения, помноженного на коэффициент обратного рассеяния [26]. Это дает возможность из поляризационных измерений одновременно восстанавливать профили деполяризационного, лидарного отношений и коэффициента ослабления (или обратного рассеяния) и с определенной степенью достоверности оценивать тип и размер рассеивающих частиц. Область применения метода ограничена адекватностью математической модели, описывающей процессы кратного рассеяния, а главной методической трудностью является необходимость корректного численного дифференцирования отношения двух экспериментально измеряемых функций.

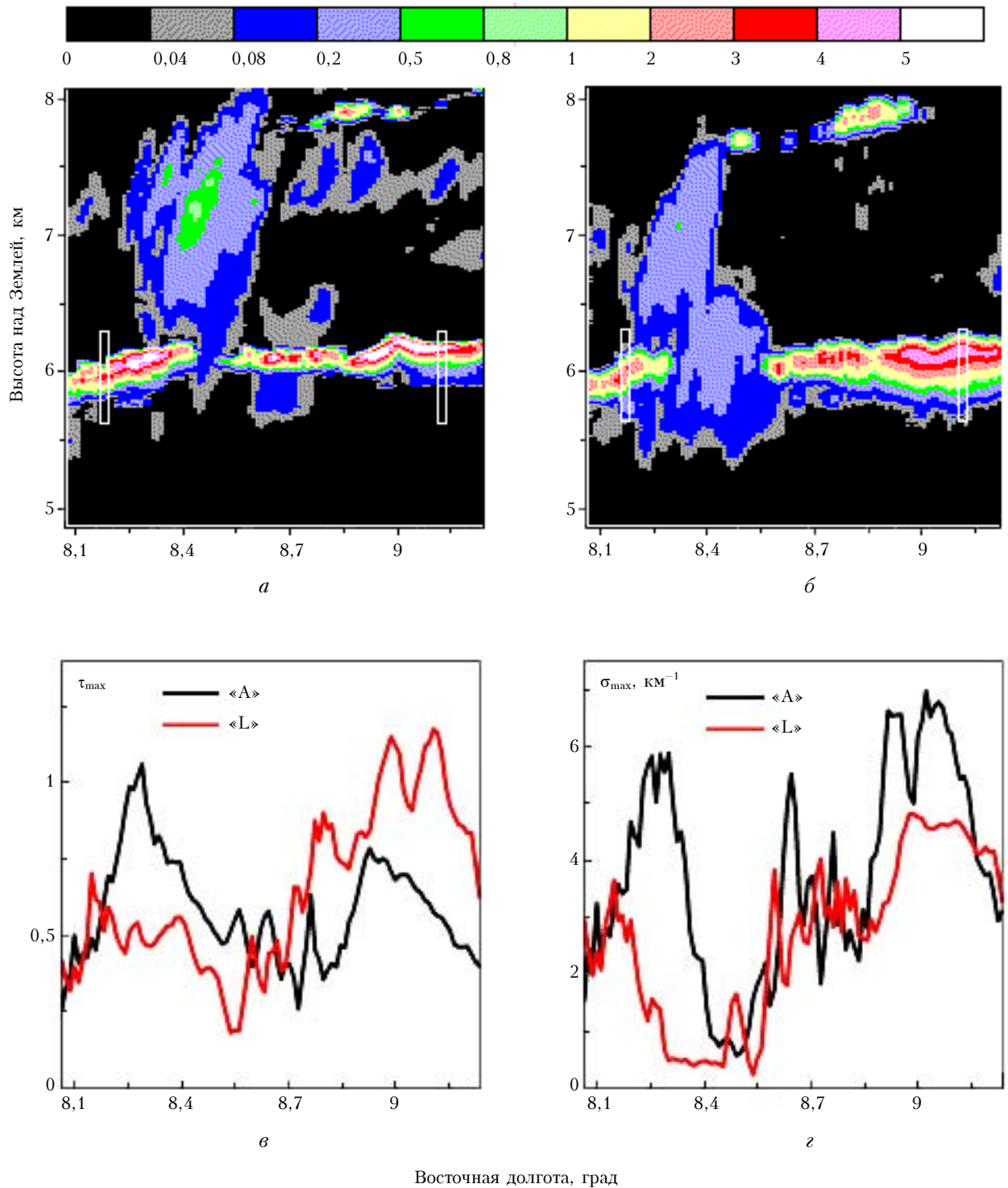


Рис. 2. Восстановление оптических параметров водных облаков по данным синхронного зондирования космическим и самолетным лидарами 14.09.1994 (орбита 79): *a* – коэффициент ослабления (1/км) по данным «А»; *b* – по данным «L»; максимальные значения оптической толщины (*v*) и коэффициента ослабления (*z*) вдоль линии полета

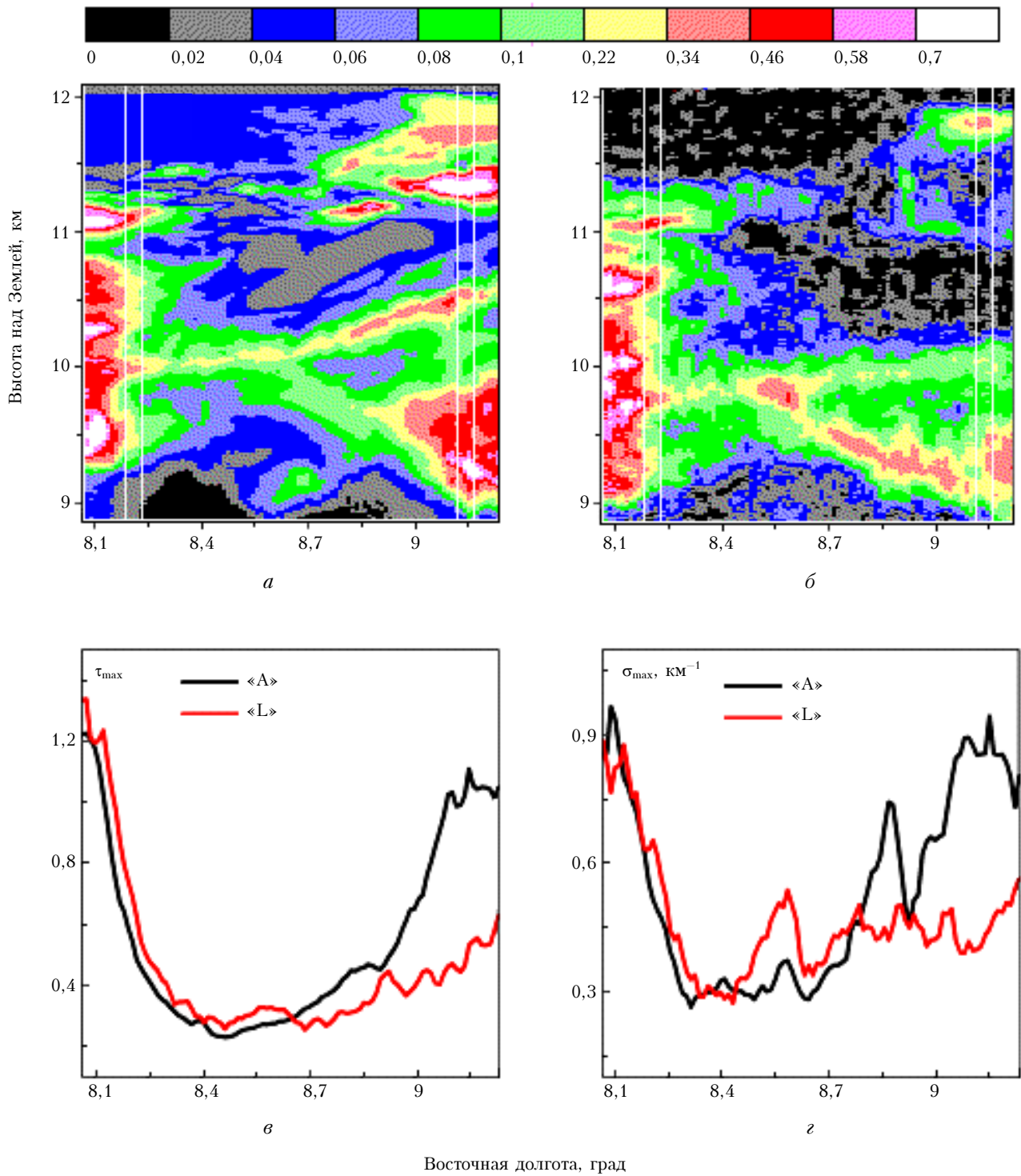


Рис. 3. Восстановление оптических параметров кристаллических облаков по данным синхронного зондирования космическим и самолетным лидарами 14.09.1994 (орбита 79): *a* – коэффициент ослабления (1/км) по данным «A»; *b* – по данным «L»; максимальные значения оптической толщи (*v*) и коэффициента ослабления (*z*) вдоль линии полета

Исследуя возможные ошибки определения оптических параметров кристаллических облаков и аэрозоля, возникающие в условиях априорной неопределенности по типу рассеивателей, авторы работы [31] сделали следующие выводы.

Во-первых, профиль лидарного отношения устойчив к восстановлению с «ошибочной» матрицей рассеяния, во-вторых, априорная неопределенность приводит к противоположным искажениям при определении коэффициента ослабления методом логарифмической производной и итерационным методом, поэтому целесообразно проводить оценивание $\sigma(z)$ обоими методами, поскольку большие расхождения явно указывают на «ошибочность» матрицы, используемой при обработке.

Подспутниковые лидарные наблюдения

Важной частью орбитальных лидарных наблюдений, связанной с их валидацией, является организация в районе пролета спутника соответствующих синхронных измерений оптических параметров аэрозольных и облачных полей с применением самолетных и наземных средств. Первый масштабный опыт такого сопровождения был получен в период выполнения программы ELITE-94 [32], в которой было задействовано 17 лидарных европейских станций, в том числе два самолетных лидара. Самолетные разрезы одного из них, германского лидара ALEX [27], приводились в предыдущем разделе статьи.

Для калибровки данных космического лидара CALIPSO была организована специальная международная программа QPQ [33], для выполнения которой задействованы практически все существующие региональные и международные измерительные атмосферные сети планеты. В России головной организацией по координации работы всех российских лидаров является Институт оптики атмосферы. Следует отметить, что лидар CALIPSO является частью большой группировки (A-train) космических аппаратов, состоящей из спутников «Aqua», «CloudSat», CALIPSO, PARASOL и «Aura». При этом временной промежуток работы между ними колеблется от десятков секунд до минут.

Облачные и аэрозольные поля имеют различные пространственные и временные масштабы, поэтому намечается различная стратегия валидации спутниковых данных. Аэрозольные поля обычно имеют большую пространственную корреляцию, чем облачные, и обеспечивают возможность лучшего сопоставления наземных и космических наблюдений. По рекомендациям программы дистанция между расположением наземного лидара и проекцией траектории CALIPSO может достигать 50–100 км [33]. Оптические свойства облачных полей имеют более значительную горизонтальную пространственную изменчивость — для перистых облаков она может достигать 100% на дистанциях до 5 км [33]. Поэтому здесь в лучшем случае применим статистический анализ. Корреляционные дистанции для оценки фазового состава облаков

(лед/вода) достигают ~ 50 км и поэтому могут быть достаточны для прямого сопоставления. Отметим, что для контроля как аэрозольных, так и облачных полей наибольшее предпочтение отдается наземным лидарам высокого спектрального разрешения (HSRL) и рамановским лидарам.

В настоящем разделе в качестве примера приводятся некоторые результаты, полученные в период сибирских лесных пожаров 2006 г. с помощью стационарного многоволнового рамановского лидара «ЛОЗА-S» ИОА СО РАН [34] и лидара CALIPSO. Пожары сибирских бореальных лесов являются постоянным источником поступления в окружающую среду аэрозольных и газовых примесей, а их последствия носят глобальный характер из-за больших масштабов распространения в атмосфере дымовых шлейфов. Достаточно сказать, что продукты массовых сибирских пожаров были обнаружены в тропосфере лидарными станциями как в Центральной Европе [35], так и в Азиатском регионе [36, 37]. При этом перенос загрязняющих примесей осуществлялся по двум направлениям. Одна часть примесей переносилась воздушными массами в западном направлении непосредственно в Европу. Восточный перенос способствовал появлению дымовых слоев в тропосфере над Японией, Кореей, Северной Америкой и далее снова в Европе и Сибири, замыкая 17-дневный период глобального переноса [35]. С помощью лидаров были определены пространственно-временная динамика развития дымовых «облаков», их оптические и микрофизические параметры [35–37].

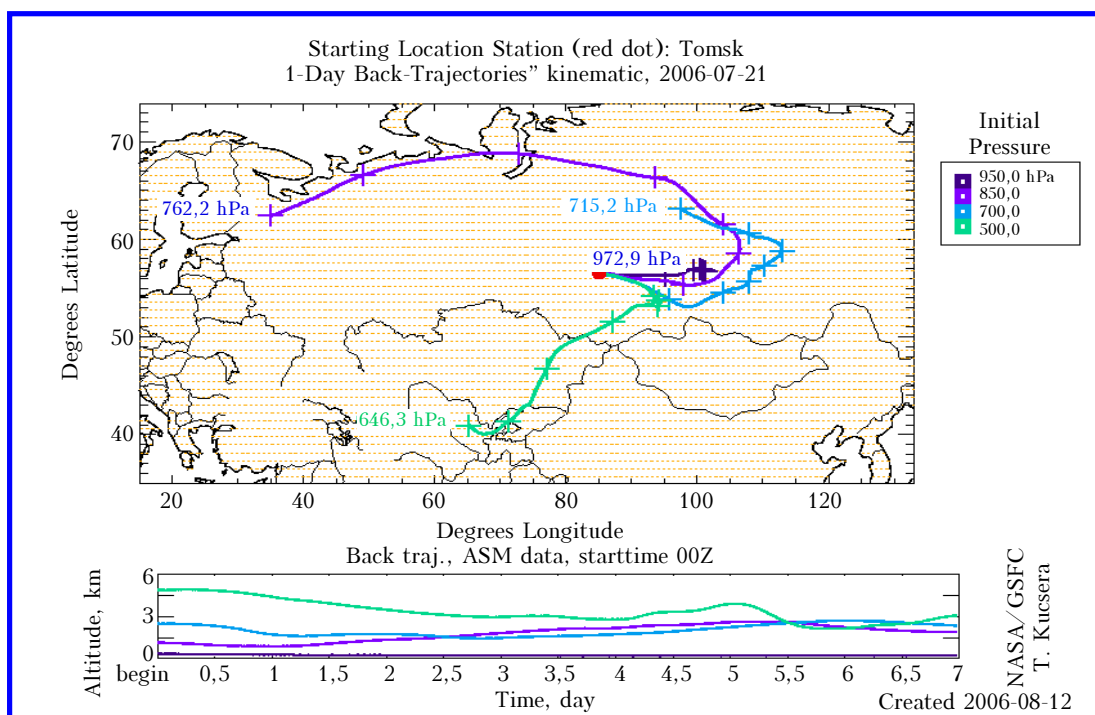
Приводимый ниже эпизод лидарных наблюдений относится к июлю 2006 г., во второй половине которого в атмосфере г. Томска (56,48° с.ш., 85,05° в.д.) были выявлены дымовые примеси от лесных пожаров в Красноярском крае. Это следует из анализа движения воздушных масс методом обратных траекторий (рис. 4, а). Общая картина задымления атмосферы над Томским регионом 21 июля 2006 г. видна на снимке, полученном со спутника TERRA-MODIS (рис. 4, б). Эти данные за рассматриваемый период времени представлены на вебсайте (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Результаты космического зондирования в этот и предшествующий периоды в виде характерного «красного» облака на высотах от 0,5 до 3 км показаны на рис. 5.

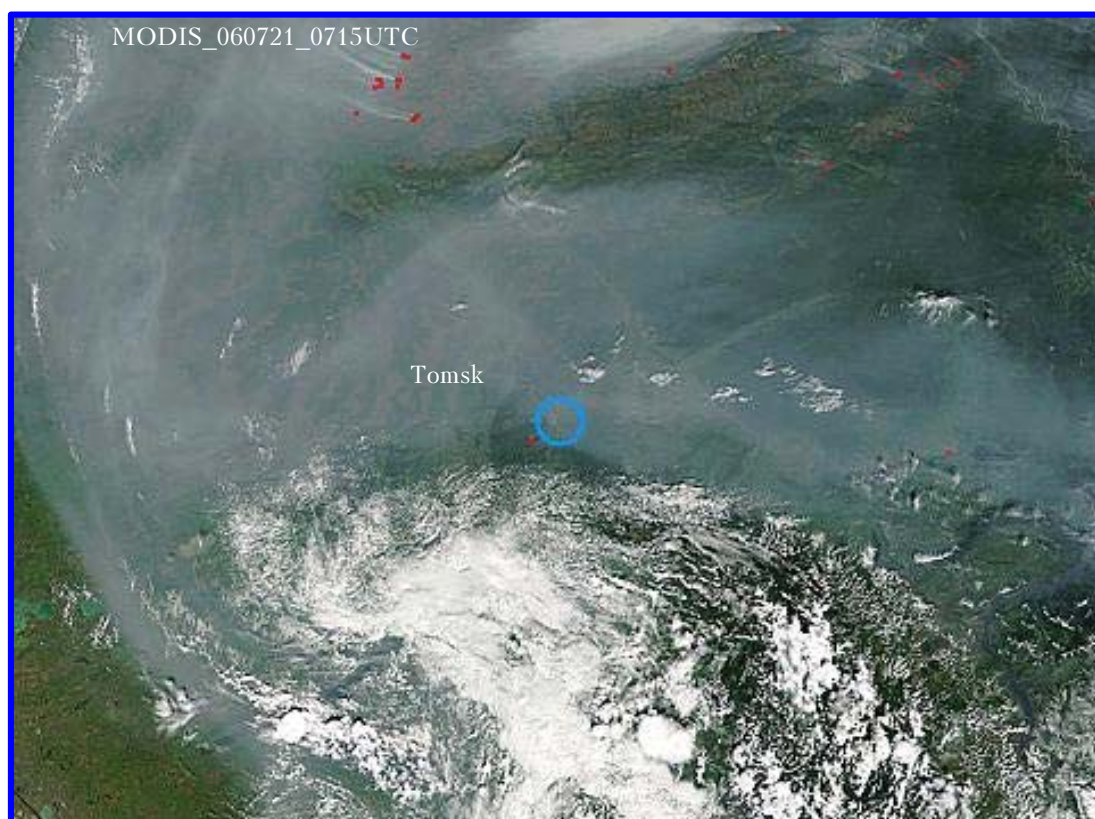
Опуская результаты зондирования последующих дней, по лидарным космическим разрезам можно проследить как вертикальную структуру дымового шлейфа, так и пространственную тенденцию его перемещения (вебсайт <http://www.calipso.larc.nasa.gov/products/lidar>).

Данные наземных наблюдений с помощью лидара на длине волны 532 нм для рассматриваемого периода представлены на рис. 6.

Показаны вертикальные профили коэффициента обратного рассеяния и лидарного отношения (для сравнения приведены данные, полученные 4 июля в фоновых условиях). Аэрозольные структуры нижнего 4-км слоя тропосферы в промежутке 17–21 июля, т.е. в период поступления дымовых примесей,



a



b

Рис. 4. Траектория движения воздушных масс (*a*) и картина задымления атмосферы над Томским регионом (*b*) 21 июля 2006 г. по данным спутника TERRA-MODIS

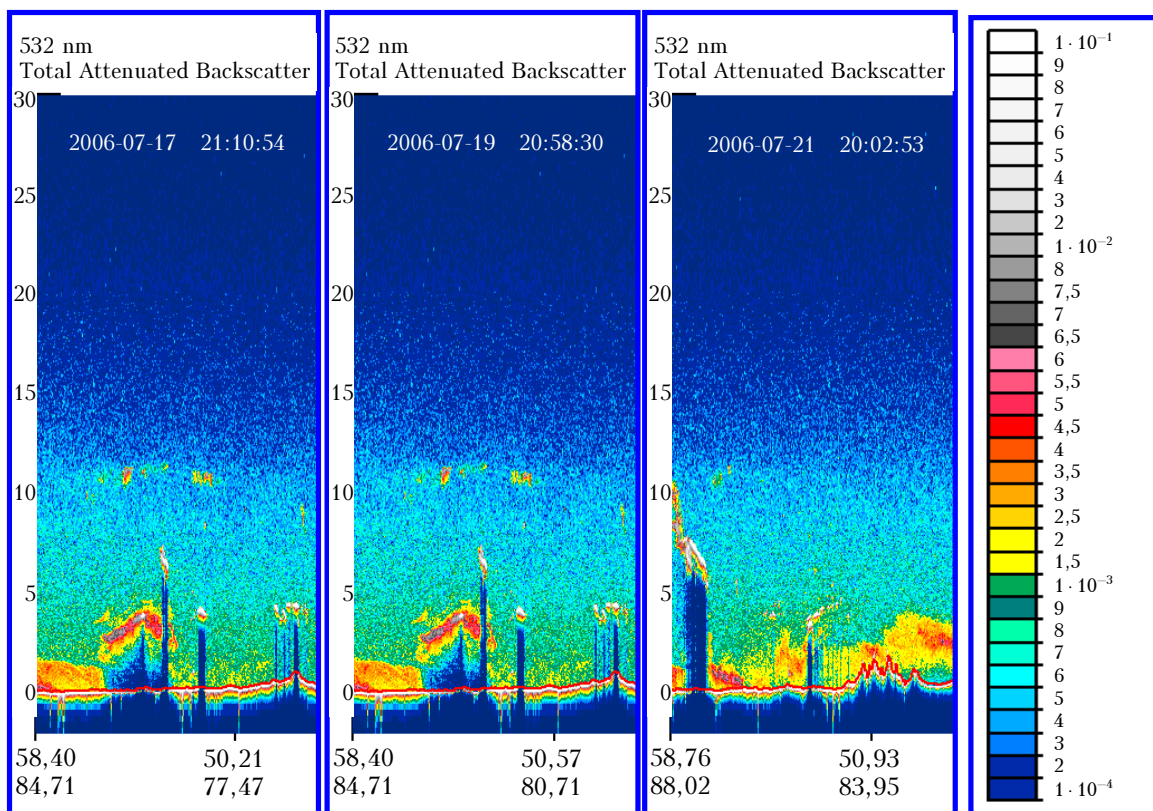


Рис. 5. Динамика развития дымового облака над Томским регионом в период 17–21 июля 2006 г. по данным космического лидара «CALIPSO». Ось абсцисс: верхняя строка – широта, нижняя – долгота. В правой части цветовая шкала градаций значений коэффициента обратного рассеяния, $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Время измерений в системе UTC

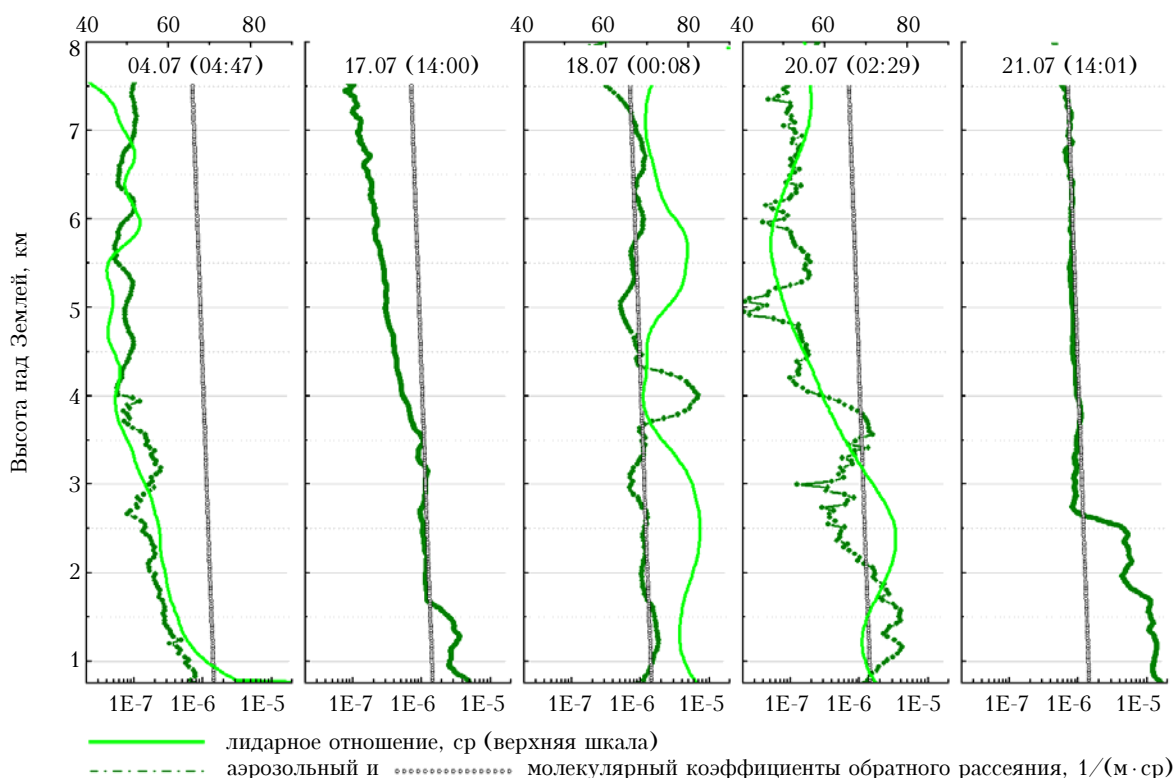


Рис. 6. Динамика изменения вертикальных профилей оптических параметров над г. Томском в период лесных пожаров в июле 2006 г.; использованы данные лидара ЛОЗА-S

существенно отличаются от аэрозольных структур 4 июля. Если в начальный период (17–19 июля) основное наибольшее количество аэрозольных частиц наблюдалось в высотном интервале 2–4 км в виде отдельных слоев, то 21 июля произошло максимальное заполнение пограничного слоя примесью до высоты 2,5 км, а также равномерное заполнение аэрозолем тропосферы. Для последнего дня, по данным из сайта AERONET, значение оптической толщи всей атмосферы ($\lambda = 500$ нм) достигает 1,32 и более чем в 3 раза превышает указанную величину для начального периода эксперимента (17.07.2006).

По лидарным данным для этих дней отличие еще более значительно, если брать во внимание нижний 2,5-км участок атмосферы. Отношение аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния на верхней границе выделенного высотного диапазона достигает 5-кратного размера. В среднем значения коэффициента обратного рассеяния для рассматриваемого периода дымового заполнения нижней тропосферы (1–3 км) изменяются в пределах $1\text{--}10 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, что согласуется с результатами других наблюдений.

Интересно также сопоставить данные по лидарному отношению, значение которого характеризует микроструктурные изменения параметров аэрозоля и не зависит от концентрации частиц. Этот оптический параметр измерялся только в ночное время суток, поскольку рассчитывался на основе сигналов рамановского канала лидара [34]. Для фоновой атмосферы (04.07.2006) его значение лежит в диапазоне 50–55 ср, в то время как для «дымовых» участков атмосферы, представленных наблюдениями 18 и 20 июля, величина лидарного отношения возрастает до 75–80 ср. Несколько меньшие значения получены в [36], но тенденция в различиях сохраняется. Поэтому наряду со степенью деполяризации излучения величина лидарного отношения является одним из основных информационных признаков селекции дымового аэрозоля. В целом результаты всех наземных средств (лидар, AERONET, базовый фотометр) удовлетворительно согласуются между собой.

То же самое можно отнести к сопоставлению данных наземного и космического лидаров, которые представлены на сайте http://calipsovalidation.hamptonu.edu/Data_Catalog/ (требуется пароль пользователя).

Представленный эпизод совместных наблюдений отчетливо демонстрирует возможности современных лидарных технологий. В совокупности с фотометрическими и многоволновыми лидарными наблюдениями это делает обоснованной постановку задачи о восстановлении вертикальных профилей микроструктуры аэрозольных частиц [35–38].

В заключение хочется поблагодарить коллективы 10-го отдела СКБ НП «Оптика» СО АН СССР и лаборатории ЛОЗА ИОА СО РАН за большой вклад в создание космического лидара «БАЛКАН».

Необходимо также отметить, что исследования в области лазерного зондирования постоянно поддерживались и поддерживаются как Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 94-05-16461; 98-05-64066; 02-05-64486; 05-05-39014; 05-

05-97240; 06-05-89500; 07-05-91102, 07-05-00672), так и международными научными фондами (CRDF № RG2-2357; CRDF № RG-2871; INTAS № 01-0239; ISTC № B-1063; TNSC № RP06N06).

1. *McDermid S. and the NDACC Lidar Working Group.* Lidar and the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC, FORMERLY NDSC) // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd Int. Laser Radar Conf. 2006. Nara. Japan. P. 665–666.
2. *Welton E.J., Campbell J.R., Berkoff T.A., Spinhirne J.D., Tsay S.-Ch., Holben B., Shiobara M.* The Micro-pulse Lidar Network (MPL-Net) // Reviewed and Revised Papers Presented at the 21st Int. Laser Radar Conf. 2002. Quebec. Canada. P. 285–288.
3. *Pappalardo G., Bösenberg J., Amodeo A., Ansmann A., Apituley A., Balis D., Böckmann Ch., Chaikovsky A., Comeron A., Freudenthaler V., Hansen G., Mitev V., Papayannis A., Perrone M.R., Pietruczukl A., Pujadas M., Ravetta F., Rizi V., Simeonov V., Spinelli N., Stoyanov D., Trickl Th., Wiegner M.* European aerosol research lidar network – advanced sustainable observation system (EARLINET-ASOS) // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd Int. Laser Radar Conf. 2006. Nara. Japan. P. 667–670.
4. *Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Aoki K., Hagiwara N., Liu Z., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arao K., Shon B.-J., Won J.-G., Yoon S.-C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y.* Ground-Based Network Observation of Asian Dust Events of April 1998 in East Asia // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 16. P. 18346–18359.
5. *Hoff R.M., McCann K.J., Demoz B., Rechartd J., Whiteman D.N., McGee T., McCormick M.P., Philbrick C.R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E.* Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM // Reviewed and Revised Papers Presented at the 21st Int. Laser Radar Conf. 2002. Quebec. Canada. P. 281–284.
6. *Antuña J.C., Andrade M., Landulfo E., Clemesha B., Quel E., Bastidas A.* Building a Lidar network in Latin America: Progress and Difficulties // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd Int. Laser Radar Conf. 2006. Nara. Japan. P. 673–676.
7. *Chaikovsky A., Ivanov A., Balin Yu., Elmikov A., Tulinov G., Plusnin I., Bukin O., Chen B.* CIS-LiNet-Lidar Network for monitoring aerosol and ozone in CIS regions // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd Int. Laser Radar Conf. 2006. Nara. Japan. P. 671–672.
8. *Browell E.V.* NASA Shuttle atmospheric lidar working group study // Conf. abstracts 9th Int. Laser Radar Conf. 1979. Munich. P. 176–177.
9. *Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P.* Initial results from CALIPSO // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd Int. Laser Radar Conf. 2006. Nara. Japan. P. 991–994.
10. *Balin Yu.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V., Zuev V.E., Efimkin V.I., Il'ichevskii V.S., Mel'nikov V.E., Samokhalov I.V., Sobolev V.N., Tikhomirov A.A.* Spaceborne Aerosol Lidar «BALKAN-1» // Abstracts of papers 15 Int. Laser Radar Conf. Tomsk, 1990. Part I. P. 12–14.
11. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зюев В.Е., Мельников В.Е., Самойлова С.В., Тихомиров А.А.* Российский космический лидар «БАЛКАН» // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 1332–1343.
12. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Мельников В.Е., Тихомиров А.А.* Комплекс наземной контрольно-проверочной аппаратуры для российского космического лидара

- «БАЛКАН-1» // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 3. С. 359–366.
13. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В.* Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности земли лидаром «БАЛКАН» // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 353–359.
 14. *Platt C.M.R., Winker D.M., Vaughan M.A., Miller S.D.* Backscatter-to-extinction ratios in the top layers of tropical mesoscale convective systems and in isolated cirrus from LITE observations // *J. Appl. Meteorol.* 1999. V. 38. Is. 9. P. 1330–1345.
 15. *Young S.A.* The Hybrid extinction retrieval algorithms (HERA) for analysis of lidar data from space // CSIRO Atmospheric Research Technical Paper (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Collingwood, Victoria, Australia). 2002. N 54. P. 3–28.
 16. *Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В.* Оценка сигналов орбитального лидара при зондировании слоистых облаков // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 6. С. 77–83.
 17. *Bissonnette L.R., Brusaglioni P., Ismaelli A., Zaccanti G., Cohen A., Benayahu Y., Kleiman M., Egert S., Flesia C., Schwendimann P., Starkov A.V., Noormohammadian M., Oppel U.G., Winker D.M., Zege E.P., Katsev I.L., Polonsky I.N.* LIDAR multiple scattering from clouds // *Appl. Phys. B.* 1995. V. 60. P. 355–362.
 18. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. N 5. P. 1609–1613.
 19. *Kovalev V.A.* Lidar measurements of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. N 30. P. 6053–6065.
 20. *Zege E.P., Katsev I.L., Polonsky I.N.* Analytical solution to lidar return signals from clouds with regard to multiple scattering // *Appl. Phys. B.* 1995. V. 60. P. 345–353.
 21. *Ruppersberg G.H., Kerscher M., Noormohammadian M., Oppel U.G., Renger W.* The influence of multiple scattering of lidar returns by cirrus clouds and an effective inversion algorithm for the extinction coefficient // *Beitr. Phys. Atmos.* 1997. V. 70. P. 93–105.
 22. *Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Наац И.Э.* Теоретические аспекты проблемы лазерного зондирования облаков // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 3–33.
 23. *Platt C.M.R.* Remote sounding of high cirrus clouds. III: Monte-Carlo calculations of multiple-scattered lidar returns // *J. Atmos. Sci.* 1981. V. 38. Is. 1. P. 156–167.
 24. *Balin Yu.S., Samoilova S.V., Krekova M.M., Winker D.M.* Retrieval of cloud optical parameters from space-based backscatter lidar data // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 30. P. 6365–6373.
 25. *Winker D.M.* Accounting for multiple scattering in retrievals from space lidar // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5059. P. 128–139.
 26. *Samoilova S.V., Balin Yu.S., Krekova M.M., Winker D.M.* Method for reconstructing the atmospheric optical parameters from the data of polarization lidar sensing // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. N 17. P. 3499–3509.
 27. *Renger W., Kiemle C., Schreiber H.-G., Wirth M., Moerl P.* Airborne Backscatter Lidar Measurements at 3 Wave-lengths during ELITE // Final Results Workshop Proc. (IROE-CNR, Florence, Italy). 1995. P. 15–30.
 28. *Oppel U.G.* A hierarchy of models for lidar multiple scattering and its applications for simulation and analysis of spaceborne lidar returns // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4341. P. 237–250.
 29. *Davis A.B., Love S.P., Cahalan R.F., McGill M.J., Winker D.M., Vaughan M.A.* Progress in Off-Beam Cloud Lidar: From Night to Day, From Ground to Air and Beyond // 21 Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences: Proc. Part II. Quebec, Canada, 2002. P. 499–501.
 30. *Ansmann A., Wandinger U., Reibessel M., Weitcamp C., Michaelis M.* Independent measurements of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. N 33. P. 7113–7131.
 31. *Самойлова С.В., Крекова М.М.* Методы восстановления оптических параметров атмосферы по данным зондирования поляризационным лидаром. Часть 2. Проблемы априорной неопределенности при выборе матрицы рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 10. С. 914–922.
 32. *Fletcher P.A., Attema E.* ELITE-94: The European Lidar In-space Technology Experiment campaign overview // Final Results Workshop Proc. (IROE-CNR, Florence, Italy). 1995. 109 p.
 33. *Caïm:* QPQ validation website <http://calipsovalidation.hamptonu.edu>.
 34. *Samoilova S.V., Balin Yu.S., Ershov A.D., Kokhanenko G.P., Penner I.E.* Stationary multiwavelength lidar LOSA-S for the study of the troposphere: technique for data interpretation // Int. workshop ISTC «BAIKAL-2006»: Proc. Irkutsk, Russia, 2006. P. 57–59.
 35. *Mattis I., Muller D., Ansmann A., Wandinger U., Murayama T., Damoah R.* Siberian forest-fire smoke observed over central Europe in spring/summer 2003 in the Framework of EARLINET // Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd Int. Laser Radar Conf. 2004. Matera. Italy. P. 857–860.
 36. *Murayama T., Wada K., Müller D., Tsukamoto T.* Optical characteristics of dust and smoke aerosols observed with multi-wavelength raman lidar in Tokyo // Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd Int. Laser Radar Conf. 2004. Matera. Italy. P. 365–368.
 37. *Lee Ch.H., Kim J.H., Park Ch.B., Shimizu A., Matsui I., Sugimoto N.* Continuous measurements of smoke of Russian forest fire by 532/1064 nm mie scattering lidar at Suwon, Korea // Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd Int. Laser Radar Conf. 2004. Matera. Italy. P. 535–538.
 38. *Chaikovsky A., Bril A., Barun V., Dubovik O., Holben B., Thompson A., Goloub P., Sobolewski P.* Studying altitude profiles of atmospheric aerosol parameters by combined multi-wavelength lidar and sun sky radiance measurements // Revised Papers Presented at the 22nd Int. Laser Radar Conf. 2004. Matera. Italy. P. 345–348.

Yu.S. Balin, S.V. Samoilova, I.E. Penner. **Space and below-satellite laser sensing of aerosol and cloud fields of troposphere.**

The activity of the Institute of Atmospheric Optics in the sphere of space instrument designing with the first Russian lidar «BALKAN» of the orbital station «Mir» as an example, in creation of methods for interpreting data of space laser sensing of crystalline and water cloud formations is described. The results of observation of troposphere in the period of forest fires in 2006 year with the use of the ground-based lidar «LOSA-S» (IAO SB RAS) and space lidar CALIPSO (USA) are presented.