

## Совместные исследования структуры пограничного слоя атмосферы на основе лидарных и содарных измерений

А.П. Камардин, Г.П. Коханенко, И.В. Невзорова, И.Э. Пеннер\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 18.02.2011 г.

Представлены результаты совместных наблюдений пространственно-временной трансформации аэрозольных и температурно-ветровых полей с помощью лидара упругого рассеяния «ЛОЗА-С» и содара «Волна-4». Полученные данные свидетельствуют о совпадениях и различиях в динамике аэрозольной концентрации и температурных флуктуаций на различных высотах в условиях процессов конвективного обмена в атмосферном пограничном слое.

*Ключевые слова:* лидар, содар, аэрозоль, температурные неоднородности; lidar, sodar, aerosol, temperature fluctuations.

### Введение

Динамические процессы в пограничном слое тропосферы во многом определяются типом ее стратификации. Атмосферный аэрозоль является хорошим трассером воздушных движений, позволяющим визуализировать воздушные потоки и стратификацию. При устойчивой стратификации аэрозольные слои концентрируются под слоем температурной инверсии, при развитии конвекции происходит перемешивание аэрозоля по всему пограничному слою атмосферы восходящими и нисходящими потоками воздуха. Аэрозольные лидары, регистрирующие упругое рассеяние на выбранной длине волны (как правило, 532 нм), позволяют наблюдать положение и динамику развития аэрозольных слоев, а также их внутреннюю структуру [1–3].

Вне зависимости от сезона накопление аэрозоля происходит в первую очередь во внутреннем слое перемешивания (ВСП), в образовании которого основную роль играют механизмы турбулентного теплообмена [4]. Именно в таком слое проявляются интенсивные турбулентные пульсации температуры, регистрируемые акустическим локатором (содаром). Это позволяет исследовать с помощью содаров изменения в течение суток высоты ВСП, отслеживать конвективные потоки [5]. Известны и работы по совместному применению лидаров и содаров, показывающие качественное согласие наблюдаемой структуры ВСП [6, 7].

Методы определения высоты ВСП лидаром и содаром основаны на различных принципах, по-

этому измеренные высоты могут незначительно различаться [8]. Есть основания полагать, что аэрозоль в некоторых случаях может вести себя как пассивная примесь, например при формировании стратифицированных слоев. В особенности это относится к восходящим конвективным движениям, которые вызывают занос аэрозоля в верхние слои пограничного слоя, но образующиеся при этом аэрозольные облака демонстрируют скорее горизонтальное, чем вертикальное движение [2, 9].

Конвективный теплообмен характеризуется квазипериодическим формированием «термиков» — всплывающих под действием сил плавучести «перегретых» областей приземного слоя воздуха в форме «струй» или «облаков». Только лидарные исследования подобных мелкомасштабных образований не дают полного ответа об их природе и особенностях формирования в силу отсутствия очень важной информации о поле ветра — как вертикального, так и горизонтального. Акустическое зондирование способно предоставить такую информацию. «Термики» обладают повышенной дисперсией температурного поля и надежно фиксируются содаром в виде эхограмм (высотно-временных профилей мощности сигналов). Скорость и направление перемещения этих областей над точкой наблюдения также измеряются содаром. Полученные таким образом сведения о движении воздушных масс могут быть сравнены с видимыми (по лидарным данным) изменениями формы и высоты аэрозольных струй.

Такая же информация о горизонтальном и вертикальном ветре необходима при исследовании волнообразных структур, наблюдающихся на границе ВСП [2, 9]. Подобные структуры с интенсивными температурными флуктуациями, связанные с развитием внутренних гравитационных волн, эпизодически отмечаются и в содарных исследованиях [10, 11].

\* Андрей Павлович Камардин (kap136@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).

Совместные лидарные и содарные исследования могут дать ценную информацию о возникновении и структуре подобных волн во всем пограничном слое атмосферы.

В статье представлены эпизоды совместных лидарно-содарных наблюдений в условиях ярко выраженной конвекции (весенний период), а также при устойчивой стратификации пограничного слоя (зимний период). На основе полученных результатов была опробована методика совместного анализа лидарных и содарных данных. Основная цель работы заключалась в исследовании согласованности изменения концентрации аэрозоля на разных высотах в дневное и вечернее время и процессов теплообмена в пограничном слое атмосферы при различных типах стратификации.

### Экспериментальные данные

В статье описывается ряд совместных наблюдений за высотнo-временной трансформацией концентрации аэрозоля (лидар «ЛОЗА-С») и структурой температурно-ветрового поля (содар «Волна-4»).

Лазерные локаторы (лидары), регистрирующие сигнал упругого рассеяния, позволяют отслеживать положение и динамику развития аэрозольных слоев, а также их внутреннюю структуру, поскольку скорректированный на квадрат расстояния сигнал пропорционален коэффициенту обратного рассеяния аэрозоля  $\beta_p$ . Если микроструктура аэрозоля в течение цикла измерений меняется незначительно, то в рамках задачи мы можем полагать  $\beta_p$  пропорциональной объемной концентрации аэрозоля. Акустические локаторы (содары) измеряют величину звукового сигнала, рассеянного на флуктуациях температуры, и таким образом позволяют отслеживать температурные неоднородности (сигнал пропорционален дисперсии температуры воздуха). Используя комбинацию из трех разнонаправленных антенн, можно получать информацию о направлении и скорости (в том числе вертикальной) ветра.

Основные характеристики локаторов были следующими. В лидаре «ЛОЗА-С» [12] используется излучение длиной волны  $\lambda = 532$  нм, частота повторения импульсов 10 Гц, энергия 170 мДж. Диаметр приемного телескопа составлял 300 мм. Сигнал оцифровывался с частотой 50 МГц, что соответствует пространственному разрешению 6 м. Диапазон расстояний до 20 км, хотя в совместных измерениях используется только ближний интервал от 40 до 1000 м.

В содаре «Волна-4» использовалась несущая частота 1700 Гц при длительности зондирующего импульса 150 мс. Диапазон уверенного приема сигнала в период совместных измерений зависел от типа стратификации и достигал 300–600 м. Шаг по высоте при оценках характеристик атмосферы составлял 5 м, период послышки зондирующих импульсов в проведенных измерениях составлял 15 с. Описание работы содаров серии «Волна» представлено в работах [13, 14].

В исследованных ситуациях с преобладающей конвекцией доступный для анализа интервал высот

заключался в пределах от 40 м (минимально возможная высота получения лидарных сигналов) до 200–300 м (максимальные высоты подъема термических структур, зарегистрировавшихся содаром). Максимально доступная скорость совместного получения данных составила 15 с (скорость получения одного высотного профиля содаром). Сигналы лидара усреднялись по 32 импульсам, что составляет 3,2 с. На фиксированных высотах проводилось сопоставление временного хода нормированных дисперсий температуры и концентраций аэрозоля.

Для четырех эпизодов дневного времени (24 апреля, 28 мая, 10 октября 2009 г. и 25 мая 2010 г.) характерно наличие квазипериодических изменений контролируемых параметров. При этом отмечается определенная согласованность этих изменений. Однако синхронность нарастания (или убывания) дисперсии температуры и концентрации аэрозоля, которая должна наблюдаться при «классическом» механизме выноса аэрозоля из приземного слоя «термиком» в верхние слои атмосферы, реализуется не всегда. Имеют место эпизоды, когда нарастание концентрации аэрозоля несколько отстает по времени от нарастания дисперсии температуры и наоборот. В качестве примера на рис. 1 приведена запись сигналов, полученных 24 апреля 2009 г.

Рис. 1, *a* (см. вклейки) показывает в условной цветовой шкале структуру аэрозольной концентрации, полученной лидаром с периодом 3,2 с, рис. 1, *б* – амплитуды сигналов лидара и содара на срезе 150 м. Метеорологические данные в период измерений: средняя (горизонтальная) скорость ветра на данной высоте около 6 м/с, среднее направление ветра на данной высоте 148°. Средние значения в приземном слое: температура +16 °С, скорость ветра 3,1 м/с, направление ветра 126°.

Характерными образованиями, проявляющимися на лидарных записях при выраженной конвекции, являются струи, переносимые ветром через вертикаль лидара. Струи имеют горизонтальный масштаб в десятки–сотни метров и простираются до высот 200–1000 м и выше. Довольно часто из-за увеличения скорости ветра с высотой струи наклонены вперед (влево на лидарной записи), и верхняя часть струи пересекает вертикаль раньше, чем нижняя. Полученная содаром запись вертикальной компоненты скорости ветра (рис. 1, *в*) показывает, что в большинстве случаев вертикальные аэрозольные струи соответствуют восходящим ветровым потокам ( $W > 0$ ).

Согласно рис. 1 (и подобным графикам за другие дни) изменения концентрации аэрозоля и дисперсии температуры формируются под влиянием нескольких процессов, различных по своему масштабу: на фоне «медленных» изменений параметров имеют место процессы с более «быстрыми» периодами. Для выделения этих процессов был использован спектральный анализ. Вычислялись авто- и взаимные спектры исследуемых параметров для фиксированных высот наблюдений (далее используются обозначения:  $G_{AT}$  – взаимный спектр концентрации аэрозоля и дисперсии температуры,  $G_T$

и  $G_A$  — автоспектры дисперсии температуры и концентрации аэрозоля соответственно). На рис. 2 (см. вклейки) представлены авто- и взаимный спектры концентраций аэрозоля и дисперсии температуры по измерениям 24.04. 2009 г. на высоте 150 м.

В соответствии с рис. 2 спектры  $G_{AT}$  и  $G_T$  практически идентичны по форме. Это говорит о том, что значимые изменения дисперсии температуры приводят к существенным изменениям концентрации аэрозоля. Несколько иная картина наблюдается при сопоставлении спектров  $G_{AT}$  и  $G_A$ . Здесь наряду с согласованными изменениями прослеживаются и «внешние» потоки аэрозоля, не связанные с термическими флуктуациями. Естественно предположить, что «внешние» потоки аэрозоля обусловлены адвекцией, которая заносит дополнительное количество аэрозоля в зону наблюдения из удаленных областей, не охваченных процессами генерации и разрушения наблюдаемых содаром термических структур.

Для анализа синхронности процессов разных масштабов применялась цифровая полосовая фильтрация (ЦПФ), выделяющая из общей совокупности вариаций исследуемых параметров только нужные масштабы. Анализ полученных результатов подтвердил вывод, что не всегда развитие «термика» сопровождается синхронным повышением концентрации аэрозоля на контролируемой высоте. Установлено, что может появиться значительное рассогласование по фазе экстремумов исследуемых функций, включая режим полной противофазы. В качестве примера на рис. 1, *г* приведены графики изменения во времени концентрации аэрозоля и дисперсии температуры после применения ЦПФ к «медленным» и «быстрым» вариациям. При вычислениях использовались выборки, нормированные на свои максимумы. Для измерений 24.04.2009 синхронность изменения исследуемых параметров в «медленных» и «быстрых» полосах достаточно высокая на протяжении всего периода наблюдений. Примеры отклонений от синхронности изменений приведены на рис. 3 (см. вклейки) (даты и высоты измерений, а также полосы ЦПФ указаны в подписи).

Еще один пример совместных наблюдений при устойчивой стратификации (27.01.2010) приведен на рис. 4 (см. вклейки).

В данном случае основная масса аэрозоля, «запертая» сверху инверсией, равномерно распределена в слое перемешивания до высоты 450–500 м и весь этот слой уверенно регистрируется содаром. Волнообразная верхняя граница слоя с развитыми температурными флуктуациями выделена на рис. 4, *б* тонкой линией и продублирована на записи лидарного сигнала (рис. 4, *а*). Видно, что эта граница достаточно хорошо соответствует нижней границе неплотного облачного слоя на высотах 550–650 м. Можно предположить, что флуктуации температуры затухают на уровне выраженной температурной инверсии, характерной для слоя облакообразования.

### Заключение

В итоге можно сделать вывод, что при конвективных потоках концентрация аэрозоля и порож-

даемая «термиками» дисперсия температуры воздуха связаны общими процессами. При этом одновременно могут действовать несколько разномасштабных (и, возможно, разнонаправленных) процессов, которые можно разделить на две группы:

а) вынос аэрозоля «термиком» из приземного слоя и замещение его чистым холодным воздухом;

б) замещение холодным воздухом с высокой концентрацией аэрозоля всплывающих «термиков» с невысокой концентрацией аэрозоля.

Представленные данные являются лишь первым опытом совместных наблюдений аэрозольных и температурно-ветровых полей. В дальнейшем предполагается проведение подобных исследований в ситуациях, связанных с выраженными конвективными потоками и образованием внутренних гравитационных волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-00347-а), проекта президиума РАН № 4.1, проекта ОФН РАН № 3.10.1, Минобрнауки (госконтракт № 14.740.11.0204; 02.740.11.0674).

1. *Boselli A., Armenante M., D'Avino L., D'Isidoro M., Pisani G., Spinelli N., Wang X.* Atmospheric Aerosol Characterization Over Naples During 2000–2003 EARLINET Project: Planetary Boundary-Layer Evolution and Layering // *Boundary-Layer Meteorol.* 2009. V. 132, N 1. P. 151–165.
2. *Martucci G., Matthey R., Mitev V., Richner H.* Frequency of boundary-layer-top fluctuations in convective and stable conditions using laser-remote sensing // *Boundary-Layer Meteorol.* 2010. V. 135, N 2. P. 313–331.
3. *Пермяков М.С., Букин О.А., Ильин А.А., Маричев В.Н., Нагорный И.Г.* Структура атмосферного конвективного слоя в тропической зоне Индийского океана по данным лидарного зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 1–2. С. 134–138.
4. *Белан Б.Д.* Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
5. *Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В.* Определение высоты внутреннего слоя перемешивания по измерениям содаров серии «Волна» // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 12. С. 1154–1159.
6. *Lokoshchenko M.A., Gorchakov G.I., Shishkov P.O.* Simultaneous sodar and lidar observations in Moscow // *Proc. of 11<sup>th</sup> ISARS.* Rome. 2002. P. 307–310.
7. *Кауль Б.В., Красненко Н.П., Краснов О.А., Фурсов М.Г.* Совместные лидарно-акустические наблюдения трансформации аэрозоля и динамики температурных инверсий // VI Всесоюз. симпоз. по лазерн. и акуст. зондированию атмосферы: Тез. докл. Томск, 1980. С. 22–25.
8. *Emeis S., Munkel C.* Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS and ceilometer measurement // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38, N 2. P. 273–286.
9. *Balin Yu.S., Kamardin A.P., Kokhanenko G.P., Nevzorova I.V., Odintsov S.L.* Joint lidar and sodar observation of the boundary layers // *Proc. the 25 ILRC.* 2010. P. 419–422.
10. *Petenko I., Mastrantonio G., Viola A., Argentini S., Pietroni I.* Wavelike vertical motions in the ABL observed by sodar // *Proc. Int. Sympos. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing.* Paris, June 2010. URL: <http://www.isars2010.uvsq.fr>
11. *Одунцов С.Л.* Особенности движений нижнего слоя атмосферы при прохождении внутренних гравитаци-

- онных волн // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 12. С. 1131–1136.
12. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным много-частотного лазерного зондирования. Ч. 1. Методы восстановления оптических параметров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 344–357.
13. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А.* Акустический доплеровский содар «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 5. С. 437–444.
14. *Одинцов С.Л.* Исследования атмосферного пограничного слоя методами локальной и дистанционной акустической диагностики в ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 981–987.

*A.P. Kamardin, G.P. Kokhanenko, I.V. Nevzorova, I.E. Penner.* **Joint lidar and sodar investigations of the atmospheric boundary layers.**

Using the LOSA-S lidar and three-channel Doppler Volna-4 sodar, we performed joint observations of the altitude-temporal transformation of aerosol concentration and structure of temperature-wind field. Data are obtained on the co-ordination or differences in the dynamics of aerosol concentration at different altitudes at daytime and the processes of convective heat exchange in the atmospheric boundary layer.