

М.С. Пермяков\*, О.А. Букин\*\*, А.А. Ильин\*\*, В.Н. Маричев, И.Г. Нагорный\*

## Структура атмосферного конвективного слоя в тропической зоне Индийского океана по данным лидарного зондирования

\* Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичёва,

\*\* Морской государственный университет им. Г.И. Невельского, г. Владивосток  
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 4.10.2004 г.

Приведены результаты лидарного зондирования нижней атмосферы в тропической зоне Индийского океана. Анализ лидарных данных позволил восстановить и интерпретировать высотную структуру, а также проследить его эволюцию в ночное время. Показано, что относительная временная изменчивость лидарных сигналов позволяет выделять в конвективном атмосферном пограничном слое уровень конденсации и инверсионный слой, которым соответствуют ее максимальные значения в вертикальном ходе. Ход отклонений от сглаженных по времени сигналов лидарного зондирования выявляет в окрестности облаков характерные зоны с пониженными отрицательными значениями, которые можно интерпретировать как зоны нисходящих движений или области вовлечения воздуха из свободной атмосферы над инверсией. При этом прослеживается связь аномалий сигналов в приповерхностном слое 100–300 м и на вышележащих уровнях.

### Введение

Над тропическими районами океанов в невозмущенных синоптических погодными системами условиях обычно наблюдается хорошо выраженный в вертикальной структуре метеорологических элементов конвективный атмосферный пограничный слой (АПС), который ограничен сверху сравнительно тонким устойчивым инверсионным слоем. Вертикальные масштабы и структура АПС, ее временная изменчивость в значительной мере определяют процессы взаимодействия океана и атмосферы, термогидродинамические процессы в средней и верхней атмосфере. Характеристики АПС в тропических широтах океанов в значительной мере определяют развитие интенсивных погодных систем в тропиках – тропических циклонов, и климат на всей Земле. Поэтому АПС над тропическими океанами с 50-х гг. XX в. является объектом интенсивных инструментальных, теоретических исследований и численного моделирования.

Большая часть данных по структуре АПС над океанами получена прямыми измерениями с использованием стандартных метеорологических зондов, имеющих ограниченное вертикальное и временное разрешение. В последние десятилетия все шире для исследований структуры и динамики планетарных пограничных слоев применяются лидарные методы [1–5]. Однако они, как правило, ограничиваются стационарными станциями на материках или побережье. Лидарные измерения в открытом океане немногочисленны и случайны. Среди имеющихся работ следует упомянуть комплексные работы по проекту INDOEX [6], прове-

денные в период зимнего муссона (январь–март 1999 г.) в Индийском океане, в которых представлены результаты по метеорологическим, оптическим, аэрозольным характеристикам атмосферы над тропическим океаном, включая результаты лидарных измерений.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты судовых лидарных измерений, проведенных в тропиках северной части Индийского океана в кругосветном плавании парусного учебного судна «Надежда» в марте 2003 г.

### Описание районов измерений и аппаратуры

В настоящей статье представлены результаты, полученные при измерениях, выполненных от 5° до 10° с.ш. в Индийском океане. Маршрут экспедиции в указанном районе представлен на рис. 1.

Измерения проводились в утреннее, ночное и вечернее время суток, по ходу судна (скорость движения на этом отрезке маршрута не превышала 4 узлов). Параметры лидара: энергия лазерного излучения в импульсе 180 мДж, длина волны излучения 532 нм, длительность зондирующего импульса 5 нс, частота посылки импульсов 10 Гц, диаметр приемного объектива 30 см. Использовались 2 канала для ближней (до 8 км) и дальней зон (более 8 км). В 1-м канале регистрировался сигнал с ФЭУ-79 в интегральном режиме, сигнал поступал на 8-разрядный АЦП, минимальное пространственное разрешение 1,5 м. В данной статье приведены результаты измерений с пространственным разрешением 6 м. Во 2-м

канале сигнал с ФЭУ-136 регистрировался в режиме счета фотонов, сигнал поступал на усилитель-формирователь, а далее на счетчик фотонов. Пространственное разрешение в этом канале составляло 240 м.

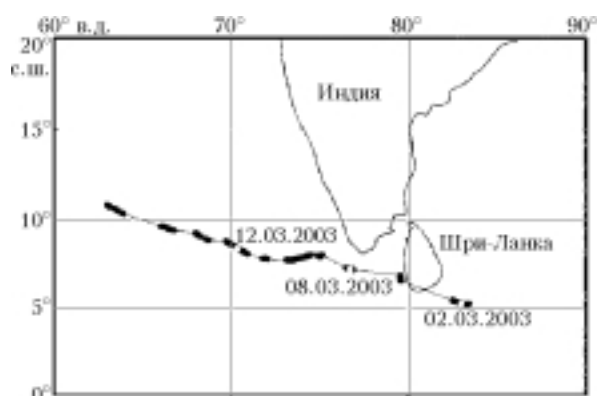


Рис. 1. Маршрут экспедиции в северной части Индийского океана (сплошная тонкая линия) и районы проведения лидарных измерений (жирные линии)

В экспедиции проводился комплекс стандартных срочных (через 6 ч) судовых метеорологических измерений давления воздуха, температур воздуха и поверхности океана, относительной влажности и скорости ветра. По данным метеорологических измерений рассчитывались основные параметры энергомассообмена в системе «океан–атмосфера», необходимые для интерпретации лидарных измерений в пограничном слое атмосферы.

В целом метеорологические условия в период экспедиционных работ определялись муссонным характером общей циркуляции атмосферы в северной части Индийского океана и не отличались от среднеклиматических условий и условий в отдельные годы [7, 8]. При этом в течение всего периода работ в этой части Индийского океана не наблюдались какие-либо значительные синоптические возмущения атмосферы. Так, в непрерывных записях атмосферного давления четко проявлялись лишь слабые колебания, связанные с полусуточными атмосферными приливами. Наблюдались характерные для этого сезона слабые ветры от 1 до 5 м/с преимущественно северо-восточного направления. Температура поверхности моря колебалась в период лидарных наблюдений в диапазоне 28–31 °С, а относительная влажность воздуха изменялась в диапазоне 70–80% при среднем значении 75%, типичном для марта в районе работ. В течение ночи разность температур вода – воздух изменялась в пределах 0,1–1,6 °С, что соответствует условиям слабой конвективной неустойчивости приводного воздуха.

## Методы анализа данных

Основными задачами обработки лидарных данных с точки зрения анализа структуры конвективного АПС являются: определение его высоты или высоты инверсии; выделение зоны вовлечения (или зоны смещения воздуха конвективного слоя и воздуха из вышележащей относительно сухой и чистой

атмосферы), высоты уровня конденсации; выделение областей с аномальными пространственно-временными характеристиками сигналов обратного рассеяния; прослеживание динамики структурных элементов АПС в ночной период.

Ключевыми параметрами при теоретическом анализе процессов в АПС и в численном моделировании являются высота (инверсии) инверсионного слоя и его толщина (или толщина слоя вовлечения). Методы их определения по лидарным данным рассмотрены, например, в [5, 9]. Однако отметим, что в этих работах выделение инверсии или зоны вовлечения проводится на вертикальном профиле (отдельном или среднем) обратного рассеяния, тогда как эти объекты являются характеристиками случайного процесса и для их выделения и количественного представления необходимо применение некоторых статистических процедур. Такой подход реализован в настоящей работе при анализе вертикального хода временной изменчивости лидарного сигнала.

Анализ структуры АПС проводился прямо по лидарным сигналам без применения для интерпретации каких-либо процедур обращения уравнения лазерного зондирования. Сигналы обратного рассеяния накапливались в «скользящем окне» (2 мин) со сдвигом окна в половину его ширины и сглаживались по вертикали фильтром с гауссовым ядром с полушириной 18 м. По всем полученным таким образом профилям в течение ночи определялся профиль минимального сигнала, относительно которого проводился анализ всех профилей. Это позволило проследить довольно тонкие детали во временном ходе вертикальных зондирований, такие как отдельные мелкие кучевые облака размером до 100 м по горизонтали, а также получить на временных масштабах окна оценки основных статистических характеристик сигналов.

Анализ структуры конвективного слоя проведен также с использованием процедур оценки временной изменчивости сигналов на определенной высоте. Временная изменчивость определялась на каждой высоте как отношение среднеквадратического отклонения сигнала к его среднему значению за определенный интервал времени. Как правило, границам слоев с аномальными условиями обратного рассеяния (аэрозольные, капельные) соответствуют локальные максимумы в высотном ходе временной изменчивости. Это позволяет выделять верхние и нижние границы облаков и, как показано ниже, даже определять высоту инверсии и уровня конденсации при отсутствии облачности. Последний практически не идентифицируется по вертикальному ходу сигнала рассеяния, так как интегральные характеристики спектров капель и, следовательно, сечение рассеяния изменяются с высотой на уровне конденсации или на нижней границе облаков очень плавно [10]. В работе [10] с учетом измеренных спектров капель показано также, что на верхней и нижних границах облаков относительная изменчивость сечения рассеяния имеет экстремальные значения, и мы используем эти факты при интерпретации лидарных данных.

Довольно тонкие детали в структуре АПС выделяются в отклонениях сигнала рассеяния от его сглаженного по времени хода. Анализ таких отклонений позволяет выделять отдельные структурные элементы во временном ходе (или в горизонтальном направлении с учетом движения судна и ветра) и оценивать их характерные масштабы.

Рис. 2 схематично показывает структуру конвективного АПС, процесс формирования зон вовлечения [9] и поясняет происхождение аномалий во временном (или пространственном) ходе сигнала обратного рассеяния.

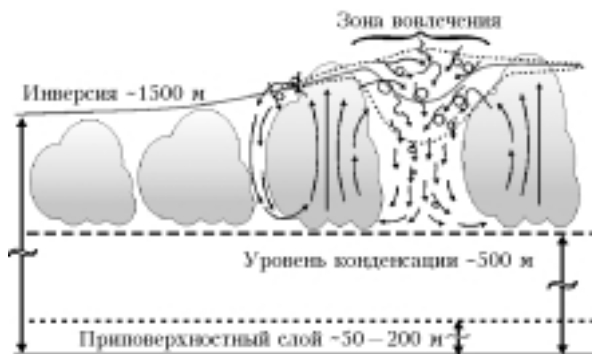


Рис. 2. Структуры атмосферного пограничного слоя над океаном и зон вовлечения

Области пониженного рассеяния (отрицательные аномалии в отклонениях сигнала) могут возникнуть в районах вовлечения относительно сухого воздуха практически без капельной влаги из свободной атмосферы выше конвективного слоя или вблизи отдельных облаков в зонах нисходящих движений, где происходит частичное испарение капель и уменьшается сигнал обратного рассеяния.

## Результаты и обсуждение

Ниже приводятся некоторые конкретные примеры применения описанного подхода к анализу ночного конвективного АПС. Из всех данных по Индийскому океану здесь приводятся лишь наиболее характерные для тропиков ситуации. В течение всех ночей, когда проводились измерения, наблюдались, как правило, низкие «рыхлые» отдельные кучевые облака или низкие слоисто-кучевые с малой оптической толщиной, при слабом ветре или штиле. Практически не наблюдались мощные кучевые облака вертикального развития, характерные для циклонических погодных систем в тропиках.

Прежде всего приведем примеры хода сигнала обратного рассеяния (относительно минимального, рис. 3,а), отклонений сигнала от сглаженного по времени (рис. 3,б) и вертикальный профиль временной изменчивости (рис. 3,в) для трехчасового фрагмента лидарных наблюдений в очень ясную ночь 8 марта, когда во время измерений визуально не наблюдались облака. Сигнал обратного рассеяния в эту ночь был сравнительно слабым, но в картине временного хода четко выделялись слои возле уровней 500 и 1700 м. Первый слой соответствует уровню

конденсации, высота которого, оцененная по температуре и влажности приводного воздуха, изменялась в пределах 390–480 м. Второй идентифицируется как слой инверсии. В профиле относительной временной изменчивости сигнала за 3 ч эти уровни четко выделяются соответствующими максимумами.

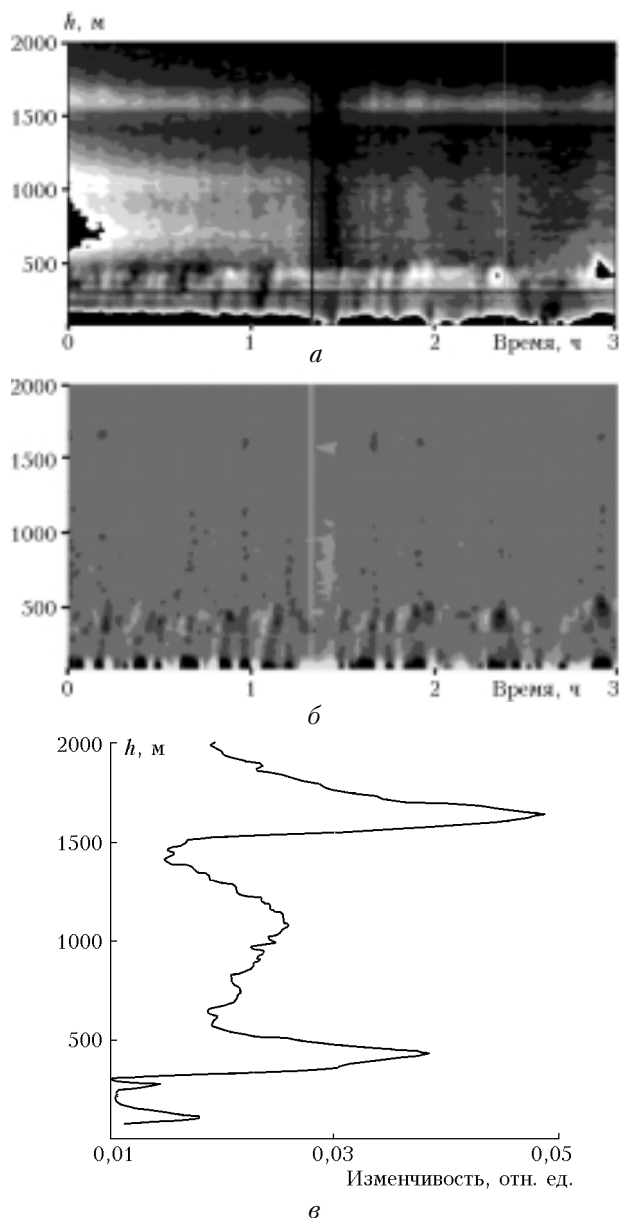
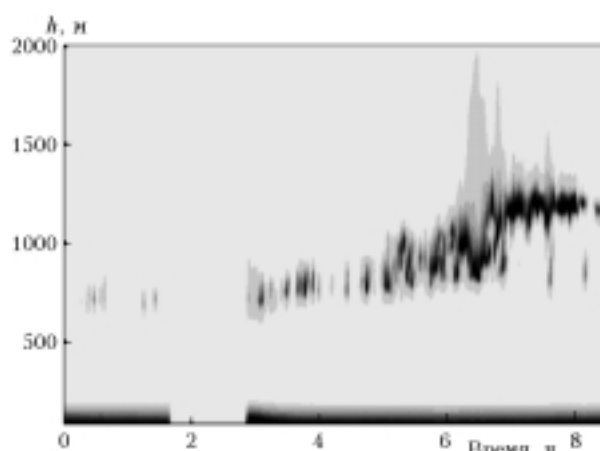


Рис. 3. Ночной ход сигнала обратного рассеяния относительно минимального (а); отклонение сигнала от сглаженного по времени (б); вертикальный профиль временной изменчивости (в)

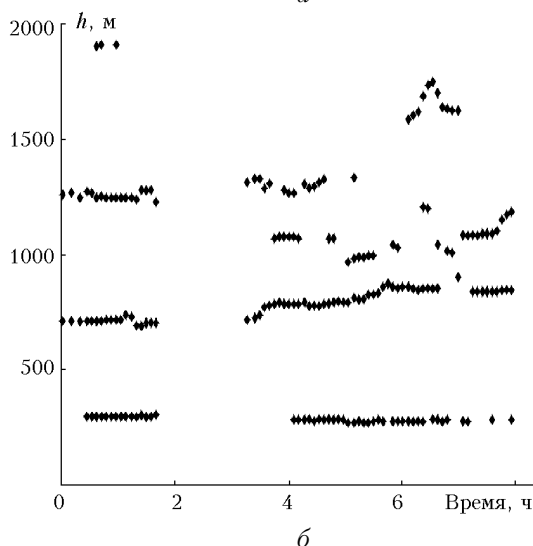
Обращает на себя внимание изменчивость сигнала в приводном слое до высот 200–300 м, которую мы связываем с конвективными процессами в воздухе над относительно теплой водой. В профиле изменчивости в этом слое также отмечается локальный максимум.

На рис. 4,а показан пример наблюдения ночного хода конвективной облачности в АПС в течение

ние ночи 12 марта в лидарном сигнале. На рис. 4,б показан ночной ход высот максимумов в изменчивости сигнала. После захода солнца радиационное охлаждение воздуха в АПС приводит к постепенному увеличению разности температур вода–воздух в течение ночи и усилению конвекции в нижнем приземном слое и во всем АПС. К концу ночи облачность охватывает слой от уровня конденсации до инверсии. Отдельные облака проникают выше инверсии. На рис. 4,а видно, что в начале ночи наблюдаются лишь отдельные полупрозрачные облака вблизи уровня конденсации (по метеоданным 610–700 м), в середине ночи вершины облаков (где обычно наблюдаются максимальные значения влажности и обратного рассеяния) достигают слоя инверсии на высоте около 1300 м.



а



б

Рис. 4. Ночной ход лидарного сигнала за 12 марта (а); соответствующий ход высот максимумов временной изменчивости (б)

Рис. 5 демонстрирует тонкую структуру конвективного слоя, проявляющуюся в отклонениях сигнала на каждом уровне от сглаженного по времени гауссовым фильтром с полушириной в 12 мин, во второй половине ночи 2 марта. Четко проявля-

ются области понижения (темные участки) сигнала рассеяния возле облаков (почти белые участки), вершины которых концентрируются возле инверсионного слоя на высотах около 1400–1500 м. Появление симметричных относительно ядра зоны повышенного рассеяния (белые области) темных областей объясняется процессами вовлечения на высотах инверсии или нисходящими движениями воздуха (см. рис. 2). Прослеживается связь облачных структур со структурами во всем АПС вплоть до приземного слоя.

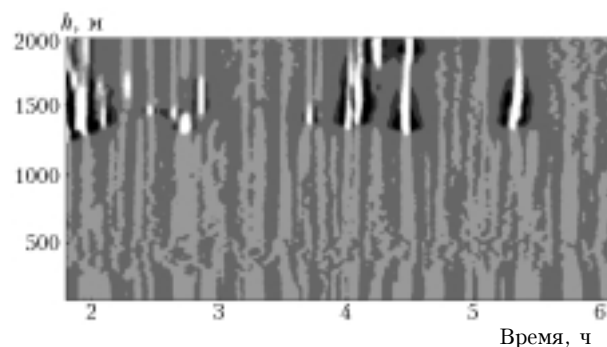


Рис. 5. Тонкая структура конвективного слоя

## Заключение

Таким образом, анализ лидарных данных позволил восстановить, интерпретировать высотную структуру АПС и проследить его эволюцию в течение ночи на акватории тропических районов Индийского океана.

Показано, что относительная временная изменчивость лидарных сигналов позволяет выделять в конвективном слое уровень конденсации и инверсионный слой, которым соответствуют ее максимальные значения в вертикальном ходе. Ход отклонений от сглаженных по времени сигналов лидарного зондирования выявляет в окрестности облаков характерные зоны с пониженными отрицательными значениями, которые можно интерпретировать как зоны нисходящих движений или области вовлечения воздуха из свободной атмосферы над инверсией. При этом прослеживается связь аномалий сигналов в приповерхностном слое 100–300 м и на вышележащих уровнях.

Работа выполнена при поддержке грантов ФЦП «Интеграция» Э013 «Дальневосточный плавающий университет», комплексного интегрального проекта СО и ДВО РАН «Экспериментальные исследования влияния космофизических и геофизических возмущений на формирование аэрозоля в средней и верхней атмосферах» и гранта РФФИ № 03-05-65219.

1. *Балин Ю.С., Еришов А.Д.* Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы в котловине оз. Байкал // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 12. № 6–7. С. 633–638.
2. *Балин Ю.С., Еришов А.Д.* Вертикальная структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по

- данным лазерного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 616–623.
3. *Kaimal J.C., Abshire N.L., Chadwick R.B. et al.* Estimating the depth of the daytime convective boundary layer // *J. Appl. Meteorol.* 1982. V. 21. P. 1123–1129.
  4. *Boers R., Eloranta E.W., Coulter R.L.* Lidar observations of mixed layer dynamics: Tests of parameterized entrainment models of mixed layer growth rate // *J. Climate and Appl. Meteorol.* 1984. V. 23. P. 247–266.
  5. *Cohn S.A., Angevine W.M.* Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars // *J. Appl. Meteorol.* 2000. V. 39. P. 1233–1247.
  6. *Ramanathan V., Crutzen P.J., Lelieveld J. et al.* Indian Ocean Experiment: An Integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106. N 22. P. 28,371–28,398.
  7. *Bhat G.S., Thomas M.A., Raju J.V.S et al.* Surface characteristics observed over the central tropical Indian ocean during INDOEX IFP99 // *Boundary-Layer Meteorol.* 2003. V. 106. P. 263–281.
  8. *Verner G.H.L., Sikka D.R., Lobert J.M., Stossmeister G., Zachariasse M.* Overview of the meteorological conditions and atmospheric transport processes during INDOEX 1999 // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106. N 22. P. 28,399–28,413.
  9. *Hageli P., Steyn D.G., Strawbridge K.B.* Spatial and temporal variability of mixed-layer depth and entrainment zone thickness // *Boundary-Layer Meteorol.* 2000. V. 97. P. 47–71.
  10. *Noonkester V.R.* Profiles of optical extinction coefficients calculated from droplet spectra observed in marine stratus cloud layers // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42. N 11. P. 1161–1171.

*M.S. Permyakov, O.A. Bukin, A.A. Ilin, V.N. Marichev, I.G. Nagornyi.* **Structure of atmospheric convective layer in tropical zone of the Indian Ocean as judged from lidar sounding data.**

The structure of the convective boundary layer was investigated by lidar sounding in the north part of the Indian Ocean. The heights of the inversion layer and condensation layer were detected. The typical zones with low values of the lidar signals deviation were detected in vicinity of clouds. These zones were interpreted as descending flows or areas of air entrainment from the free atmosphere above the inversion layer.