

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 001.576.001.572

В.А. Шлычков<sup>1</sup>, С.Л. Одинцов

Оценка параметров конвективного пограничного слоя  
атмосферы с помощью вихреразрешающей модели  
и акустического зондирования

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал), г. Новосибирск

Поступила в редакцию 16.04.2001 г.

На основе численной вихреразрешающей модели проводится изучение структуры атмосферного пограничного слоя в летнее время при суточном ходе температуры на подстилающей поверхности. Проведено сопоставление модельных расчетов с данными акустического зондирования, полученными содаром ИОА СО РАН. Показано, что модель удовлетворительно воспроизводит конвективные процессы, включая динамику толщины слоя перемешивания, амплитуды пульсаций вертикальной скорости и характерные масштабы термиков в атмосфере.

В утренние часы при радиационном нагреве подстилающей поверхности в приземном слое атмосферы происходит формирование неустойчивой стратификации. Этот процесс хорошо выражен в летнее время при малооблачной погоде и незначительной адвекции. С увеличением температуры поверхности тепловая энергия аккумулируется в нижних слоях, приводя к увеличению толщины неустойчивого слоя. Высвобождение энергии неустойчивости реализуется в виде проникающей конвекции. Всплывающие наверх термики переносят тепло в верхние устойчиво стратифицированные слои, а компенсационные нисходящие движения перемещают вышележащий холодный воздух в нагретую приповерхностную часть. Конвекция обеспечивает выравнивание вертикального перепада температур и формирование слоя перемешивания, толщина которого  $H_i$  по мере прогрева подстилающей поверхности увеличивается и может достигать 1000 м и более в зависимости от радиационного баланса, стратификации свободной атмосферы, скорости ветра и т.п.

В последние десятилетия появилась аппаратура акустического зондирования, которая оказалась эффективной при идентификации параметров атмосферного пограничного слоя (АПС). Частными примерами таких работ могут служить результаты, обсужденные в [1, 2]. Обработка отраженного звукового сигнала позволяет определить положение верхней границы слоя перемешивания, а анализ вариаций интенсивности эха дает представление о пространственных масштабах конвективных элементов – когерентных структур.

На рис. 1 показана запись высотно-временной развертки огибающей сигналов, регистрируемых трехканальным доплеровским содаром «Волна-3», разработанным и калиброванным в Институте оптики атмосферы СО РАН [3, 4]. Прибор используется для получения количественных данных об интенсивности температурных пульсаций и скорости ветра. Представленные результаты получены с канала вертикального зондирования при длительности зондирующего импульса 0,15 с и периоде оценки одного профиля скорости

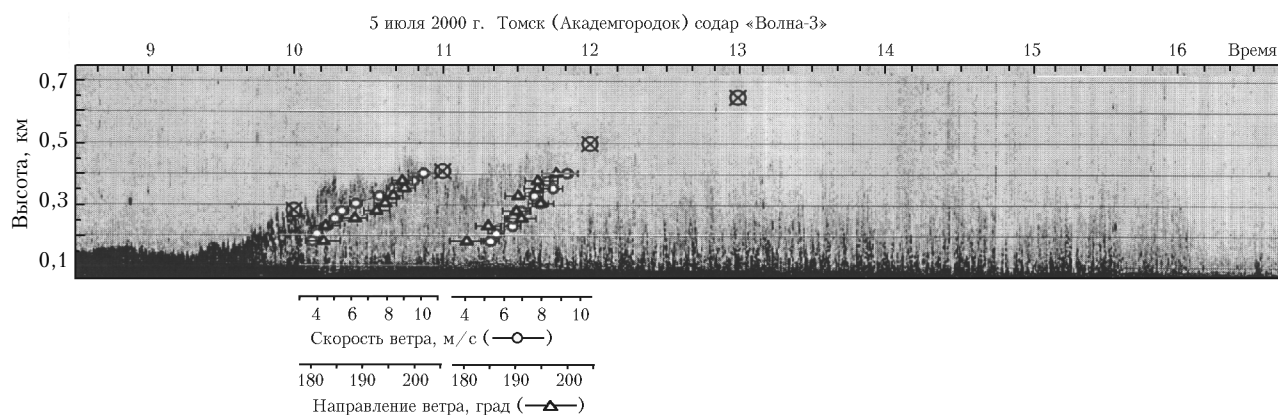


Рис. 1. Пример факсимильной записи акустического эхосигнала, включая два профиля скорости и направления ветра, осредненные за периоды 10–11 и 11–12 ч. Кружки с крестом показывают расчетную границу конвективного слоя

ветра 15 с. Содар размещался на крыше здания на высоте 12 м. На приведенной записи (ее обычно называют факсимильной записью) степень почернения связана со средней величиной температурных пульсаций в рассеивающем объеме.

Рис. 1 демонстрирует цикл распада ночной (радиационной) инверсии температуры и переход к конвективному режиму. В начальный период, примерно до 9:30, все процессы перестройки АПС происходят внутри основного турбулизованного слоя толщиной 160–180 м (отдельные темные точки и группы точек выше 250 м связаны с регистрацией содаром внешних помех от голов птиц, шума проезжающих автомашин и т.п.). Далее наблюдается нарастание толщины слоя с повышенными отражательными свойствами, отвечающего слою вовлечения на границе инверсии. При этом постепенно под инверсией развиваются конвективные процессы, связанные с образованием и всплыванием термиков (чередующиеся участки с повышенным затемнением). Примерно к 12 ч разрушение инверсии завершилось.

В соответствии со структурой факсимильной записи можно предположить, что верхняя граница температурной инверсии к моменту ее распада находилась на высоте порядка 500–550 м. С этого момента конвекция в АПС становится доминирующей. Отдельные термики достигают высоты  $H_i \approx 600$  м, но чаще ограничиваются высотами 400–450 м. Возможно, они достигают и больших высот, но пульсации температуры там настолько малы, что содар уже не способен различить их на фоне окружающих помех. Предельная чувствительность содара «Волна-3» в рассматриваемый период времени при использовании структурной характеристики температуры  $C_T^2$  как меры интенсивности температурных пульсаций составляла примерно  $5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$  (см. [4]). В начальный период (до 9:30) величина  $C_T^2$  достигала  $10^{-3} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$  (анализ велся на высотах 100–180 м). При конвективном режиме интенсивность температурных пульсаций не превышала  $C_T^2 \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$ . Следует отметить, что после 13 ч стали появляться облака, которые к концу измерений имели вид С<sub>и</sub>, С<sub>б</sub> с баллом 6–8. Кроме того, после 14 ч ветер примерно в течение 45 мин обладал высокой порывистостью. Это привело к дополнительному шуму, отраженному на факсимильной записи в виде сплошных линий по всей высоте (период с 14:05 до 14:50).

Ветровой режим за период с 10 до 12 ч представлен на рис. 1 графиками скорости (кружки) и направления (треугольники) с часовым усреднением (по 240 циклов зондирования). Горизонтальными отрезками указаны 90%-е доверительные интервалы этих величин.

Представляет интерес количественно сопоставить инструментально измеренную величину  $H_i$  с результатами численного моделирования АПС. Цель такого исследования заключается в тестировании теоретической модели на данных наблюдений. Вместе с тем информация, полученная из модельных расчетов, может оказаться полезной при настройке и градуировке содара.

Для расчета суточной эволюции конвективного АПС использовалась вихререзающая модель [5], обеспечивающая явное описание когерентных структур. Модель является численной реализацией нестационарных трехмерных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска. Краевые условия по вертикали предусматривают задание суточного хода температуры на подстилающей поверхности и затухание конвективных пульсаций на верхней границе, расположенной на уровне  $z = 1500$  м. Размеры области по горизонтали составляют  $10 \cdot 10 \text{ км}^2$ , что на сетке с разрешением  $128 \cdot 128$  узлов в плоскости  $xu$  позволяет детализировать структурные элементы стохастического ансамбля с индивидуальными размерами 500 м и более. Турбулентное замыкание подсеточных процессов основано на соотношениях Смагоринского и решении эволюционных уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации.

Модель [5] идеологически близка к LES (Large Eddy Simulation)-моделям, активно развиваемым в настоящее время за рубежом [6, 7]. В отличие от «классического» численного моделирования в LES-подходе спектр разрешаемых процессов расширен за счет прямого воспроизведения ансамбля квазидетерминированных крупных вихрей турбулентной природы. Базовым для построения моделей турбулентной проникающей конвекции является предположение о двойной структуре течения, состоящей из мелкомасштабных флуктуаций с непрерывным энергетическим спектром (локально-изотропная турбулентность) и из совокупности самоорганизующихся вихрей.

Вихререзающее интегрирование требует значительных вычислительных ресурсов. Так, типичное значение временного шага в LES-моделях, обсуждаемых в [6], составляет 1 с. В модели [5] временной шаг принят равным 15 с. Это достигнуто за счет применения неявных конечно-разностных схем на основе метода расщепления [8]. Кроме того, принятое в [5] раздельное описание средних полей и конвективных отклонений допускает постановку радиационных краевых условий на крупновихревой компонент решения, которые обеспечивают свободный выход из области быстрых гравитационных волн. Перечисленные особенности делают модель [5] доступной для расчетов на персональных компьютерах класса «Pentium-3».

Согласно наблюдениям приземная температура изменялась от  $18,7^\circ\text{C}$  в 8 ч местного времени до  $30,5^\circ\text{C}$  к 17 ч, достигая максимального значения  $30,8^\circ\text{C}$  в 15 ч. Учитывая незначительный разброс направлений скорости ветра ( $\pm 10^\circ$ ), ориентируем ось  $x$  вдоль среднего направления. Вертикальный профиль геострофической скорости  $U_G$  (как аналога барического градиента в АПС) зададим в виде кусочной функции, постоянной и равной 3 м/с при  $z < 100$  м, линейно возрастающей при  $z \geq 100$  м с градиентом 2,33 м/с/100 м и равной 10 м/с выше 400 м.

В связи с отсутствием данных о вертикальном распределении температуры на момент начала интегрирования ( $t_0 = 8$  ч местного времени) будем считать, что метеоусловия утром 5 июля были типичными для

летнего сезона. Вертикальный профиль потенциальной температуры  $\theta(z)$  зададим в виде линейной функции высоты с градиентом  $\theta_z = 8^\circ\text{C}/\text{км}$  в нижнем 450-метровом слое и со стандартным значением  $\theta_z = 4^\circ\text{C}/\text{км}$  выше уровня  $z = 450$  м. Принятая сильноустойчивая стратификация на нижних уровнях является попыткой учесть ночную приземную инверсию.

На основе перечисленных выше исходных данных был проведен расчет по численной модели с целью описания эволюции конвективного АПС. Положение модельной высоты АПС отмечено на рис. 1 кружками с крестом. Видим, что расчетные значения  $H_i$  довольно близки к фактическому положению верхней границы перемешанного слоя, по крайней мере до 13 ч. Последующее нарастание толщины АПС связано с продолжающимся подводом тепла к подстилающей поверхности и увеличению ее температуры вплоть до 15 ч. Сопоставление фактических и модельных значений  $H_i$  в этот период может оказаться некорректным по причине появления облачности и вероятного развития влажноконвективных процессов, описание которых в данной постановке задачи не предусмотрено.

Эволюция  $H_i$  на период интегрирования до 17 ч представлена на рис. 2 кривой 5 (шкала справа). Толщина слоя перемешивания монотонно возрастает со временем и к 16 ч достигает значения 1150 м, после чего наступает период постепенного ослабления конвективных движений.

Кривые 1, 2 на рис. 2 показывают экстремальные значения скоростей  $w$  восходящих и нисходящих токов на уровне  $z = 280$  м, а кривые 3, 4 – средние по горизонтали значения. На том же рисунке представлена измеренная величина вертикальной скорости (затемненные квадраты). Натурные значения даны с 10-минутным осреднением (6 точек за 1 ч), 90%-е доверительные интервалы на отдельных точках изображены

вертикальными отрезками. Учитывая, что метод крупных вихрей «может обеспечить получение правильных статистических характеристик потока, хотя детальная пространственно-временная картина такого пульсационного движения не будет при этом в точности воспроизводить какой-либо реальный процесс» [9], приходим к выводу, что интенсивность модельных конвективных движений удовлетворительно соответствует амplitудам измеренной вертикальной скорости. Фактическая величина пульсационной скорости лежит вблизи средних значений  $w$  (кривые 3, 4 на рис. 2), а в некоторые моменты времени ( $\approx 16$  ч,  $w \approx 2$  м/с) достигают расчетных экстремальных значений.

Рис. 3 иллюстрирует горизонтальную структуру поля  $w$ , полученного по модели при  $t = 15$  ч на уровне  $z = 280$  м (шаг построения изолиний равен 0,5 м/с, серая штриховка соответствует близким к нулю значениям  $w$ ). Рисунок дает представление о характерных масштабах и конфигурации конвективных элементов в горизонтальной плоскости.

Рассматривая рис. 1, обратим внимание на короткопериодные образования в конвективном слое, выделяющиеся интенсивностью закраски. Если эти образования интерпретировать как структурные элементы конвективного ансамбля, то их размеры можно оценить, зная среднюю скорость горизонтального переноса относительно фиксированного наблюдательного пункта. Согласно численным расчетам эта скорость составляет 3–4 м/с. Визуально оценивая интервалы временных неоднородностей на рис. 1 5–10 мин, получим, что реальные размеры термиков в направлении переноса составляют 900–2400 м. Обозревая модельное поле  $w$  на рис. 3 и выделяя «на глаз» отдельные образования, можно идентифицировать спектр размеров конвективных элементов примерно в 500–3000 м, что соответствует наблюдаемому.

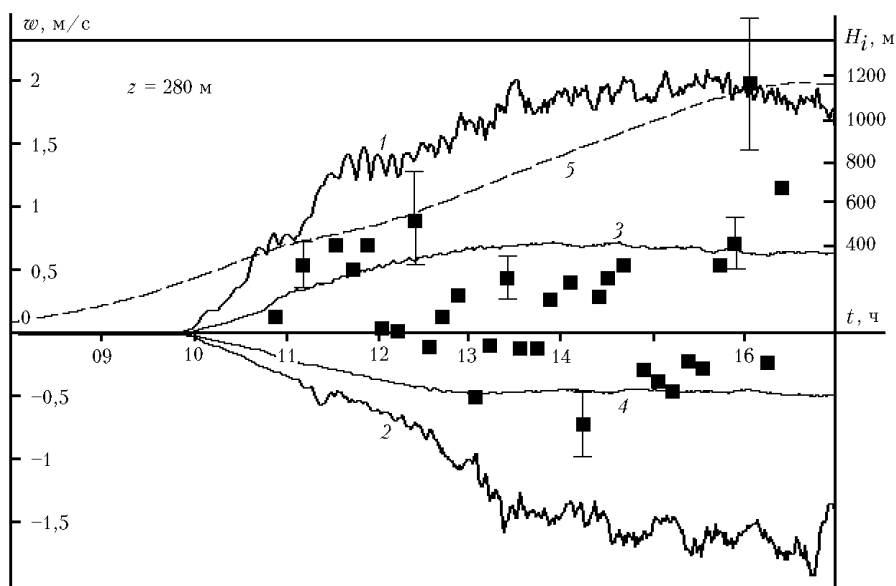


Рис. 2. Изменение со временем экстремальных (кривые 1, 2) и средних (кривые 3, 4) восходящих и нисходящих токов на уровне  $z = 280$  м. Закрашенные квадраты – данные зондирования. Кривая 5 – расчетная высота слоя перемешивания (шкала справа)

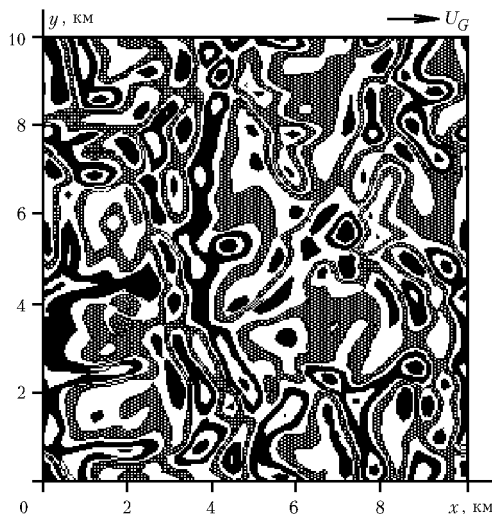


Рис. 3. Горизонтальное сечение поля  $w$  при  $z = 280$  м,  $t = 15$  ч с шагом  $0,5$  м/с

Для оценки вклада «крупновихревой» турбулентности был проведен расчет средних полей по диффузионной  $K$ -модели без учета конвективного обмена. Такое решение неверно воспроизводит вертикальную структуру конвективного слоя; в частности, отсутствует выраженный слой перемешивания, не происходит разрешение неустойчивой стратификации. Этот пример показывает важность описания механизма конвективного переноса при моделировании суточной эволюции АПС.

Таким образом, проведенное сравнение результатов содарного зондирования и вихреразрешающего моделирования показало в целом согласие натуральных данных и численных расчетов. Математическая модель удовлетворительно воспроизводит вертикальную структуру конвективного АПС, в том числе эволюцию слоя перемешивания (по крайней мере, в начальный

4-часовой период развития конвекции). Можно сделать вывод о статистической близости характерных черт внутренней структуры реальных процессов и модельного конвективного ансамбля.

Авторы выражают благодарность проф. П.Ю. Пушистову, сделавшему ряд полезных замечаний.

Работа (в части моделирования конвективных процессов) выполнена при поддержке РФФИ, грант № 99-05-64735.

1. Kallistratova M.A. Acoustic and radioacoustic remote sensing study in CIS (former USSR) // Int. J. Remote Sensing. 1994. V. 22. P. 251–266.
2. Kologiros J., Helimis C., Asimakopulos D. Estimation of ABL parameters using the vertical velocity measurements of an acoustic sounder // Boundary-Layer Meteorol. 1999. V. 91. N 3. P. 413–449.
3. 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.
4. Гладких В.А., Одинцов С.Л. Калибровка содара «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1145–1148.
5. Шлычков В.А., Пушистов П.Ю., Мальбахов В.М. Влияние атмосферной конвекции на вертикальный перенос аридных аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. N 6–7. С. 790–794.
6. Nieustadt F.T.M., Mason P.J., Moeng Ch.-H., Schumann U. Large-eddy simulation of the convective boundary layer: a comparison of four computer codes. Selected Papers from the 8-th Symposium on Turbulent shear flow. New York: Springer-Verlag, 1991. P. 343–367.
7. Stevens B., Lenschow D.H. Observations, Experiments, and Large Eddy Simulation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. N 2. P. 283–294.
8. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
9. Белоцерковский О.М., Опарин А.М. Численный эксперимент в турбулентности: от порядка к хаосу. М.: Наука, 2000. 223 с.

**V.A. Shlychkov and S.L. Odintsov. Estimation of parameters of the atmospheric convective boundary layer with the use of the vortex-resolution model and acoustic sensing.**

Based on the numerical vortex-resolution model, the structure of the atmospheric boundary layer in summer time is studied with accounting for the diurnal temperature behavior on the underlying surface. The model calculations are compared with the sodar data obtained at the Institute of Atmospheric Optics, SB RAS. It is shown that the model satisfactorily reflects the convective processes, including the dynamics of the mixing layer thickness, amplitude of the vertical speed fluctuations, and the characteristic scales of the atmospheric thermal condition.