

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ВИХРЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В УСТОЙЧИВОМ ПЛАНЕТАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Курбацкая Л.И., Курбацкий А.Ф.

Институт вычислительной математики и математической геофизики

СО РАН, г. Новосибирск

L.Kurbatskaya@ommgp.sscs.ru

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича

СО РАН, г. Новосибирск

kurbat@itam.nsc.ru

Термически устойчивый пограничный слой формируется при охлаждении поверхности. Если при этом отсутствуют механизмы ускорения потока воздуха вблизи поверхности, генерация турбулентности может нейтрализоваться деструкцией, вызванной термически устойчивой стратификацией. Однако наблюдения показывают, что и в этих условиях фиксируются локализованные явления взрывного характера. Эта особенность устойчиво стратифицированных пограничных слоев обусловлена перемежающейся турбулентностью, которая характеризуется короткими периодами турбулентного состояния и промежуточными периодами относительно слабых флуктуаций. При не подавленных стратификацией вихрях на всех масштабах в периоды слабой турбулентности перемежающаяся турбулентность понимается как глобальная [1], пример которой показан на рис.1 сплошной линией. Видно, что периоды интенсивной турбулентности (большие отрицательные потоки тепла) чередуются с более спокойными периодами турбулентности (малые потоки тепла). RANS схема турбулентности [2] высокого уровня замыкания применена для анализа структуры течения и статистики турбулентности устойчиво стратифицированного атмосферного пограничного слоя (АПС). Акцент делается на анализе возможности RANS метода моделирования турбулентности в описании некоторых особенностей вихревого перемешивания (1), энергетики (2) и глобальной перемежаемости турбулентности (3) в устойчивом АПС.

1. Вихревые коэффициенты диффузии импульса и тепла в устойчиво стратифицированном пограничном слое. В устойчивом АПС вертикальный перенос импульса и тепла турбулентными вихрями существенно ослабляется с ростом стратификации. Возрастающая при этом активность внутренних гравитационных волн способствует поддержанию импульса течения, но не тепла, вследствие чего вихревой коэффициент тепла (K_h) существенно уменьшается по сравнению с вихревым коэффициентом импульса (K_m). Включение в трехпараметрическую $E - \varepsilon - \theta^2$ RANS схему стратифицированной турбулентности [2] эффекта воздействия внутренних волн на перенос импульса и тепла позволяет корректно воспроизвести поведение вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла (рис. 2) в согласии с данными измерений в атмосфере [3].

2. Турбулентное число Прандтля, как относительная эффективность вихревого перемешивания импульса и тепла. На рис. 3 приве-

ден профиль числа Прандтля в устойчивом пограничном слое, вычисленный с использованием трехпараметрической RANS схемы турбулентности (линия 1), включающей эффект внутренних гравитационных волн [3]. В отсутствие эффекта внутренних волн в поддержании импульса турбулентное число Прандтля остается почти постоянным по всей толщине пограничного слоя (линия 2).

3. Энергетика турбулентности в устойчивом АПС. Трехпараметрическая RANS схема турбулентности, включая уравнения баланса для турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и турбулентной потенциальной энергии (ТПЕ), позволяет анализировать преобразование ТКЕ в стратифицированных геофизических течениях. Рис. 4 показывает вычисленную фракцию ТПЕ, E_p/E ($E = E_p + E_k$ - полная энергия турбулентности) как функцию числа Ri_g вместе с недавними данными измерений в атмосфере (линия 1), лаборатории (линия 2) и LES расчетом [4]. Результаты численного моделирования по трехпараметрической RANS - модели (линия 4) и LES расчет (линия 3) показывают монотонную зависимость: отношение E_p/E увеличивается с ростом числа Ri_g и стремится к конечному значению $E_p/E \approx 0,21$.

4. Глобальная перемежаемость турбулентности в устойчивом атмосферном АПС. Отличительная особенность устойчиво стратифицированных пограничных слоев связана с перемежающейся турбулентностью, которая характеризуется короткими периодами турбулентного состояния (bursts) и промежуточными периодами относительно слабых флуктуаций. В настоящем исследовании предпринята попытка выяснить чувствительность RANS схемы турбулентности высокого уровня замыкания в воспроизведении перемежающегося характер турбулентности в устойчивом атмосферном пограничном слое как вблизи поверхности, так и в окрестности струйного течения в верхней части пограничного слоя [6,7]. Представленные ниже результаты вычислительного эксперимента ставили своей целью выяснение чувствительности трехпараметрической RANS схемы турбулентности к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи твердой поверхности (рис. 5), так и 'поднятой' турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня в термически устойчивом АПС (рис.6, 7).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, в рамках проекта №13-05-00006а, а также интеграционного проекта по фундаментальным исследованиям №132 СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mahrt.L.* Stratified atmospheric boundary layers // Boundary-Layer Meteorol. 1999. V. 90. P. 375-396.
2. *Kurbatskiy A. F., Kurbatskaya L. I.* $E - \varepsilon - \overline{\theta'^2}$ turbulence closure model for an atmospheric boundary layer including the urban canopy // Meteorol.Atmos.Phys. 2009. V. 104. P. 63-81
3. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* О турбулентном числе Прандтля в устой-

чиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 2. С.187-196.

4. *Monti P, Fernando H. J. S., Princevac M., Chan W. C., Kowalewski T. A., Pardyjak E. R.* Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope // J.Atmos.Sci. 2002. V. 59. P. 2513-2534
5. *Zilitinkevich S.S., Elperin T., Klecorin N., Rogachevskii I., Esau I., Mauritsen T., Miles M.W.* Turbulence energetic in stably stratified geophysical flows: Strong and weak mixing regimes // Quarterly Journal of the Meteorological Society. 2008. V. 134. P. 793-799.
6. *Zhou B., Chow F. K.* Large-Eddy Simulation of the Stable Boundary Layer with Explicit Filtering and Reconstruction Turbulence Modeling // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 2142- 2155.
7. *А. Ф. Курбацкий, Л. И. Курбацкая* RANS-моделирование перемежающейся турбулентности в термически устойчиво стратифицированном слое. ПМТФ, 2013, №4, С, 55-67.

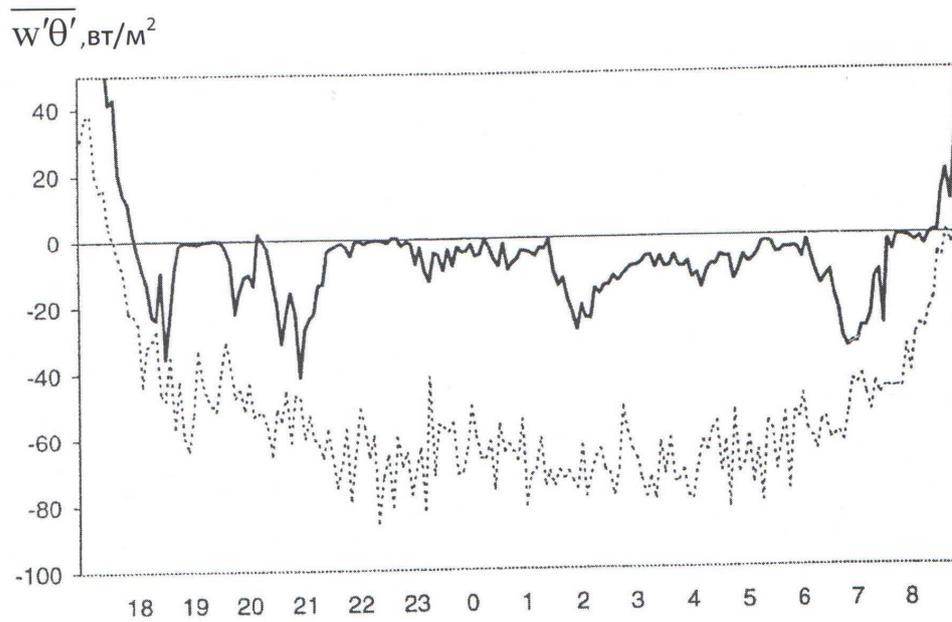


Рис. 1: Зависимость вертикального турбулентного потока тепла вблизи поверхности от времени: сплошная линия - малые скорости движения воздуха, пунктирная - большие скорости движения воздуха

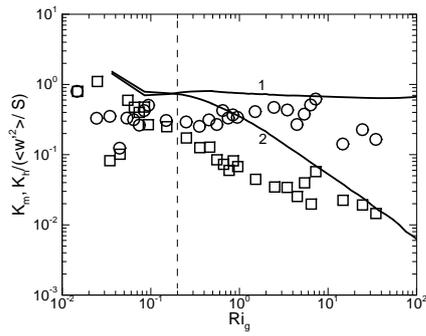


Рис. 2: Вычисленные профили коэффициентов турбулентного переноса импульса и тепла в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (1- K_h , 2- K_m). Символы ○, □ - данные измерений [4]. Вычисления соответствуют сильно устойчивому ночному атмосферному пограничному слою.

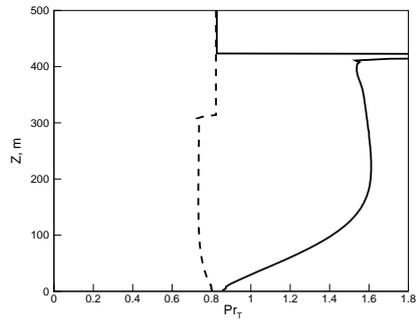


Рис. 3: Профили турбулентного числа Прандтля, вычисленные с использованием RANS-схем [3] (сплошная линия - с учетом влияния внутренних волн, пунктирная - без учета внутренних волн)

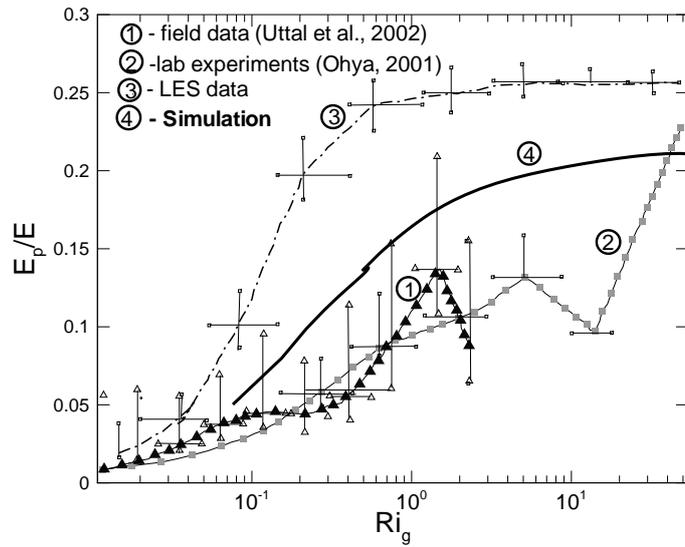


Рис. 4: Отношение потенциальной энергии к полной энергии, E_p/E в зависимости от градиентного числа Ричардсона, Ri_g . Штрихпунктирная линия - LES данные; линии маркированные черными треугольниками и квадратами, - данные измерений в лаборатории и в атмосфере (взяты из работы [5]). Сплошная линия - результат численного моделирования с использованием трехпараметрической модели [2]. Отрезками вертикальных и горизонтальных прямых линий отмечены стандартные отклонения от средних значений.

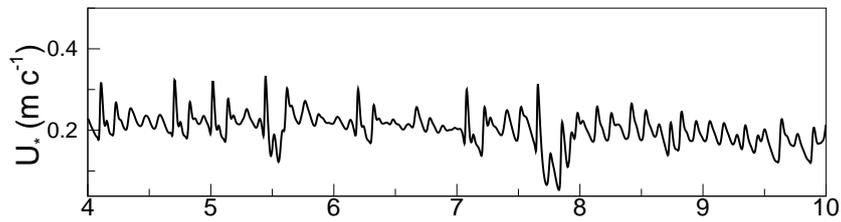


Рис. 5: Зависимость от времени турбулентной скорости трения в сильно устойчивом пограничном слое, полученная численным моделированием по трехпараметрической RANS-схеме турбулентности при $z = 1,5625m$

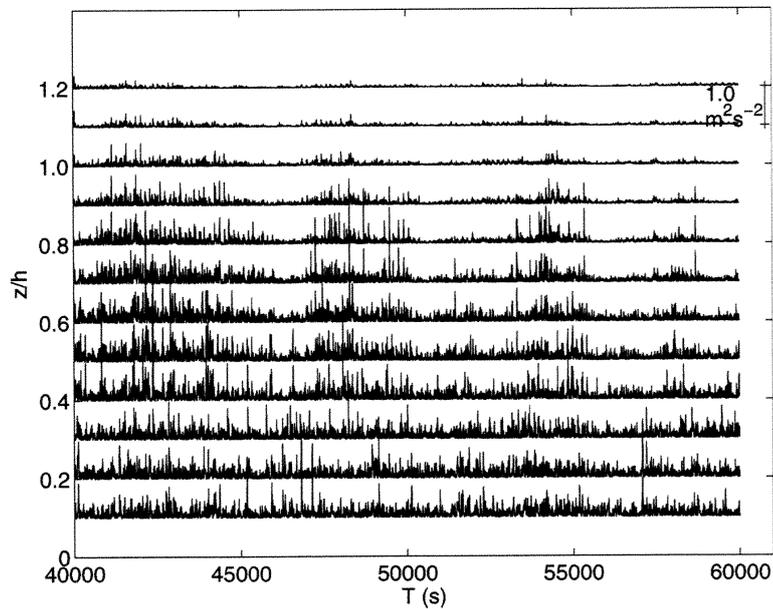


Рис. 6: Зависимость перемежающейся кинетической энергии E от времени в случае сильно устойчивого пограничного слоя [5] на различных расстояниях от поверхности, на каждом из которых E изменяется от нуля до $1 m^2/c^2$ (z -вертикальная координата, h - высота измеряемая расстоянием от поверхности до максимума скорости струи).

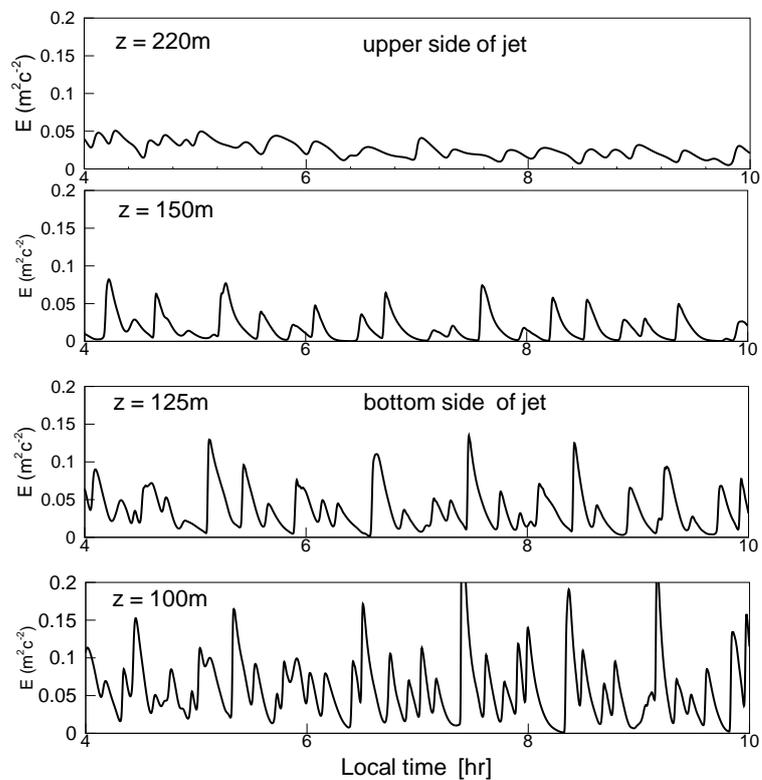


Рис. 7: Зависимость от времени кинетической энергии турбулентности над верхней ветвью струи (а) и на нижней ветви струи (б - г) в сильно устойчивом пограничном слое, полученная численным моделированием по трехпараметрической RANS-схеме турбулентности на различных расстояниях от поверхности: а - $z = 220m$, б - $z = 150m$, в - $z = 125m$, г - $z = 100m$.