

УДК 551.509.51

## АНАЛИЗ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛЬЮ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

М.М. Смирнова

### ANALYSIS OF TURBULENCE REPRESENTATION BY MESOSCALE ATMOSPHERIC MODEL

M.M. Smirnova

Описание пограничного слоя атмосферы в мезомасштабных моделях динамики атмосферы основано на использовании различных параметризаций турбулентности, характеризующихся различными способами замыкания уравнений для турбулентных пульсаций. В связи с этим был проведен анализ воспроизведения моделью турбулентной кинетической энергии (ТКЕ). Для оценки качества воспроизведения по модели турбулентных характеристик использовались данные высокочастотных ультразвуковых анемометров USA-1 и моностатического доплеровского содара ЛАТАН-3, установленных на крыше физического факультета МГУ и на Звенигородской научной станции ИФА РАН. Расчеты метеорологических полей осуществлялись с помощью модели WRF-ARW. Для расчетов была выбрана область, включающая в свою центральную часть все точки, для которых доступны данные измерений, и имеющая пространственное разрешение 2 км. Были построены эмпирические функции распределения ТКЕ, проанализирован ее суточный ход. Сравнение показало достаточно значительные расхождения. Отдельно следует отметить тот факт, что ТКЕ в черте города и за чертой города по измерениям различается гораздо в большей степени, чем в модели.

Atmospheric boundary layer description in mesoscale atmospheric models is based on various turbulence parameterizations, which use different schemes for computing turbulent mixing. This requires analysis of its representation in model and thus it was carried out in this work. Estimations of turbulent kinetic energy (TKE) were based on measurements by high frequency ultrasonic anemometers USA-1 and by monostatic doppler sodar LATAN-3, mounted on Faculty of Physics MSU and Zvenigorod station IAPh RAS. Mesoscale model used for this study is WRF-ARW. Model domain includes all points in its central part and has horizontal resolution of 2 km. Distribution functions of TKE were calculated, its diurnal cycle was compared. Comparison showed many disagreements. It should be noted TKE has more differences between urban and rural area in measurement data than in model data.

#### Введение

Описание пограничного слоя атмосферы (АПС) в мезомасштабных моделях динамики атмосферы основано на использовании различных параметризаций турбулентности, так что качество описания параметров АПС и приземных метеополей в таких моделях напрямую зависит от точности описания турбулентности. В связи с этим был проведен анализ воспроизведения моделью турбулентной кинетической энергии (ТКЕ).

Также в работе предложена методика использования данных о ТКЕ для оценки порывов скорости ветра и приведены результаты ее апробации.

#### Модель прогноза и данные измерений

Расчеты метеорологических полей осуществлялись с помощью модели WRF-ARW [Skamarock et al., 2008].

Для расчетов была выбрана область, включающая в свою центральную часть все точки, по которым доступны данные измерений, и имеющая пространственное разрешение 2 км. На рис. 1 представлена область моделирования с указанием орографии местности и точек высотных наблюдений. По вертикали задан 41  $\sigma$ -уровень, из этого количества 15 уровней находятся в нижнем слое до 1 км. Такое высокое разрешение позволяет подробно описать физические процессы в АПС.

Расчеты производились для каждых суток на 60 ч, граничные значения изменялись через каждые 6 ч. В качестве начальных и граничных данных используются данные анализа NCEP [Kanamitsu et al., 2000]. Шаг по времени составлял 6 с.

В модели WRF параметризация пограничного слоя может быть выбрана из многих схем. В данной работе в основном исследовалась параметризация MYJ (Mellor–Yamada–Janjic) [Mellor, Yamada, 1982; Janjic, 2002].

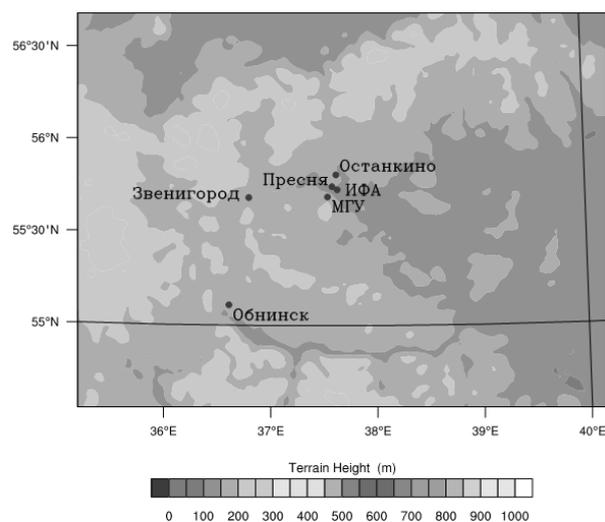


Рис. 1. Область моделирования с указанием высоты поверхности и точек наблюдений.

Для оценки качества воспроизведения моделью турбулентных характеристик использовались данные высокочастотных акустических анемометров USA-1, установленных на крыше физического факультета МГУ и на Звенигородской научной станции, на уровнях 6 и 56 м.

Для сравнения с измерениями выбирался ближайший к точке наблюдений узел модельной сетки. Данные в нем интерполировались линейно по вертикали с  $\sigma$ -уровней модели на  $z$ -уровни, на которых проводятся измерения.

#### Сравнение турбулентной кинетической энергии

ТКЕ по данным измерений является случайной величиной, и для анализа ее воспроизведения моделью были построены эмпирические функции распреде-

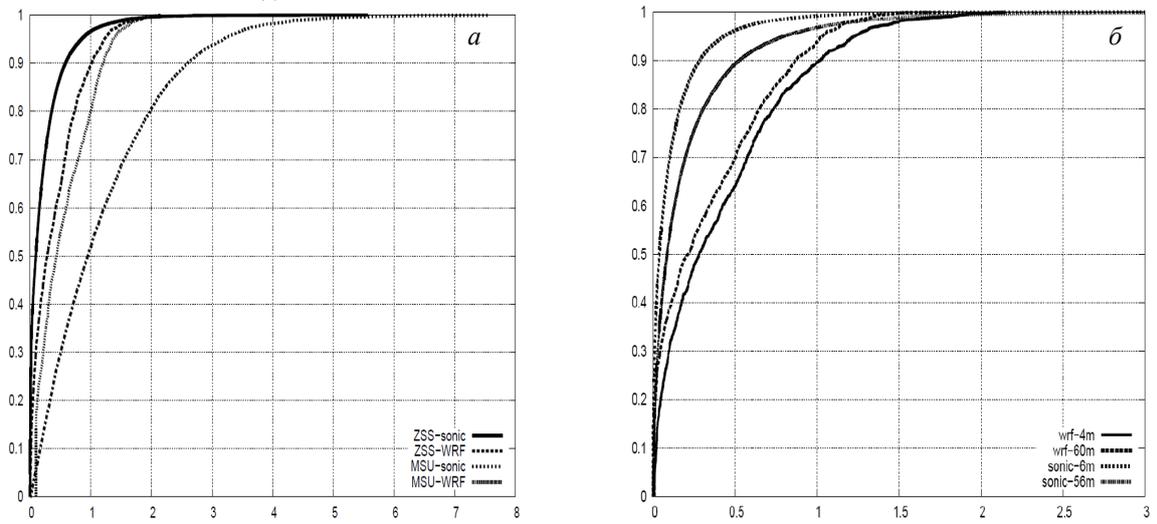


Рис. 2. Функции распределения ТКЕ в МГУ (MSU) и в Звенигороде (ZSS) по данным модели (WRF) и измерений (sonic) (а); функции распределения ТКЕ в Звенигороде на различных высотах по данным модели (WRF) и измерений (sonic) (б).

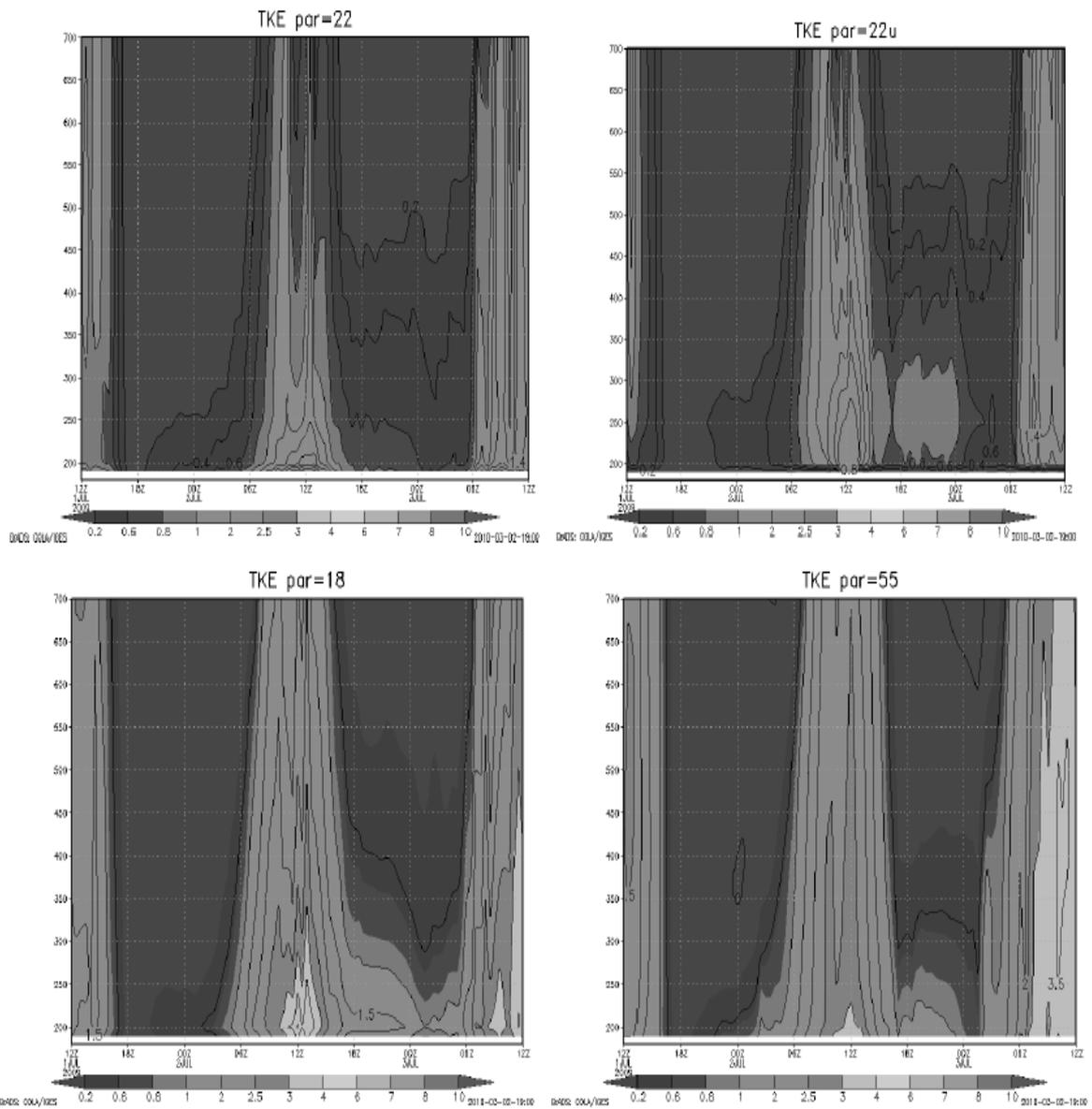


Рис. 3. Зависимость ТКЕ от времени и высоты при вычислениях с разными параметризациями АПС.

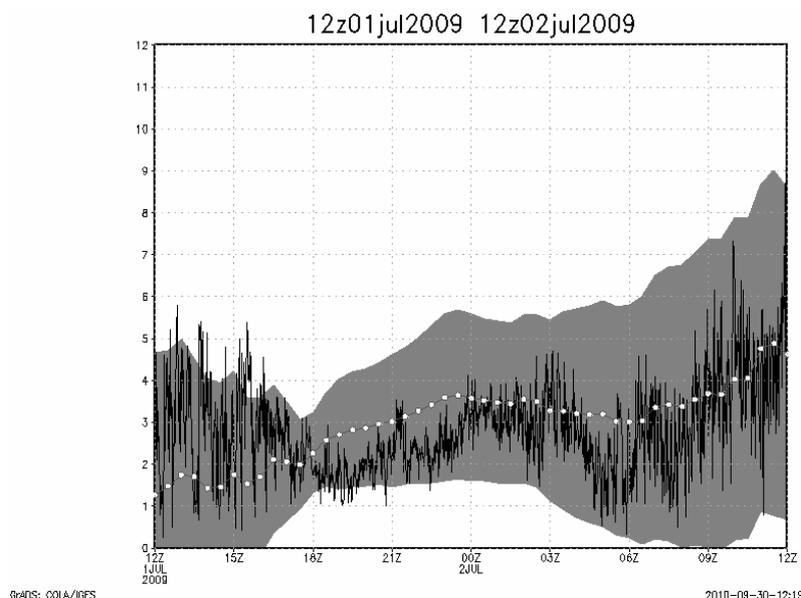


Рис. 4. Измеряемая скорость ветра (черная линия), прогнозируемая скорость ветра (линия с белыми точками) и прогнозируемая изменчивость скорости ветра (заливка).

ления ТКЕ (рис. 2, а). Можно видеть достаточно значительные расхождения. Отдельно следует отметить тот факт, что ТКЕ в городе и за городом по измерениям различается гораздо в большей степени, чем в модели.

Также были рассчитаны функции распределения ТКЕ на различных высотах (рис. 2, б). Несмотря на существенные расхождения самих распределений, виден одинаковый характер их изменения с высотой.

Сравнение характеристик турбулентности, вычисляемых в рамках различных параметризаций АПС в модели, показало их разброс, хотя и не позволило выделить наилучшее соответствие с данными наблюдений. Их различия можно оценить на рис. 3.

#### Скорость порывов ветра

ТКЕ по определению служит мерой изменчивости скорости ветра. Поэтому ее можно использовать в прогнозах для оценки изменчивости скорости ветра и вычисления скорости порывов ветра. Если рассматривать ТКЕ как дисперсию скорости ветра, а распределение скорости ветра считать нормальным, то можно предложить следующую формулу для оценки скорости порывов ветра:

$$u_{\text{пор}} = u \pm 3\sqrt{q},$$

где  $u$  – прогнозируемая средняя скорость ветра,  $q$  – ТКЕ.

На рис. 4 представлены полученный таким образом диапазон изменений скорости ветра и данные высокочастотных измерений скорости ветра. Видно, что измеряемая скорость ветра достаточно хорошо укладывается в рамки прогнозируемых значений. Анализ других случаев показывает оправданность такого подхода.

Средняя за месяц разница максимума за полчаса измеренной скорости ветра с прогнозируемыми порывами составила 2.7 м/с. При этом измеряемая ско-

рость ветра в 74 % случаев попадает в прогнозируемый интервал. Такие расхождения можно объяснить заниженным значением прогнозируемого значения ТКЕ в черте города, как показано выше.

#### Заключение

В ходе работы произведены расчеты по региональной модели и проведено их сравнение с данными долговременных наблюдений в пограничном слое атмосферы. Выявлены существенные неточности в воспроизведении турбулентности моделью. Предложен метод для прогнозирования скорости порывов ветра или изменчивости скорости ветра, показаны его возможности. Его недостатки можно отнести на счет недостаточно точного описания ТКЕ в модели.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 09-05-00652-а, 10-08-00493-а и FP7 – IRSES – «Climseas».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Janjic Z.I. Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Mesomodel // NCEP Office Note. 2002. N 437. 61 p.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woolen J., et al. Overview of NCEP/DOE Reanalysis-2 // Proc. Second WCRP International Conference on Reanalyses. 2000. WCRP-109, WMO/TD-№ 985.
- Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. P. 851–875.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN-475+STR. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. 113 p.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва