

М.М. Смирнова, Р.Ю. Игнатов

**АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ
В ПРОГНОЗАХ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ**

М.М. Smirnova, R. Yu. Ignatov

**ANALYSIS OF THE VERTICAL STRUCTURE
AND TURBULENCE IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER
IN FORECASTS WITH THE REGIONAL MODEL**

В ходе данной работы осуществлялось сравнение и оценка вертикальных профилей скорости ветра и температуры в атмосферном пограничном слое, получаемых в прогнозах по региональной модели WRF с высотными контактными и дистанционными измерениями в Московском регионе. Предложена методика оценки порывов ветра и проведен анализ ее эффективности.

Ключевые слова: мезомасштабная модель, атмосферный пограничный слой, порывы ветра.

Wind and temperature profiles in atmospheric boundary layer obtained in mesoscale model WRF forecasts and in situ and remote sensing measurements in Moscow region are compared to each other and evaluated in this study. Method for wind gusts estimations is suggested and analyzed.

Key words: mesoscale model, planetary boundary layer, wind gusts.

Введение

В ходе данной работы осуществлялось сравнение вертикальных профилей ветра и температуры, характеристик турбулентности в атмосферном пограничном слое, получаемых в прогнозах региональной модели WRF (Weather Research Forecast – Прогноз и Исследование Погоды), США с экспериментальными данными дистанционного зондирования акустическими содарами ИФА и МГУ, температурными профиломерами МГУ и Гидрометцентра России, контактными измерениями на метеорологической мачте в Обнинске и Останкинской телевизионной башне.

Большинство оценок качества модельных прогнозов рассчитывается для приземных характеристик, в то время как для описания процессов обмена между атмосферным пограничным слоем (АПС) и свободной атмосферой важно знать именно высотное распределение температуры, ветра и влажности.

Оценки описания АПС в модели WRF проводились для многих регионов мира (например, 3, 5, 12). Они показали достаточную точность прогнозов, при этом были отмечены особые трудности при описании устойчиво стратифицированного АПС [10]. Для Московского региона подобные оценки были начаты нами ранее.

Описание турбулентности в мезомасштабных моделях основано на использовании различных ее параметризаций. При этом качество прогнозов по регио-

нальной модели в большей мере определяется ее конфигурацией, поэтому в рамках данной работы проводилось исследование влияние выбора параметризации АПС на качество прогноза.

С другой стороны, сами характеристики турбулентности могут быть использованы для прогноза изменчивости скорости ветра, порывов ветра. В связи с этим была проведена оценка воспроизведения моделью турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и была предложена и проанализирована методика оценки порывов скорости ветра. Использование ТКЕ для прогноза порывов предлагалось в [2], однако в данной работе предложена более простая оценка.

Модель прогноза

Расчеты метеорологических полей осуществлялись с помощью модели WRF-ARW [11].

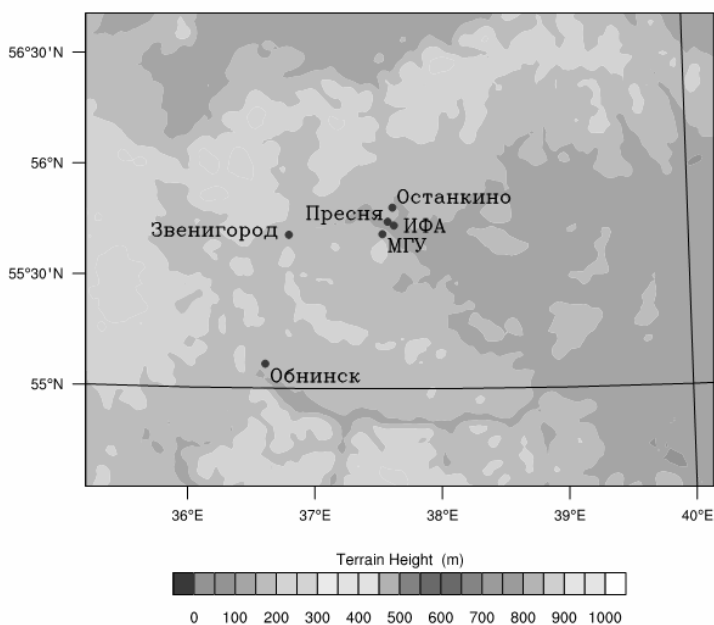


Рис. 1. Область моделирования с указанием высоты поверхности и точек наблюдений

Для расчетов была выбрана область, включающая в своей центральной части все точки, по которым доступны данные измерений. На рис. 1 представлена область моделирования с указанием точек с высотными наблюдениями. Разрешение модели по горизонтали составляет 2 км, сетка модели – 160·140 точек. По вертикали был задан 41 σ -уровень, из которых 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 исполь-

зуются данные анализа NCEP [8]. Каждый прогноз начинался в 0 ч. международного гринвичского времени. Для получения временного модельного ряда были объединены прогнозы равной заблаговременности.

В модели WRF параметризация пограничного слоя может быть выбрана из четырех схем, дающих подсеточные вертикальные турбулентные потоки количества движения, тепла и влаги. В данной работе исследовались параметризация YSU (первый вариант) [4] и MYJ (второй вариант) (Mellor-Yamada-Janjic) [6, 9].

Порывы скорости ветра

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

$$u_{пор} = u \pm 3\sqrt{q},$$

где u – прогнозируемая средняя скорость ветра; q – ТКЕ.

Данные наблюдений

На высотной метеорологической мачте, расположенной в Обнинске, производятся измерения температуры, скорости и направления ветра на уровнях 8, 121 и 301 м. Эта мачта расположена примерно в 100 км от Москвы, что позволяет считать ее данные относящимися к загородной местности. Датчики температуры и скорости ветра расположены на 4 уровнях Останкинской телебашни: 0, 128, 305 и 503 м.

Помимо данных контактных измерений в работе использовались данные дистанционного зондирования АПС.

Для измерения профилей ветра надежным методом является доплеровская акустическая локация. Высотный диапазон содарного зондирования достигает 300–500 м над подстилающей поверхностью. На крыше Физического факультета МГУ установлен моностатический доплеровский содар ЛАТАН-3 [1]. Этот же содар использовался для измерений в течение июля 2005 г. в загородной местности в районе Звенигорода. Содар разработан в ИФА РАН и также установлен на крыше здания ИФА РАН в центре Москвы.

В качестве источника данных о профилях температуры в АПС использовался микроволновой температурный профилемер МТП-5 [7]. Прибор позволяет получать профили температуры до 600 м с вертикальным разрешением в 50 м. Измерения ведутся на физическом факультете МГУ и в Гидрометцентре (центр Москвы).

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

Методика оценки

Для сравнения с измерениями выбирался ближайший к точке наблюдений узел модельной сетки. Температура и скорость ветра в нем интерполировались линейно по вертикали с σ -уровневой модели на z -уровни, на которых проводились измерения.

Для оценок ТКЕ и порывов ветра бралось значение ТКЕ на нижнем модельном уровне.

В модели процессы с малыми характерными временами параметризуются, поэтому, хотя данные измерений имеют большее временное разрешение, естественно использовать для сравнения усредненные данные. В работе использовались получасовые средние данные профилемера и содара.

Сравнение разных параметризаций АПС

Для выбора параметризации АПС было выделено несколько дней, для которых были произведены расчеты с различными вариантами модели. Такое сравнение позволяет просто и наглядно понять, как влияет выбор параметризации на результат моделирования.

Были рассчитаны значения разности между прогнозируемой температурой и скоростью ветра и наблюдениями для каждого случая на каждой высоте измерений. Во многих случаях эта разница уменьшилась на 30–50 % при использовании второго варианта конфигурации модели. Средняя разность между модельными и наблюдаемыми данными по всем доступным точкам для зимнего случая уменьшилась с 1,0 до 0,6 °С со второй параметризацией, для летнего не изменилась и составила 1,4 °С.

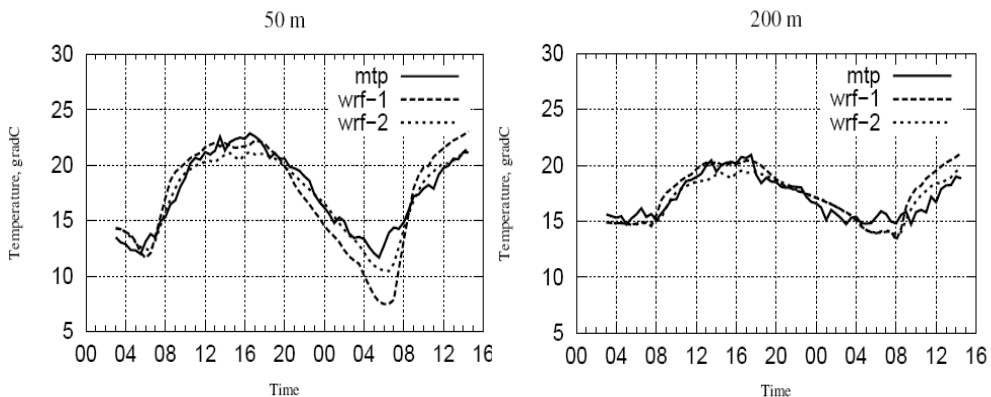


Рис. 2. Зависимость температуры от времени на уровнях 50 и 200 м 4–5 июля 2007 г. в Москве по данным температурного профилемера (mtp) и результатам расчета модели с двумя разными конфигурациями (wrf-1 и wrf-2)

Моделью описываются основные тенденции изменения скорости ветра, однако воспроизводятся не все особенности её временного хода. Для зимнего слу-

чая при этом средняя разность между данными модели и наблюдений составляет 1,2 м/с в первом варианте модели и 0,7 м/с во втором, и для летнего 2,0 м/с и 1,2 м/с. Проведенное визуальное сравнение суточного хода и профилей температуры и скорости ветра подтверждает данные выводы.

Таким образом, если судить по отдельным, но достаточно разнородным случаям, в прогнозах модели с использованием схемы MYJ более реалистично описывается температура и ветер, чем при использовании схемы YSU. Поэтому большинство дальнейших расчетов было произведено с использованием второго варианта конфигурации модели.

Сравнение температуры

Уточним ещё раз, что оценка модельных результатов выполнялась для второго варианта модели.

Анализ временного хода температуры на различных уровнях показывает, что модель воспроизводит его характерные особенности, суточный ход соответствует данным измерений, его размах с точностью до градуса совпадает.

Как показывает проведенный статистический анализ, разница в температуре между моделью и наблюдениями составляет 1–2 градуса. Среднее значение разности между модельными и измеренными данными, дисперсия разности, абсолютная ошибка и коэффициент корреляции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки воспроизведения моделью температуры на различных высотах
 (<Δ> – средняя разность модель-наблюдения; <|Δ|> – средняя абсолютная разность модель-наблюдения; σ – дисперсия разности; r – коэффициент корреляции)

	точка	Обнинск				Останкино					Пресня (для температуры)/ ИФА (для скорости ветра)						
		высота, м		301	среднее	0	128	305	503	среднее	0	100	200	300	500	среднее	
		8	121														
Температура, °С	февраль	<Δ>	186	0,77	-0,36	0,76	0,22	0,23	0,71	0,54	0,67	0,30	1,36	1,61	1,50	1,02	1,21
		< Δ >	2,15	1,31	0,94	1,47	1,32	1,06	1,05	1,18	1,15	1,31	1,63	1,71	1,60	1,10	1,47
		σ	4,09	1,99	1,35	2,48	2,60	1,69	1,22	1,92	1,86	2,48	1,94	1,61	1,32	0,60	1,59
		r	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,98	0,96	0,97	0,95	0,97	0,98	0,98	0,99	0,97
	август	<Δ>	-0,21	-0,86	-0,34	-0,47	-1,40	-0,84	-0,23	-0,73	-0,80	-2,06	-0,95	-0,24	-0,01	-0,01	-0,65
		< Δ >	1,27	1,46	0,85	1,19	1,72	1,24	1,11	1,18	1,31	2,66	1,41	0,82	0,70	0,63	1,24
		σ	2,47	2,67	1,01	2,05	3,56	2,03	1,98	1,48	2,26	8,10	2,46	1,11	0,82	0,63	2,62
		r	0,96	0,96	0,98	0,97	0,94	0,96	0,97	0,97	0,96	0,85	0,95	0,98	0,98	0,99	0,95
Скорость ветра, м/с	февраль	<Δ>	1,22	1,35	1,12	1,23	-0,06	2,12	2,62	3,11	1,95	1,48	0,50	0,39	0,32	-	0,79
		< Δ >	1,28	1,90	2,50	1,89	0,51	2,20	2,78	3,41	2,23	1,59	1,43	1,49	1,87	-	1,53
		σ	0,77	3,39	10,20	4,79	0,39	2,24	4,70	10,56	4,47	1,66	2,96	3,20	5,41	-	2,77
		<Δ/X>	1,55	0,58	0,99	1,04	0,15	0,72	0,58	0,66	0,53	0,84	0,41	0,15	0,06	-	0,47
	r	0,74	0,72	0,69	0,72	0,79	0,83	0,86	0,76	0,81	0,64	0,74	0,81	0,82	-	0,73	
	август	<Δ>	0,71	1,01	-0,10	0,54	0,14	1,98	1,63	0,69	1,11	1,42	1,83	1,06	0,12	-	1,34
		< Δ >	0,92	1,65	1,85	1,47	0,80	2,24	2,15	1,77	1,74	1,54	2,31	2,31	3,13	-	2,14
		σ	0,69	3,16	6,41	3,42	1,54	3,51	4,80	4,78	3,66	1,70	4,81	7,23	13,74	-	5,28
		<Δ/X>	2,11	0,56	0,36	1,01	0,71	0,61	0,42	0,25	0,50	2,56	1,18	0,37	0,16	-	1,32
	r	0,65	0,70	0,78	0,71	0,52	0,63	0,73	0,76	0,66	0,34	0,34	0,50	0,45	-	0,39	

Прогноз на вторые сутки имеет примерно ту же точность что и на первые. Точность прогноза на дневные часы оказывается немного выше, чем на ночные часы.

По данным наблюдений в Обнинске абсолютная ошибка прогноза температуры уменьшается с высотой, по данным Пресни – уменьшается зимой, а летом – начиная с высот 100-200 м.

Зимой в прогнозах завьшается температура. В городе выше 100 м профили температуры имеют одинаковый вид, только в модели имеется смещение в сторону больших температур, градиенты же температуры практически совпадают. Однако в нижних 100 м ситуация оказывается иной. Средняя разность между приземной модельной и измеренной температурами близка к нулю (хотя дисперсия разности оказывается больше, чем на более высоких уровнях). Соответственно приземный градиент температуры, определяющий устойчивость слоя, меньше в прогнозах, чем по измерениям. Это может быть связано с тем, что город является достаточно мощным источником тепла, который оказывает существенное влияние на профиль температуры, но не учитывается в модели.

Для июля 2005 г. средние профили температуры за городом практически совпадают по данным измерений и моделирования. Расхождения возникают в основном только в утренние и вечерние часы.

В модели практически всегда предсказывается отсутствие инверсий, если инверсии нет по данным наблюдений, то ее нет и в 80-100 % случаев в модели. Наличие же инверсии предсказывается моделью зимой примерно в половине случаев, летом же – 75–100 %. При этом приземные инверсии в городе редки, так, в феврале их не наблюдалось на Пресне, в то время как в модели они прогнозировались в 14 % случаев.

Распределение температуры с высотой определяет устойчивость слоя, поэтому было проанализировано воспроизведение моделью градиентов температуры. Построенные распределения градиентов температуры показывают, что модельное распределение имеет большую ширину и смещено в сторону меньших градиентов, особенно зимой.

Таким образом, наибольшие расхождения между моделью и наблюдениями оказываются в приземном слое до 150 м в городе.

Сравнение ветра

Среднее значение разности между модельными и измеренными данными, дисперсия разности, абсолютная ошибка и коэффициент корреляции приведены в табл. 1.

Как показывают средние за месяц профили скорости ветра, полученные усреднением данных модели и акустического зондирования за июль 2005 г. с использованием всех данных и отдельно за ночные и дневные часы, средние дневные профили практически совпадают, только на нижних уровнях модель завьшает ветер, т.е. сдвиг ветра с высотой оказывается в модели меньшим, чем

по данным наблюдений. Ночные же модельный и наблюдаемый профили отличаются достаточно сильно. И хотя как раз сдвиг ветра с высотой ночью оказывается близким к наблюдаемому значению, сам профиль имеет другой вид.

Для зимних же профилей ветра ситуация оказывается иной: в модели хорошо воспроизводятся ночные профили скорости ветра, дневные же имеют существенные расхождения с измеренными.

Относительная ошибка в прогнозе скорости ветра убывает с высотой. Ветер на нижних уровнях завышается в модели. Разница между прогнозируемым и наблюдаемым ветром составляет 1–2 м/с. При этом средняя разность между прогнозируемым и измеренным ветром практически не зависит от высоты, относительная ошибка уменьшается.

Рассчитанные распределения скоростей ветра на различных уровнях по данным модели и содарного зондирования показывают, что в модели чаще встречаются большие скорости ветра. Модельные распределения немного сдвинуты в сторону больших скоростей и имеют большую ширину. Данная тенденция наиболее заметна в нижней части АПС (на уровнях 20 и 100 м). На более высоких уровнях распределения в части больших скоростей оказываются более близкими, хотя по-прежнему в модели гораздо реже встречаются небольшие скорости ветра.

Сравнение турбулентной кинетической энергии

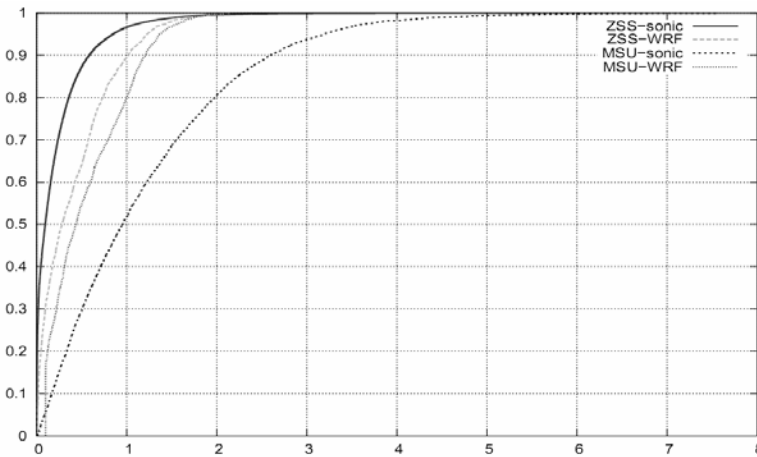


Рис. 3. Функции распределения ТКЕ в МГУ (MSU) и в Звенигороде (ZSS) по данным модели (WRF) и измерений (sonic)

ТКЕ по данным измерений является случайной величиной и неустойчива. Были построены эмпирические функции распределения ТКЕ, приведенные на рис. 3. 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.

Прогноз порывов скорости ветра

Было предложено оценивать изменчивость скорости ветра с помощью ТКЕ. На рис. 4 представлена зависимость полученных таким образом рамок для изменения скорости ветра и высокочастотные измерения скорости ветра. Видно, что измеряемая скорость ветра достаточно хорошо укладывается в прогнозируемые рамки. Анализ других случаев показывает оправданность такого подхода.

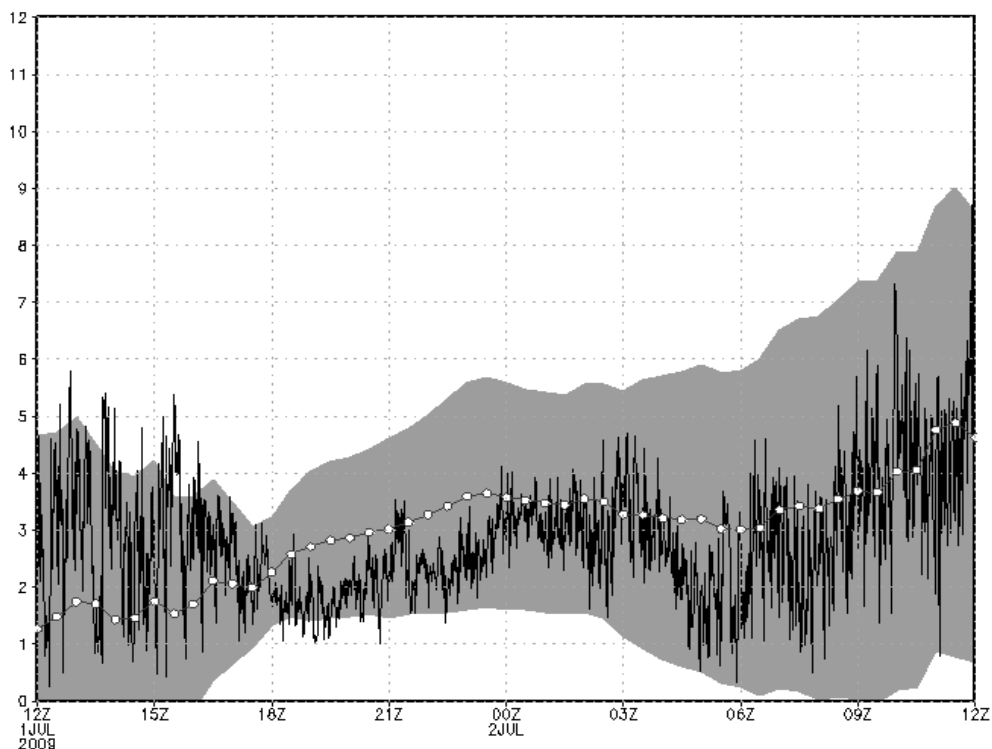


Рис. 4. Измеряемая скорость ветра (черная линия), прогнозируемая скорость ветра (белая линия) и прогнозируемая изменчивость скорости ветра (заливка)

Средняя за месяц разница максимума за полчаса измеренной скорости ветра с прогнозируемыми порывами составила 2,7 м/с. При этом измеряемая скорость ветра в 74 % случаев попадает в прогнозируемый интервал. Такие расхождения можно объяснить заниженным значением прогнозируемого значения ТКЕ в городе, как показано выше.

Заключение

В ходе работы произведены расчеты на региональной модели и произведено их сравнение с данными долговременных наблюдений в пограничном слое атмосферы. В результате проведенного анализа можно сказать, что модель достаточно хорошо воспроизводит средние профили скорости ветра и температуры в АПС.

Произведенный анализ показывает существенную роль выбора параметризации АПС на прогноз. Для московского региона наиболее удачной оказалась параметризация Меллора–Ямады–Янича (МҮҮ) [6, 9].

Наибольшие отклонения модельных значений температуры и скорости ветра отмечены в нижней части АПС в городской среде. Как показывают исследования других авторов, в городе образуется особый тип пограничного слоя атмосферы, требующий особого описания.

Предложен метод для прогнозирования порывов или изменчивости скорости ветра, показаны его возможности. Его недостатки можно отнести на счет недостаточно точного описания ТКЕ в модели.

Литература

1. Кузнецов Р.Д. Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя. – *Оптика атмосферы и океана*, 2007, 20, № 8.
2. Brasseur O. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. – *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129, 5–25.
3. Fast J.D. Evaluation of the boundary layer characteristics and pollutants in Mexico City predicted by WRF: – 15th Annual MM5 Users' Workshop, Boulder, CO, 2005.
4. Hong S.-Y., Pan H.-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. – *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, p. 2322–2339.
5. Jankov J., Gallus W.A. et al The Impact of Different WRF Model Physical Parameterizations and Their Interactions on Warm Season MCS Rainfall. – *Weather and Forecasting*, 2005, Vol. 20, 1048–1060.
6. Janjic Z.I. Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. – NCEP Office Note, 2002, No. 437, 61 pp.
7. Kadyrov E.N. et al. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing. – *Radio Sci.*, 2003, vol. 38, No 3, p. 13-1.
8. Kanamitsu M., Ebisuzaki W, Woolen J., Potter J., Fiorino M. OVERVIEW OF NCEP/DOE REANALYSIS-2. – *Proceedings of the Second WCRP International Conference on Reanalyses*, 2000, WCRP-109, WMO/TD-№ 985.
9. Mellor G.L. and Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. – *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, vol. 20, p. 851–875.
10. Seaman N.L., Gaudet B., Deng A. et al. Evaluation of meander-like wind variance in high-resolution WRF model simulations of the stable nocturnal boundary layer. 10th AMS Conf. on Atmos. Chem., New Orleans, 21–24 Jan., 2008, 9 p.
11. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN-475+STR. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, 2008.
12. Storm B., Dudhia J., Basu S., Giammanco A.S.I. Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-level Jets: Implications for Wind Energy. – *Wind Energy*, 2008.

Работа проведена при частичной поддержке грантов РФФИ, 08-05-00984, 10-08-00493-а, 08-05-13545-офи_ц, 09-05-00652-а.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0742).