

Е.В. Набокова

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ WRF С УЧЕТОМ ДВУХ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ГОРОДСКОГО ПОДСЛОЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И СКОРОСТИ ВЕТРА

В последние десятилетия исследование особого метеорологического режима, сложившегося на урбанизированных территориях, приобрело большую актуальность и значимость и вошло в число задач таких крупных международных проектов, как MEGAPOLI (Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation) [11], GURME (the GAW Urban Research Meteorology and Environment programme) [13], CLEAR (Cluster of European Air Quality Research) [12]. Одним из методов исследования данного явления является численное моделирование.

Существует два принципиально различающихся подхода к моделированию метеорологического режима города. Первый подход – прямое математическое моделирование с помощью решения уравнений газовой динамики и притока тепла в городской застройке. Этот метод требует очень высокого пространственного разрешения в моделях. Второй подход заключается в параметризации процессов в городе, представленном в виде «каменного леса» с трехмерной геометрией. Эти методы могут быть включены в мезомасштабные модели для представления в них городских процессов [2]. В последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в развитии методов второго типа. Два из них были включены в мезомасштабную негидростатическую модель WRF (Weather Research and Forecasting Model) [9].

1. Представление городских метеорологических процессов в модели WRF

В модели WRF особенности физических процессов на территориях с разными типами подстилающей поверхности учитываются в методах параметризации процессов на поверхности и в почве. Одним из таких методов является модель NOAH LSM (National Centers for Environmental Prediction, Oregon State University, Air Force, Hydrology Lab-NWS Land Surface Model) [3]. В модели NOAH описаны следующие процессы: перенос тепла и влаги в четырех слоях почвы и между ними; накопление, сублимация и таяние снега; теплообмен на границах снежного покрова с почвой и атмосферой; транспирация влаги растительным покровом; испарение влаги с поверхности почвы, водоемов и растительного покрова; поверхностный сток. В расчеты для перечисленных процессов входят значения таких физических характеристик, как альbedo, параметр шероховатости, относительная излучательная способность и другие, которые задаются своими для каждого типа поверхности. В табл. 1 приведены значения этих характеристик для ячеек с типом поверхности «город». Стоит отметить, что данные физические характеристики заданы без учета географии, то есть являются едиными для всех городов мира.

Таблица 1

Значения физических характеристик подстилающей поверхности для ячеек с типом подстилающей поверхности «город»

Название параметра	Значение
Параметр шероховатости	0,8 м
Альbedo подстилающей поверхности	0,15 %
Относительная излучательная способность поверхности	0,88 %
Доля растительности	0,10 %

Однако задание параметров подстилающей поверхности не отражает всех процессов в городской застройке. Для их описания в модель WRF были введены два метода параметризации – однослойная модель городского приземного подслоя (Urban Canopy Model, в дальнейшем – UCM) [6] и многослойная модель городского приземного подслоя (Building Environment Parameterization, в дальнейшем – BEP) [8]. Эти методы параметризации учитывают такие характерные для города

процессы, как затенение поверхности земли зданиями, отражение и поглощение радиации в уличных каньонах, потоки тепла от дорог, крыш и стен зданий.

Основная идея метода параметризации UCM – учет особенностей города в расчетах теплового баланса у поверхности земли и сдвига ветра в приземном подслое. При этом рассматриваются турбулентные потоки явного тепла от поверхностей крыш, стен и дорог, которые включаются в уравнения обмена энергией и моментом количества движения между городским подслоем и атмосферой. На рис. 1 представлены турбулентные потоки явного тепла в городском подслое.

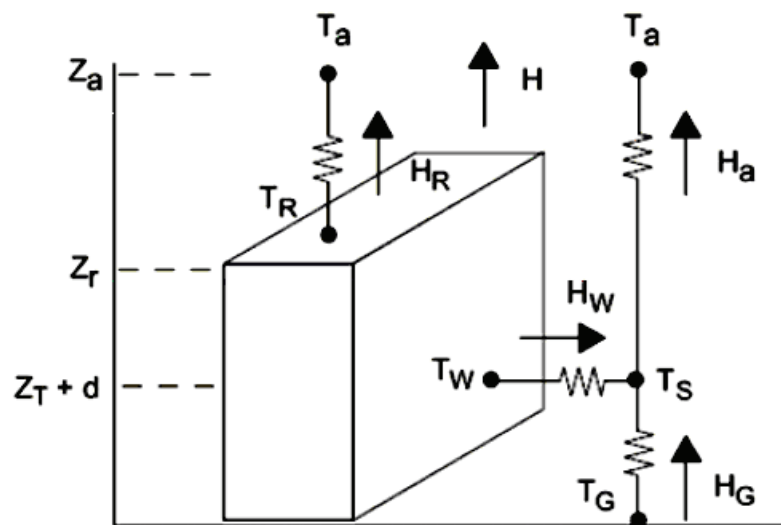


Рис. 1. Схема турбулентных потоков явного тепла, учитывающихся в однослойной модели UCM (из [6]): H_R , H_W , H_G – потоки явного тепла от поверхностей крыш, стен и дорог соответственно; H_a – полный поток явного тепла от городского каньона; H – полный поток явного тепла от городского подслоя; T_a – температура воздуха на нижнем модельном уровне Z_a ; T_R – температура поверхности крыш на уровне Z_r , соответствующем высоте зданий; T_s – температура на уровне $Z_r + d$ (сумма параметра шероховатости для расчета турбулентного потока тепла и высоты слоя вытеснения); T_w , T_g – температуры поверхностей стен и дорог соответственно

Согласно [7], поток явного тепла от поверхности крыш оценивается в соответствии с теорией подобия Монина–Обухова, а потоки явного тепла от стен и дорог – по эмпирической формуле Юргеса (здесь и далее обозначения в формулах аналогичны обозначениям на рис. 1).

$$H_w = C_w (T_w - T_s),$$

$$H_g = C_g (T_g - T_s),$$

$$C_w = C_g = \begin{cases} 7,51 U_s^{0,78} & (U_s \geq 5 \text{ ms}^{-1}) \\ 6,15 + 4,18 U_s & (U_s < 5 \text{ ms}^{-1}) \end{cases},$$

где C_w и C_g – коэффициенты конвективной теплопередачи для стен и дорог соответственно; U_s – скорость ветра на высоте, соответствующей сумме параметра шероховатости для расчета переноса момента и высоты слоя вытеснения.

Полный поток явного тепла от городского каньона (H_a) в узле сетки, равный сумме потоков от стен и дорог, оценивается следующим образом:

$$r_w \cdot H_a = 2h_c \cdot H_w + r_w \cdot H_g,$$

где r_w – нормированная ширина уличных каньонов (отношение ширины уличных каньонов к сумме ширины уличных каньонов и ширины крыш); h_c – нормированная высота зданий (отношение высоты зданий к сумме ширины уличных каньонов и ширины крыш).

Полный поток тепла от городского подслоя от единичной ячейки находится согласно выражению

$$H_A = r \cdot H_R + r_w \cdot H_a,$$

где r – нормированная ширина крыш (отношение ширины крыш к сумме ширины уличных каньонов и ширины крыш).

Взаимодействие UCM с моделью NOAH LSM происходит через процент «городского покрытия» ячейки, за счет чего создается возможность учета как территорий, занятых исключительно зданиями и искусственными поверхностями, так и участков города с естественным покрытием (парки, скверы и др.), меньших по размеру, чем ячейка

сетки. Согласно этому подходу поток явного тепла, например, рассчитывается следующим образом:

$$H = A_{\text{ест}} H_{\text{LSM}} + A_{\text{иск}} H_A,$$

где H – полный поток явного тепла от узла сетки к нижнему вертикальному уровню; $A_{\text{ест}}$ – процент территории ячейки, занятый естественными покрытиями (луг, сельскохозяйственные посевы, лес, вода); $A_{\text{иск}}$ – процент территории ячейки, занятый искусственными покрытиями (здания, проезжие дороги, железные дороги); H_{LSM} – поток явного тепла от естественных поверхностей, рассчитанный по модели NOAA LSM; H_A – поток явного тепла от городского подслоя, рассчитанный по модели UCM.

Аналогичным образом оцениваются полные потоки скрытого тепла и поток тепла от земной поверхности.

Профиль ветра в городском подслое предполагается экспоненциальным (согласно [10]):

$$U = U_a \frac{\log[(z_r - d)/L]}{\log[(z_a - d)/L]} \exp \left[-n \left(1 - \frac{z}{z_r} \right) \right],$$

где U_a – скорость ветра на уровне 10 м; L – масштаб Монина–Обухова.

Основные идеи модели ВЕР о физических процессах в городских каньонах совпадают с идеями UCM, однако их учет производится за счет добавления в уравнения новых членов, связанных с наличием трения, потоков тепла и генерацией турбулентности в городском подслое. Уравнения для вертикального турбулентного обмена для различных переменных с учетом новых членов выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_C,$$

где C – переменная (компоненты скорости ветра, потенциальная температура и др.); K_H – соответствующий переменной коэффициент турбулентного обмена; S_C – источники и стоки переменной C .

Турбулентные потоки тепла и момента количества движения от городской застройки входят в член S_C .

В ВЕР принимается, что источники и стоки момента количества движения, тепла и кинетической энергии неоднородно распределены

по вертикали, что учитывается за счет задания распределения зданий по высотам в пределах городской застройки.

Разница в подходах к учету влияния городского приземного подслоя на приземный слой атмосферы выражается в разном задании вертикальных уровней в модели. При расчетах с ВЕР нижний модельный уровень может находиться ниже средней высоты зданий, тогда как в UCM должен превышать его.

2. Описание экспериментов

С моделью WRF была проведена серия экспериментов для региона г. Москвы в виде прогнозов на 48 ч в период с 1 по 29 августа 2007 года от 00 ч ВСВ. На рис. 2 представлены границы области моделирования.

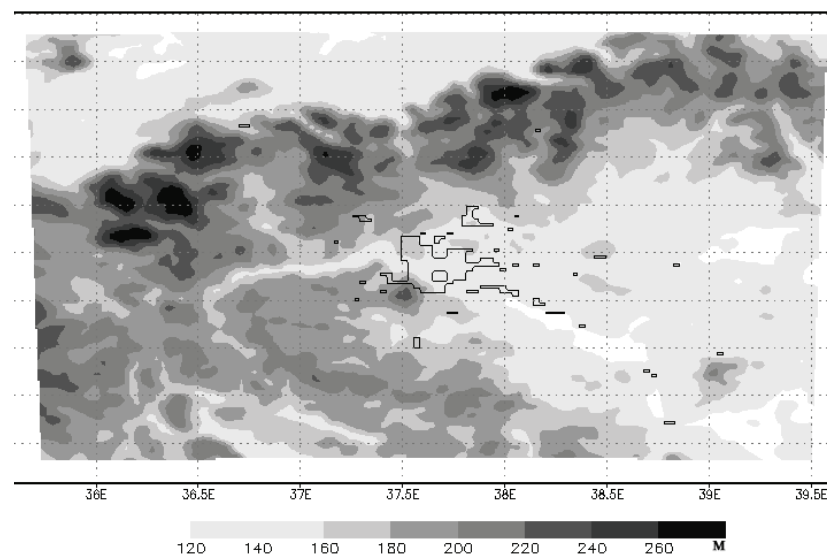


Рис. 2. Границы области моделирования (оттенками серого изображен рельеф, черный контур соответствует границам Москвы в базе типов землепользования, используемой моделью WRF)

В проведенных экспериментах в качестве начальных и граничных условий были использованы анализы NCEP/NCAR с разрешением $0,5^\circ$,

включающие в себя трехмерные поля температуры, скорости ветра, относительной влажности на стандартных изобарических поверхностях, влажности и температуры почвы на четырех уровнях, а также двумерные поля влажности, приземного давления, давления на уровне моря, температуры поверхности и водного эквивалента снежного покрова. Граничные условия задавались каждые 6 часов. Размер сетки расчетной области – 120×100 точек, разрешение – 2 км. Область Москвы имеет размер примерно 20×20 точек. По вертикали было задано 42 σ -поверхности, семь из них – в пограничном слое.

Названия экспериментов обозначаются следующим образом: К – контрольный эксперимент с моделью процессов на поверхности и в почве NOAH; UCM – эксперимент с однослойной моделью городского приземного подслоя; ВЕР – эксперимент с многослойной моделью городского приземного подслоя. В табл. 2 приведены морфометрические параметры застройки, заданные по умолчанию для моделей UCM и ВЕР и использованные для первых оценок прогнозов с учетом параметризаций городского приземного подслоя.

Таблица 2

Морфометрические параметры застройки в методах параметризации UCM и ВЕР

Параметры	UCM	ВЕР
Высота зданий	7,5 м	10 м – 3 %
		15 м – 7 %
		20 м – 12 %
		25 м – 18 %
		30 м – 20 %
		35 м – 18 %
		40 м – 12 %
		45 м – 7 %
50 м – 3 %		
Ширина зданий	9,4 м	15 м
Ширина дорог	9,4 м	15 м

В качестве оцениваемых величин были выбраны температура и скорость ветра, поскольку влияние города на них проявляется наиболее ярко. Прогнозы этих величин сравнивались с данными наблюдений на станциях Балчуг и ВДНХ, на Останкинской телевизионной башне и данными, полученными с помощью профилера Гидрометцентра

России. Модельные данные интерполировались в точку с координатами этих станций, а для оценок профилей – дополнительно с σ -уровней модели на z-уровни, на которых проводятся наблюдения. Данные Останкинской башни (температура и скорость ветра) были выбраны на высотах 128, 305 и 503 м, а данные профилера Гидрометцентра России (температура) – на высотах 100, 300 и 500 м. В качестве параметров оценки использовались абсолютная и систематическая ошибки прогноза.

3. Описание температуры воздуха и скорости ветра в период моделирования

На рис. 3 и 4 приведен ход дневной (12 ч ВСВ) и ночной (00 ч ВСВ) температуры на уровне 2 м в период с 1 по 29 августа на станциях ВДНХ, Балчуг и МГУ. Как видно из рисунков, дневные температуры в рассматриваемый период на трех станциях в основном отличаются не более, чем на 1–2 °С, тогда как различие в ночных температурах более значительно и в отдельные дни достигает 6 °С. В ночные часы более высокие температуры характерны для станции Балчуг, находящейся в центре города.

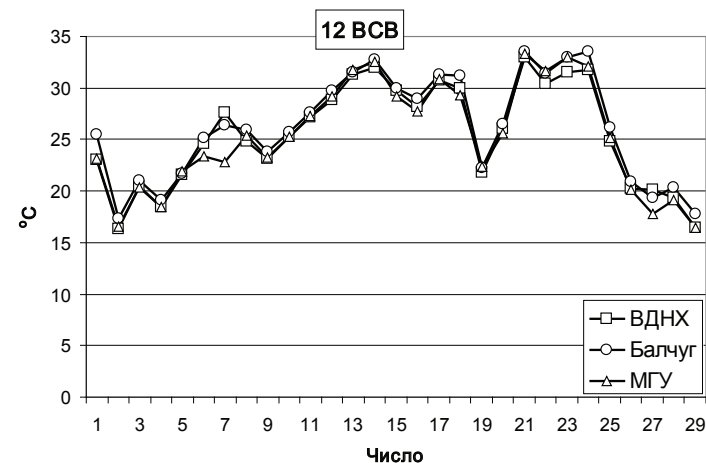


Рис. 3. Ход температуры воздуха на уровне 2 м в 12 ч ВСВ по данным наблюдений на станциях ВДНХ, Балчуг и МГУ

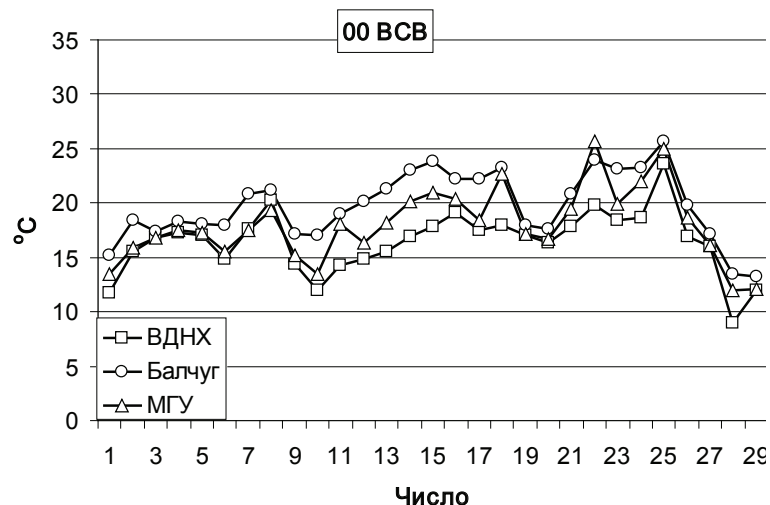


Рис. 4. Ход температуры воздуха на уровне 2 м в 00 ч ВСВ по данным наблюдений на станциях ВДНХ, Балчуг и МГУ

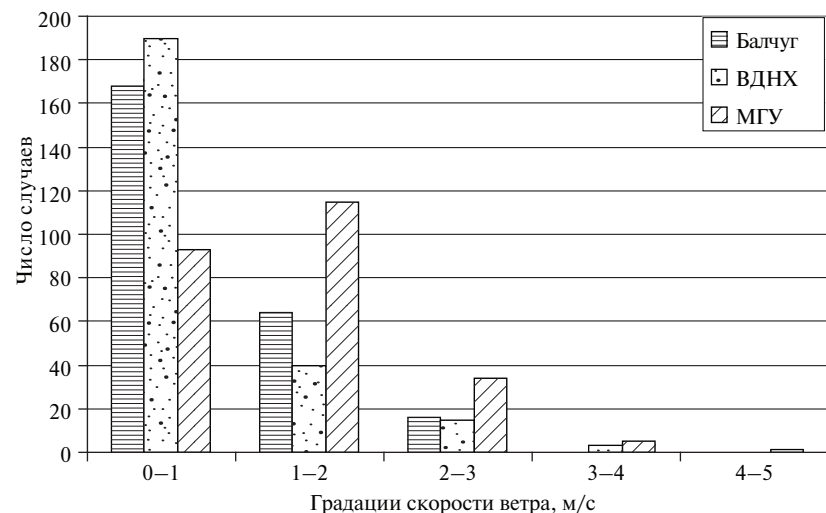


Рис. 5. Повторяемость скоростей ветра в различных градациях на станциях Балчуг, ВДНХ и МГУ

На рис. 5 приведены повторяемости скоростей ветра на уровне 10 м в различных градациях в период с 1 по 29 августа. Согласно данным наблюдений, на станциях Балчуг и ВДНХ, по сравнению с МГУ, более часто отмечались штили и ветер со скоростью 1 м/с. Стоит отметить, что на станции Балчуг не было ветров со скоростью более 3 м/с, а на станции ВДНХ – более 4 м/с.

4. Анализ результатов экспериментов

4.1. Температура воздуха

На рис. 6 приведен ход осредненных по 29 прогнозам значений абсолютной и систематической ошибок прогноза температуры воздуха на уровне 2 м в зависимости от заблаговременности прогноза для станций Балчуг и ВДНХ. В целом ход ошибок в экспериментах с городскими версиями аналогичен ходу ошибок в контрольном эксперименте: максимальные значения абсолютной ошибки приходятся на ночные и утренние часы (2–4 °С – для Балчуга и 1–3 °С – для ВДНХ), а в дневные и вечерние часы она практически одинакова (около 2 °С – для Балчуга и около 1,5 °С – для ВДНХ). Наименьшие средние значения абсолютной ошибки на станции Балчуг в ночные и утренние часы отмечаются в эксперименте с методом параметризации ВЕР, ошибки которого на 1–2 °С меньше, чем ошибки контрольного эксперимента и эксперимента с методом параметризации UCM. Это свидетельствует о более реалистичном воспроизведении в ВЕР ночного острова тепла. По данным станции ВДНХ, оценки экспериментов с учетом методов параметризации городского подслоя близки к оценкам контрольного эксперимента. Стоит отметить, что по данным станции Балчуг средние значения систематической ошибки во все моменты отрицательны, а по данным станции ВДНХ – принимают значения обоих знаков, что говорит о том, что при заданных морфометрических параметрах (табл. 2) в центре города в рассмотренных прогнозах систематически занижается температура воздуха.

В экспериментах с параметризациями UCM и ВЕР для других городов, описанных в [4, 5], было отмечено увеличение ночных температур за счет дополнительного турбулентного потока явного тепла, выделяемого перегретыми за день зданиями и искусственными поверхностями (дороги, площадки, тротуары и т.д.). Для этих городов

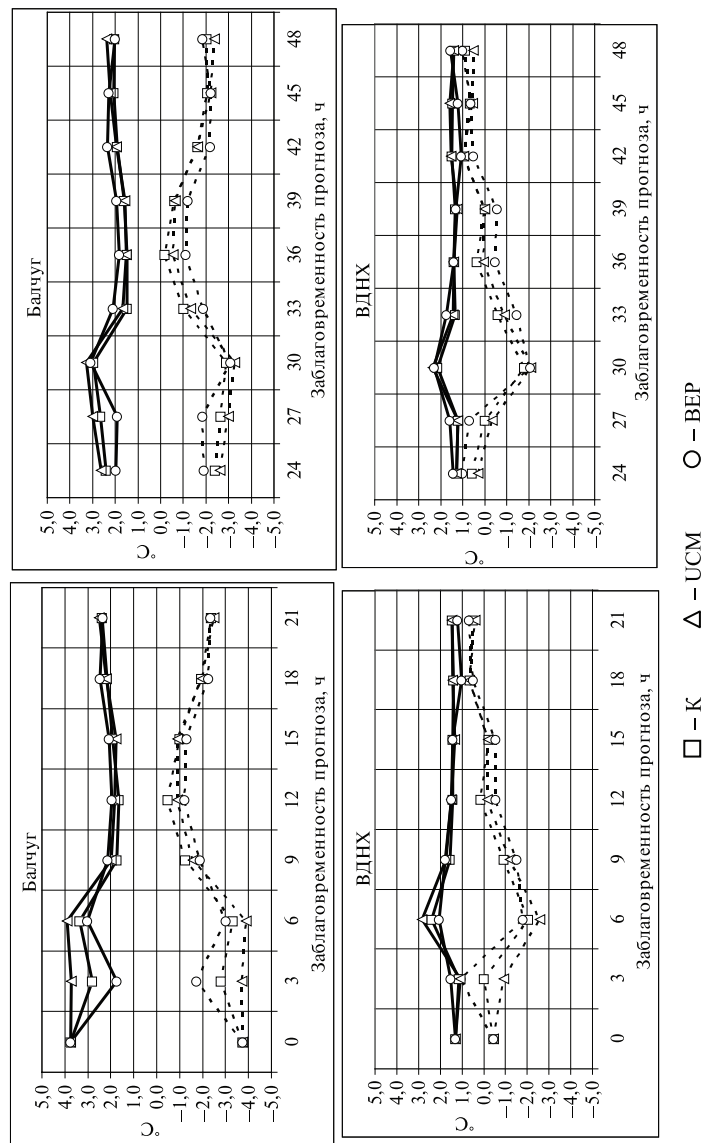


Рис. 6. Систематическая ошибка (пунктирная линия) и средняя абсолютная ошибка (сплошная линия) прогноза температуры воздуха на уровне 2 м на станциях Балчуг и ВДНХ. Слева – первые сутки прогноза, справа – вторые сутки прогноза

были созданы подробные карты типов землепользования, а также описаны морфометрические характеристики, такие, как высота зданий, ширина дорог и крыш и др. Возможно, отсутствие ночного острова тепла в прогнозах для Москвы с учетом городских параметризаций связано с несоответствием заданных в модели по умолчанию морфометрических параметров для города их реальным значениям для центральной части Москвы. В дальнейшем это предположение будет исследовано.

Ход ошибок прогноза температуры на высотах повторяет их ход у земли (рис. 7). На высотах 100–128 м в ночные часы меньшее занижение температуры также приходится на эксперимент с параметризацией города VER, однако его отличие от двух других экспериментов значительно меньше.

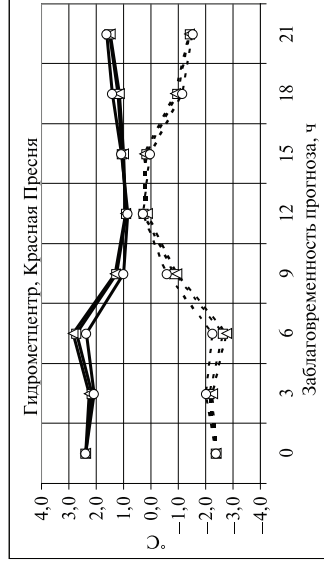
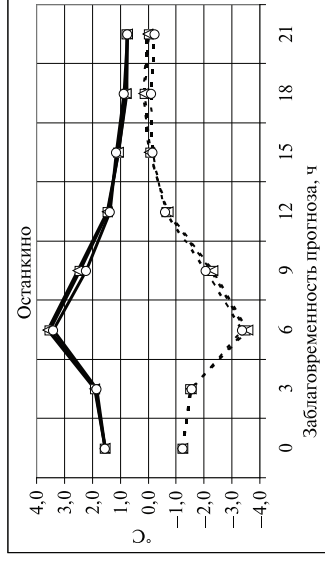
4.2. Скорость ветра

Ошибки прогноза скорости ветра на 10 м показаны на рис. 8. Лучшие результаты в прогнозе скорости ветра получены в экспериментах с параметризацией VER, где отличие от двух других экспериментов в абсолютной ошибке достигает 2 м/с, а систематическая ошибка колеблется около нуля.

На рис. 9 представлены осредненные за период с 1 по 29 августа вертикальные профили скорости ветра по данным наблюдений на телевизионной башне в Останкино и полученные в модели. В ночные часы во всех экспериментах до высоты 450 м наблюдалось завышение скорости ветра относительно наблюдений, а выше этой отметки – занижение. Ближе всего к наблюдениям оказался эксперимент VER. В том же эксперименте весьма точно воспроизведен профиль скорости ветра в нижнем 300-метровом слое в дневные часы, в двух других экспериментах скорость снова оказалась завышена.

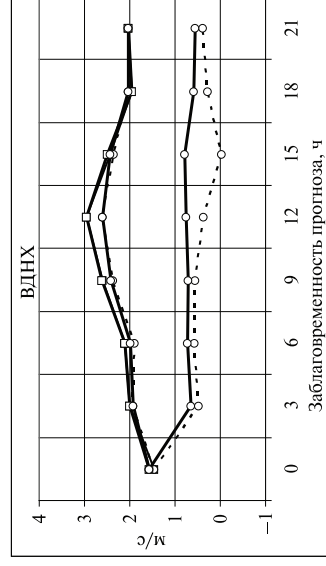
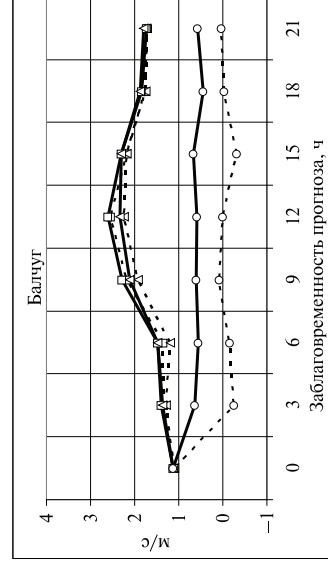
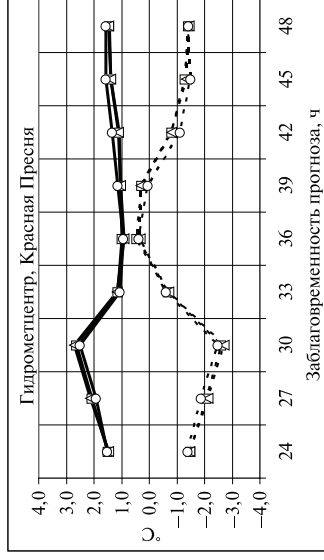
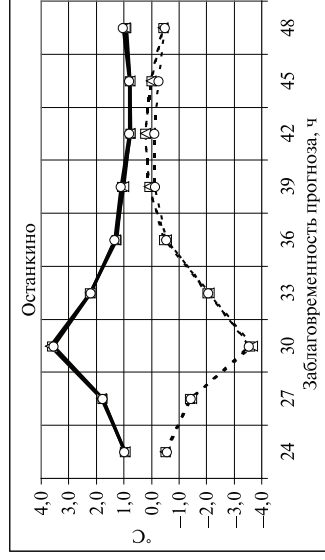
Заключение

В ходе работы была проведена серия экспериментов с моделью WRF с использованием двух методов параметризации городского приземного подслоя, представляющих два принципиально разных подхода к моделированию процессов в пределах урбанизированных территорий. Результаты моделирования сравнивались с данными



□ – К △ – UCM ○ – ВЕР

Рис. 7. Систематическая ошибка (пунктирная линия) и средняя абсолютная ошибка (сплошная линия) прогноза температуры воздуха для телевизионной башни в Останкино и профилера в Гидрометцентре России на высотах 128 и 100 м соответственно. Слева – первые сутки прогноза, справа – вторые сутки прогноза



□ – К △ – UCM ○ – ВЕР

Рис. 8. Систематическая ошибка (пунктирная линия) и средняя абсолютная ошибка (сплошная линия) прогноза скорости ветра на уровне 10 м на станциях Балчуг и ВДНХ. Слева – первые сутки прогноза, справа – вторые сутки прогноза

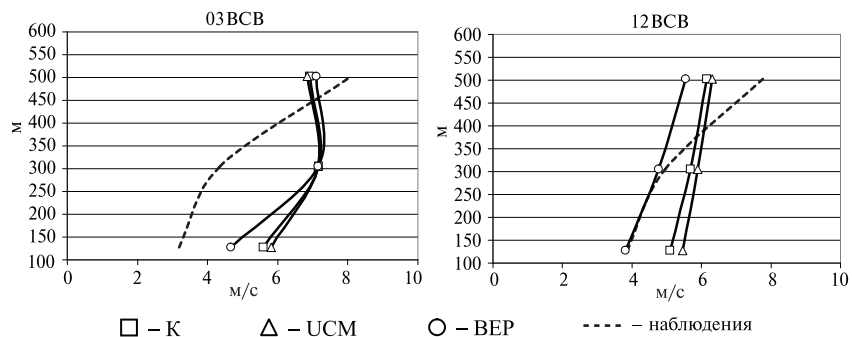


Рис. 9. Средние профили скорости ветра за период с 1 по 29 августа 2007 г. по данным на телевизионной башне в Останкино и полученные в экспериментах. Слева — ночные часы (прогноз от 00 ч ВСВ на 3 часа), справа — дневные часы (прогноз от 00 ч ВСВ на 12 часов)

наблюдений, полученных на станциях Балчуг, ВДНХ, на Останкинской телевизионной башне и с помощью профилемера Гидрометцентра России. В среднем в проведенных экспериментах, охватывающих период с 1 по 29 августа 2007 года, при заданных по умолчанию морфологических параметрах застройки (высота и ширина зданий, ширина дорог) отмечается занижение температуры воздуха на уровне 2 м, что особенно ярко проявляется в центре города. При этом многослойная модель дает более близкие к данным наблюдений результаты, по сравнению с однослойной моделью и контрольным экспериментом. Расчеты с той же параметризацией дают заметно лучший прогноз скорости ветра, улучшая его, по сравнению с контрольным на 1–2 м/с.

Работа частично поддержана фондом РФФИ. Гранты 09-05-00652-а и 10-08-00493-а.

Список литературы

1. *Chen F.* Applications of the Integrated WRF/Urban Modeling System to Regional Air Quality // 2009 CMAS Conference, 20 October 2009, Chapel Hill, NC.
2. *Chen F.* Developing an Integrated Urban Modeling System for WRF // NCEP EMC Seminar, Camp Springs, 18 October 2005.

3. *Chen F.* The Noah Land Surface Model in WRF // A short tutorial. LSM group meeting, 17 April 2007.

4. *Chen F., Kusaka H., Tewari M. et al.* Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area // Extended abstract of the Fifth Conference on Urban Environment, Vancouver, BC, 23–26 August 2004.

5. *Hamdi R., Schayes G.* Validation of Martilli's urban boundary layer scheme with measurements from two mid-latitude European cities // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2007. — N 7. — P. 4513–4526.

6. *Kusaka H., Kimura F.* Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case // J. of Meteorol. Society of Japan. — 2004. — N 82. — P. 67–80.

7. *Kusaka H., Kimura F.* Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model // J. Appl. Meteor. — 2004. — N 43. — P. 1899–1910.

8. *Martilli A., Clappier A., and Rotach M.W.* An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // Boundary-Layer Meteorology. — 2002. — N 104. — P. 261–304.

9. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., and Powers J.G.* A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Note, NCAR/TN-468+STR., 2007. — 88 p.

10. *Swaid H.* The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons // Boundary-Layer Meteorology. — 1993. — N 64. — P. 231–259.

11. <http://megapoli.dmi.dk/>.

12. <http://tarantula.nilu.no/clear/index.htm>.

13. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/urban.html>.