

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.9

М.И. Варенцов¹, Т.Е. Самсонов², А.В. Кислов³, П.И. Константинов⁴ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ
В РАМКАХ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ COSMO-CLM

Рассмотрен первый опыт использования мезомасштабной региональной климатической модели COSMO-CLM, сопряженной с двумя специализированными параметризациями городской подстилающей поверхности, одноуровневой моделью городского подслоя ТЕВ (Town Energy Balance) и упрощенной схемой TERRA-URB, для моделирования летних микроклиматических условий Московской агломерации. Модель использовалась для динамической детализации (даунскейлинга) данных реанализа с учетом особенностей городской подстилающей поверхности, которые приводят к формированию эффекта городского острова тепла. Морфологические параметры застройки, необходимые для рассматриваемых параметризаций, были получены из открытых данных OpenStreetMap с использованием оригинальной ГИС-технологии. Верификация модели была основана на сравнении результатов моделирования с данными наблюдений на метеостанциях и станциях мониторинга качества воздуха, включая ряд новых станций, появившихся в последние годы. Сравнение модельных результатов, полученных с использованием двух рассматриваемых параметризаций, показало, что обе из них способны воспроизводить эффект острова тепла в поле приземной температуры воздуха и временную изменчивость его интенсивности. Однако более тщательный анализ показал существенные различия между двумя параметризациями. Установлено, что тепляющее влияние застройки, моделируемое с использованием схемы TERRA-URB, оказывает влияние не только на застроенные модельные ячейки, но также на соседние свободные от застройки ячейки (например, городские парки), и на вышележащие модельные уровни, формируя термическую аномалию вертикальной протяженностью порядка первых сотен метров, что согласуется с данными наблюдений. А в версии модели со схемой ТЕВ влияние городской застройки практически не передается соседним модельным ячейкам и пограничному слою атмосферы над городом. Таким образом, можно сделать вывод, что версия модели COSMO-CLM с параметризацией TERRA-URB воспроизводит эффект городского острова тепла более реалистично. Также была показана важность корректного определения модельных параметров турбулентной диффузии для адекватного воспроизведения данного эффекта.

Ключевые слова: городской острова тепла, климат города, микроклимат, Московская агломерация, COSMO, региональное климатическое моделирование, глобальное потепление, даунскейлинг, пограничный слой атмосферы.

Введение. Одной из важнейших особенностей развития цивилизации в современную эпоху является урбанизация, приводящая к концентрации значительной части населения Земли в городах, имеющих сравнительно небольшие площади. В таких условиях свойства окружающей среды, в частности, ее микроклиматические особенности, претерпевают изменения. Это, в свою очередь, определяет состояние комфортности/дискомфортности проживания людей. Урбанистические изменения протекают вместе с изменениями глобального климата, причем эти эффекты не независимы – существуют факты, показывающие, что сигналы глобального потепления усиливаются городской средой [Кислов с соавт., 2017]. Понимание физических механизмов

изменений микроклимата, их математическое описание и развитие математического моделирования метеорологического режима городских агломераций является необходимым звеном в разработке перспективного прогноза развития городской территории, учитывающего как внешние воздействия (глобальные изменения климата), так и архитектурно-транспортно-рекреационные и другие планы развития городской среды.

Модель городского климата (микроклимата) должна быть в должной мере пространственно детализированной, чтобы иметь возможность адекватно описывать протекающие процессы (при гидродинамическом моделировании экстремальных метеорологических событий требуется максимально

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, аспирант; *e-mail:* mvar91@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* tsamsonov@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, зав. кафедрой, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* avkislov@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, ст. преподаватель, канд. геогр. н.; *e-mail:* kostadini@mail.ru

детальное пространственное разрешение атмосферных процессов) и, с другой стороны, учитывать важные особенности городской среды. Таким условиям отвечают *мезомасштабные* модели динамики атмосферы (они более глубокие по своему физическому содержанию, чем глобальные модели). Они реализованы, как правило, в конфигурации *региональных* гидродинамических моделей, что позволяет воспроизвести поля метеорологических элементов в пределах выбранной территории для заданного временного периода. Выбор ограниченной территории, по сравнению с реализацией модели на всем земном шаре, существенно экономит компьютерное время, необходимое для численного решения задачи. При этом, однако, возникает необходимость включения боковых граничных условий.

Целью настоящего исследования является апробация и тестирование методики моделирования климатических и микроклиматических особенностей Московской агломерации с использованием региональной мезомасштабной модели атмосферы и двух различных методов параметризации взаимодействия урбанизированной подстилающей поверхности и атмосферы в летний период. Выбор летнего периода обусловлен тем, что, во-первых, именно летом остров тепла Московского мегаполиса наиболее выражен и, во-вторых, летом нет необходимости учитывать влияние снежного покрова, который в городе подвергается антропогенному воздействию (уборка снега и его загрязнение). Также летом существенно меньше чувствительность острова тепла к величине антропогенного потока тепла [Wouters et al., 2016; Fan et al., 2005], аккуратное задание которого является сложной и не решенной до конца задачей.

Материал и методы исследований. В нашем исследовании использована модель COSMO (Consortium for Small-scale Modeling). Это объединенная негидростатическая модель атмосферы и многослойной модели деятельного слоя суши для ограниченной территории. Полное описание модели COSMO приведено в работах [Doms et al., 2011, 2015]. Для решения собственно климатических задач используется версия COSMO-CLM: Climate Limited-area Model Community [Böhm et al., 2006].

В настоящее время в мире в оперативной практике используются и другие негидростатические модели атмосферы, например, модели консорциумов HIRLAM и ALADIN, модель UM Метеослужбы Великобритании и модель WRF, разработанная в США. Свойства всех перечисленных моделей, как и примененных в них параметризаций и методов решения, достаточно близки. Различия в основном связаны с технологическими средствами их реализации.

В качестве *горизонтальных координат* в модели COSMO используется *сдвинутая* сферическая система координат, в которой северный полюс смещен по меридиану. Экватор проходит через Москву, благодаря чему расстояние по меридиану и параллели между соседними узлами сетки близко, если

равно расстояние в градусах. Атмосфера в модели COSMO есть сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере [Doms et al., 2011]. Метод решения конечно-разностного аналога системы уравнений является вариантом метода расщепления по времени Г.И. Марчука.

Модель, реализованная в пределах специально выбранной области, стартует от начальных данных и граничных условий, которые были обеспечены данными реанализа ERA-Interim [Dee et al., 2011]. Кроме того, для запуска модели COSMO-CLM нужны данные о свойствах поверхности. Это параметр шероховатости; листовой индекс; доля ячейки модели, занятая растительностью; глубина залегания корней; тип почвы; доля ячейки, покрытая озерами; и ряд других параметров. В нашем исследовании для их задания используется база данных Globcover [Bontemps et al., 2011], также дополнительно вводятся параметры, характеризующие урбанизированную поверхность (см. ниже). В итоге, поля реанализа и параметры подстилающей поверхности поступают в качестве начальных и граничных условий в программу, интерполирующую их на сетку выбранного домена (области моделирования) с заданным горизонтальным разрешением в готовом для старта модели виде.

В процессе счета происходит регулярное изменение (четыре раза в сутки) боковых граничных условий, и за счет этой подпитки метеорологические поля внутри области остаются близки к реально наблюдавшимся. Дополнительно, для обеспечения более надежной привязки внутреннего модельного режима к реальной атмосферной динамике, использовалась технология «спектрального наджинга» (англ. spectral nudging) [Anders et al., 2014; Storch et al., 2000; Feser, Barcikowska, 2012; Вапенцов с соавт., 2016]. Она заключается в усвоении крупномасштабных составляющих атмосферной циркуляции внутри области моделирования, что дополнительно ограничивает возможность региональной модели далеко «уходить» от реалистичных условий атмосферной циркуляции (определяемых, в нашем случае, данными реанализа). Наджинг осуществляется для полей температуры, давления, геопотенциала и скорости ветра начиная с изобарической поверхности 850 гПа, поскольку именно циркуляционные системы средней и верхней тропосферы осуществляют функции контроля погодных процессов у земной поверхности.

Чтобы учесть влияние города в численных экспериментах, мы использовали две версии модели COSMO с различной параметризацией городской застройки. Первая из них – это однослойная модель городской застройки TEB (Town Energy Balance), впервые предложенная в работе [Masson, 2000], основанная на концепции «городского каньона» [Nunez, Oke, 1977]. Городская поверхность внутри каждой модельной ячейки представляется в виде «бесконечного» каньона, соответствующего улице и расположенным вдоль нее домам. Для такого каньона рассчитываются тепловой и радиационный баланс

стен и поверхности улицы, теплообмен в стенах зданий, и результирующие потоки тепла, влаги и импульса между городским каньоном и атмосферой, которые считаются однородными в пределах модельной ячейки, точнее, в пределах ее урбанизированной части. Антропогенный поток тепла частично явно моделируется (за счет того, что внутри зданий температура поддерживается в холодный сезон выше заданной величины), а частично – задается дополнительно константами, прибавляемыми к потокам явного и скрытого тепла и соответствующим потокам тепла от промышленности и автомобильного транспорта. Предварительные результаты верификации на примере Берлина показали, что она способна воспроизводить характерные значения интенсивности острова тепла для нескольких точек измерений в пределах города [Trusilova, 2013], при этом качество воспроизведения моделью пространственных особенностей и временной динамики данного явления полноценно не анализировалось.

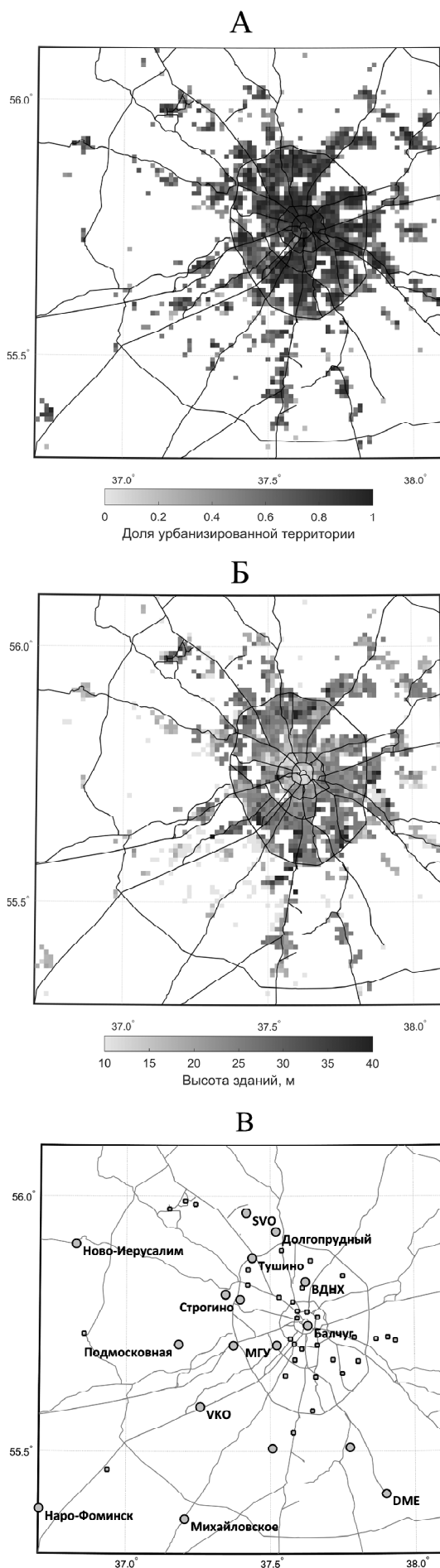
Вторая используемая параметризация называется TERRA-URB. Она значительно проще, чем ТЕВ, и является, по сути, модификацией стандартного модуля подстилающей поверхности TERRA, используемого в модели COSMO. В ней не производится моделирования каких-либо дополнительных процессов, а характерные особенности городской среды учитываются путем модификации стандартных параметров: задаются характерные для искусственных материалов значения теплоемкости и теплопроводности, параметр шероховатости рассчитывается с учетом высоты зданий, а значения отражательной и излучательной способностей корректируются таким образом, чтобы параметризовать эффекты переизлучения и переотражения радиации в городских каньонах [Wouters et al., 2015, 2016]. Также в схеме TERRA-URB иначе задается величина антропогенного потока тепла: для каждого момента времени она определяется на основе заданного среднегодового значения с учетом характерного суточного и сезонного хода, причем последний учитывает зависимость от географической широты [Flanner, 2009]. При этом среднегодовое значение задается отдельно для каждой модельной ячейки. Результаты верификации модели COSMO-CLM с параметризацией TERRA-URB на примере Антверпена приведены в работе [Wouters et al., 2016].

Для использования обеих параметризаций необходим ряд числовых показателей, характеризующих особенности городской застройки и планировки, а именно: доля площади модельной ячейки, занятая урбанизированной территорией; доля площади зданий в площади последней; высота зданий и отношение высоты зданий к ширине улиц. В отличие от других параметров, используемых стандартной версией модели COSMO, глобальных баз данных этих параметров не существует, их необходимо определять самостоятельно. В данном исследовании для их получения была использована оригинальная технология, разработанная в работе [Samsonov et al., 2015]. Она основана на геоинформационном анали-

зе картографических данных о расположении и форме отдельно взятых зданий, выделении среди них «городских каньонов» методом триангуляции, расчета необходимых характеристик этих каньонов и затем осреднении этих характеристик по заданным ячейкам сетки, в данном случае соответствующим ячейкам модели COSMO-CLM с разрешением 1 км. В качестве исходной информации для получения требуемых характеристик была использована открытая база данных OpenStreetMap [Haklay, Weber, 2008], которая, как показано в работе [Samsonov, Konstantinov, 2014], пригодна для получения требуемой информации о морфологии городской поверхности. Таким образом, использование этой технологии позволило рассчитать ширину городских каньонов, определить высоту на основе содержащейся в базе данных информации об этажности зданий (а также с учетом информации о типе поселения для зданий, для которых этажность не указана), оценить долю урбанизированной территории (см. для примера рис. 1, А, Б).

Для экспериментов с TERRA-URB также необходимо задавать пространственное распределение среднегодовой величины антропогенного потока тепла. Его точное определение для Московской агломерации с разрешением в 1 км является сложной задачей, которая не решена (и вряд ли ее всестороннее решение возможно в принципе). Поэтому для задания данного параметра была использована оценка, приведенная в работе [Stewart, Keddedy, 2015], на основании которой среднегодовая величина антропогенного потока тепла для Москвы составляет 75 Вт/м^2 в пересчете на площадь урбанизированной поверхности, что согласуется с рядом других источников [Мягков, 2007; Гинзбург с соавт., 2011; Александров с соавт., 2014]. В экспериментах со схемой ТЕВ, как сказано выше, необходимо отдельно задавать константой значение составляющей антропогенного потока тепла, не связанной с отоплением зданий (то есть поток тепла от автомобилей, промышленности и человеческого метаболизма). Также на основании оценки, приведенной в работе [Stewart, Keddedy, 2015], эта величина задавалась равной 30 Вт/м^2 , что для летних месяцев близко к величине, получаемой из среднегодового значения в 75 Вт/м^2 с учетом годового хода, задаваемого согласно [Flanner, 2009]. Отметим, что среднесуточное значение радиационного баланса в Москве составляет для летних месяцев примерно 200 Вт/м^2 [Горбаренко, Абакумова, 2011]. Таким образом, антропогенный приток тепла составляет порядка 15% от этой величины и сопоставим с нерadiационными составляющими теплового баланса подстилающей поверхности.

Значения теплофизических параметров городской среды задавались одинаково для обеих параметризаций. Так, альбедо всех искусственных поверхностей (дороги, стены и крыши зданий) было принято равным 0,15, излучательная способность – 0,86, объемная теплоемкость – $1,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$, теплопроводность – $0,8 \text{ Вт/м К}$.



Перейдем к более подробному описанию конфигурации численных экспериментов с моделью COSMO-CLM. Конкретный период для численных экспериментов был выбран в июне–августе 2014 года в связи с тем, что для него были доступны необходимые для верификации модели данные метеорологических наблюдений, а также из-за того, что средняя за лето 2014 года интенсивность городского острова тепла (разность температуры между городскими и загородными станциями) была одной из максимальных за последние 30 лет [Varentsov et al., 2016].

Конфигурация вычислений была организована по принципу вложенных друг в друга доменов. Так, данные реанализа использовались как граничные условия для модели с разрешением 12 км с центром в Москве, запускаемой для области размером $\sim 1500 \times 1500$ км, охватывающую территорию центральной России и, частично, Белоруссию, Украину и страны Прибалтики. При расчетах использовалась технология «спектрального наджинга». Полученные модельные поля использовались в качестве начальных и граничных условий для области с разрешением 4 км размером примерно 720×720 км вокруг Москвы. Последний шаг даунскейлинга проводился для области размером примерно 160×160 километров вокруг Москвы с разрешением 1 км, при этом использовались версии модели с двумя описанными выше параметризациями городской застройки. Выбор километрового шага сетки для заключительного шага даунскейлинга обусловлен стремлением явно разрешить крупные особенности городского ландшафта (чередование парков и плотно застроенных территорий и различия между характеристиками застройки отдельных районов). В то же время дальнейшее уменьшение шага сетки, будучи технически возможным, приводит к большим проблемам как с точки зрения возрастания компьютерных ресурсов, так и из-за не полностью понятных в настоящее время условий описания мелкомасштабных особенностей турбулентных пульсаций в рамках мезомасштабных моделей [Wyngaard, 2004]. Поэтому оно принято пока что нецелесообразным. Шаг модели по времени задавался равным 120, 40 и 15 секундам для доменов с разрешением 12, 4 и 1 км соответственно.

Инициализация модели (то есть задание начальных условий для всех моделируемых переменных) для доменов с разрешением 12 и 4 км осуществлялась для 1 мая 2013 года, далее модель работала 1 год и 4 месяца, до 1 сентября 2014 года, «подпи-

Рис. 1. Пространственное распределение задаваемой в численных экспериментах доли городской застройки (А) и средней высоты зданий (Б), а также схема расположения метеостанций (круглые маркеры) и станций МосЭкоМониторинга (квадратные маркеры), использованных для верификации модели (В)

Fig. 1. Spatial distribution of urban morphology parameters, used in numerical experiments: urban area fraction (А) and average building height (Б); location of the weather stations (circle markers) and air quality monitoring stations (square markers), used for model verification (В)

тываясь» постоянно обновляемыми граничными условиями. Столь продолжительное время работы модели было необходимо для адаптации модели деятельного слоя почвы к условиям увлажнения и термического режима. Для заключительной области моделирования с разрешением в 1 км модель инициализировалась 1 мая 2014 года по данным расчетов с более грубым (4 км) разрешением, включающим в себя значения температуры и влажности почвы в 11-метровом слое почвы, полученные после расчета продолжительностью в 1 год.

Опции и параметры модели COSMO-CLM были адаптированы для исследуемого региона. Наиболее важной при этом оказалась коррекция параметров, влияющих на работу турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы в условиях устойчивой стратификации. Она заключалась в значительном (в 20 раз) сокращении *минимально возможных значений* коэффициентов турбулентной диффузии и масштаба подсеточных термических неоднородностей подстилающей поверхности (в 50 раз), влияющих на генерацию турбулентной кинетической энергии [Алферов, Ривин, 2011]. В результате ослабления турбулентного перемешивания в условиях устойчивой стратификации произошла существенная корректировка значений температуры в ночное время. Идея применения такой коррекции была заимствована из работ [Cerenzia et al., 2014; Rossa et al., 2012; Buzzi et al., 2011]. Ввиду высокой чувствительности модели к данным параметрам, для более детального изучения их влияния на результаты расчетов, вся описанная выше цепочка численных экспериментов была посчитана дважды – со стандартными и модифицированными значениями данных параметров.

Результаты исследований и их обсуждение.

Важнейшим результатом исследования является оценка качества работы модельного комплекса. Для ее получения осуществлена верификация результатов моделирования по данным наблюдений на метеорологических станциях и на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) МосЭкоМониторинга, расположенных в Москве и ближайшем Подмоскowie. Данные наблюдений на метеорологических станциях были взяты частично из архива веб-сайта www.gr5.ru, и частично из архива наблюдений, предоставленного ФГБУ «Центральное УГМС». Данные наблюдений на станциях МосЭкоМониторинга (<http://www.mosecom.ru/>) были нам любезно предоставлены руководителями этой организации. Расположение используемых станций показано на рис. 1. В. Несмотря на то, что станции МосЭкоМониторинга не полностью соответствуют стандартам метеорологических измерений, сравнение данных измерений такой станции, расположенной на территории метеорологической обсерватории МГУ, с данными ее стандартных измерений, показало удовлетворительные результаты (средняя за рассматриваемый период ошибка составляет 0,3 °C, СКО – 0,8 °C). Кроме того, имеется опыт их использования для изучения феномена ост-

рова тепла Московского мегаполиса [Gorchakov et al., 2014].

Необходимо отметить, что сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений представляет серьезную методологическую проблему, заключающуюся в том, что кроме неточностей модели и ошибок измерений в подобных задачах всегда присутствует ошибка соотнесения точечных данных измерений и площадных значений результатов моделирования. Приведение данных к одинаковому виду может быть осуществлено разными способами, включая «микроклиматическую интерполяцию» с учетом теплобалансовых особенностей территории [Кислов с соавт., 2006], метод «тройной коллокации» (от англ. triple collocation), опирающийся на использование трех независимых типов данных (например, результаты моделирования, дистанционного зондирования и измерений *in situ*) [Stoffelen 1998], алгоритмы «нечеткой логики» (от англ. fuzzy logic) [Ebert, 2008] и др. При работе с высокодетальными моделями необходимо учитывать также то, что из-за, в значительной степени, стохастического характера многих разрешаемых мезомасштабной моделью процессов (конвекции и пр.), а также из-за возможных ошибок задания параметров подстилающей поверхности для конкретной ячейки, модель может воспроизвести метеорологическое явление не непосредственно в точке, где оно наблюдалось, а где-то в ее близкой окрестности.

Поэтому, чтобы учесть возможные ошибки, связанные с некорректным заданием параметров подстилающей поверхности, при сопоставлении данных моделирования с данными наблюдений проводилась процедура выбора модельного узла: из девяти ближайших к фактическому расположению метеостанции модельных узлов выбирался тот, для которого достигалась наименьшая среднеквадратичная ошибка анализируемого параметра (в данном случае, температуры воздуха). При этом дополнительно ставилось условие соответствия плотности застройки в окрестностях точки измерений и в сопоставляемой с ней модельной ячейке для трех классов станций: 1) станций, расположенных на удалении от городской застройки (например, фоновые загородные станции и городская метеостанция ВДНХ), для сопоставления с которыми выбирались свободные от застройки модельные ячейки; 2) станций, расположенных на границе застройки и зеленых зон (например, обсерватория МГУ), для сравнения с которыми выбирались частично застроенные ячейки; 3) точек измерений, окруженных плотной застройкой (например, метеостанция Балчуг и большая часть станций МосЭкомониторинга), для сравнения с которыми выбирались ячейки с максимальной долей застройки. В результате было установлено, что способ выбора ячейки для сопоставления с данными наблюдений меняет сравниваемые значения температуры на первые десятые доли градуса, а факт наличия городской аномалии создает различия в первые гра-

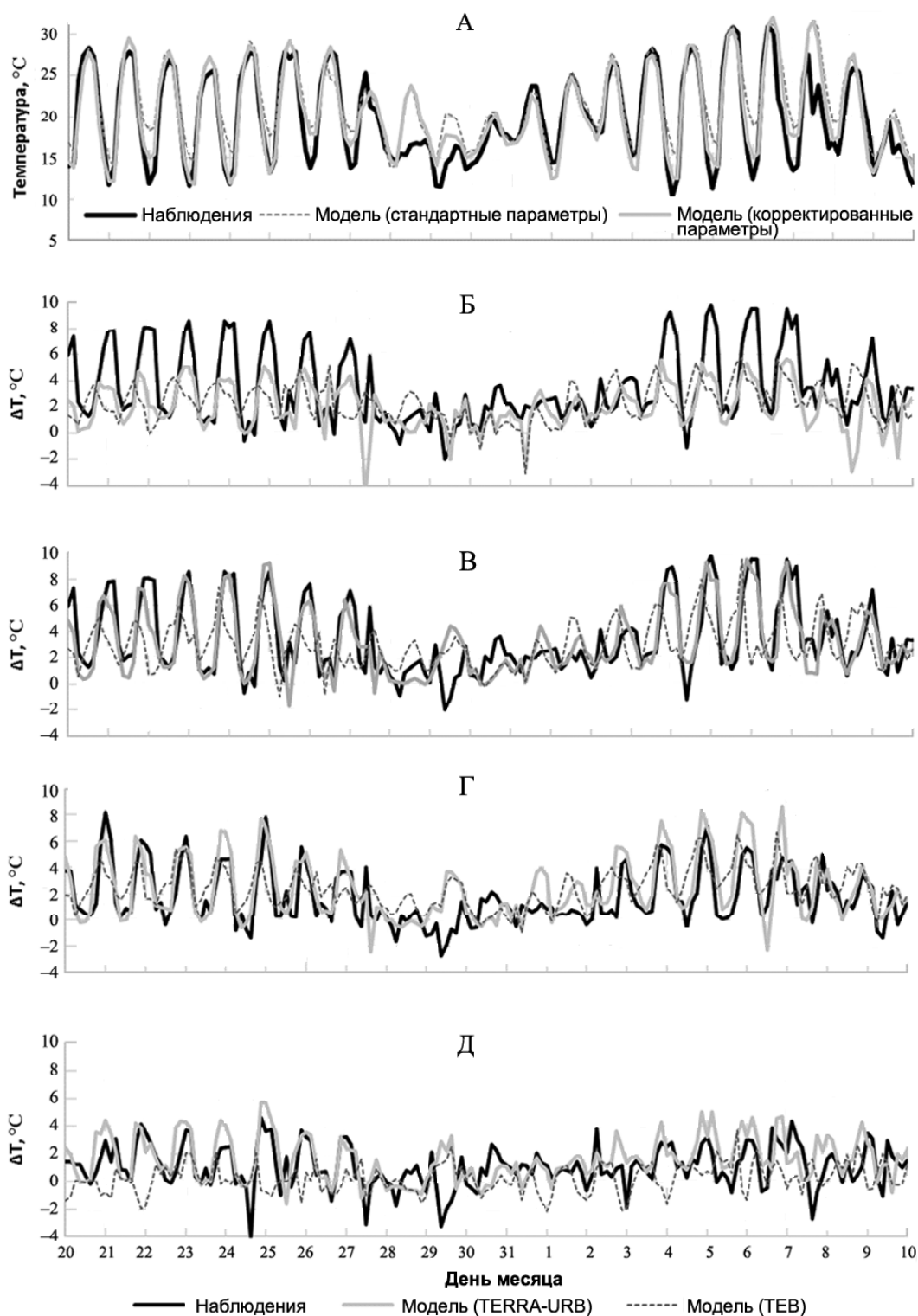


Рис. 2. Динамика средней для трех «фоновых» загородных метеостанций (Наро-Фоминск, Ново-Иерусалим и Малое Сареево) температуры воздуха (А) по данным наблюдений и моделирования (с использованием стандартных и корректированных параметров турбулентной диффузии) и динамика интенсивности острова тепла (разницы температуры ΔT между городскими станциями Балчуг (Б, В), МГУ (Г) и ВДНХ (Д) и средним значением по фоновым станциям) за период с 20 мая по 10 июня 2014 г. по данным наблюдений и моделирования с использованием параметризаций TERRA-URB и ТЕВ, с использованием стандартных (Б) и корректированных (В–Д) параметров турбулентной диффузии

Fig. 2. Variations of air temperature, averaged for three rural weather stations (A) according to observations and modeling (using standard and modified parameters of turbulent diffusion) and variations of urban heat island (temperature difference ΔT between urban stations Balchug (Б, В), MSU (Г) and VDNH (Г) and the average rural temperature) during the period from 20.05.2014 to 10.06.2014 according to observations and modeling with application of TERRA-URB and ТЕВ parameterizations, using standard (Б) and modified (В–Д) parameters of turbulent diffusion

дусы (в среднем). Поэтому оценка качества воспроизведения моделью интенсивности острова тепла практически не зависит от того, как именно выбрать модельный узел для сопоставления с данными наблюдений.

На рис. 2, А показана динамика средней по трем «фоновым» станциям температуры и по результатам двух модельных экспериментов со стандартными и скорректированными параметрами турбулентной диффузии в течение 20 дней теплого сезона 2014 года (20 мая – 10 июня). В это время преобладала антициклоническая погода с четко выраженным суточным ходом температуры. Видно, что в эксперименте со стандартными параметрами турбулентной диффузии модель существенно завышает ночные температуры воздуха, и что их коррекция уменьшает данную ошибку. В целом, можно

отметить, что после такой коррекции модель, за исключением отдельных дней, хорошо воспроизводит термический режим для «фоновых» территорий Московского региона.

Перейдем к оценке результатов моделирования городских условий. На рис. 2 (Б–Д) показана динамика разницы температуры между данными городских станций (метеорологическая обсерватория МГУ, метеостанция Балчуг и метеостанция ВДНХ) и средней температурой по трем фоновым станциям. Эту величину можно считать характеристикой интенсивности острова тепла для данных точек города. Первый вывод, который можно сделать на основе графиков для станции Балчуг – при использовании стандартных параметров турбулентной диффузии (рис. 2, Б) модель с обеими рассматриваемыми параметризациями городской за-

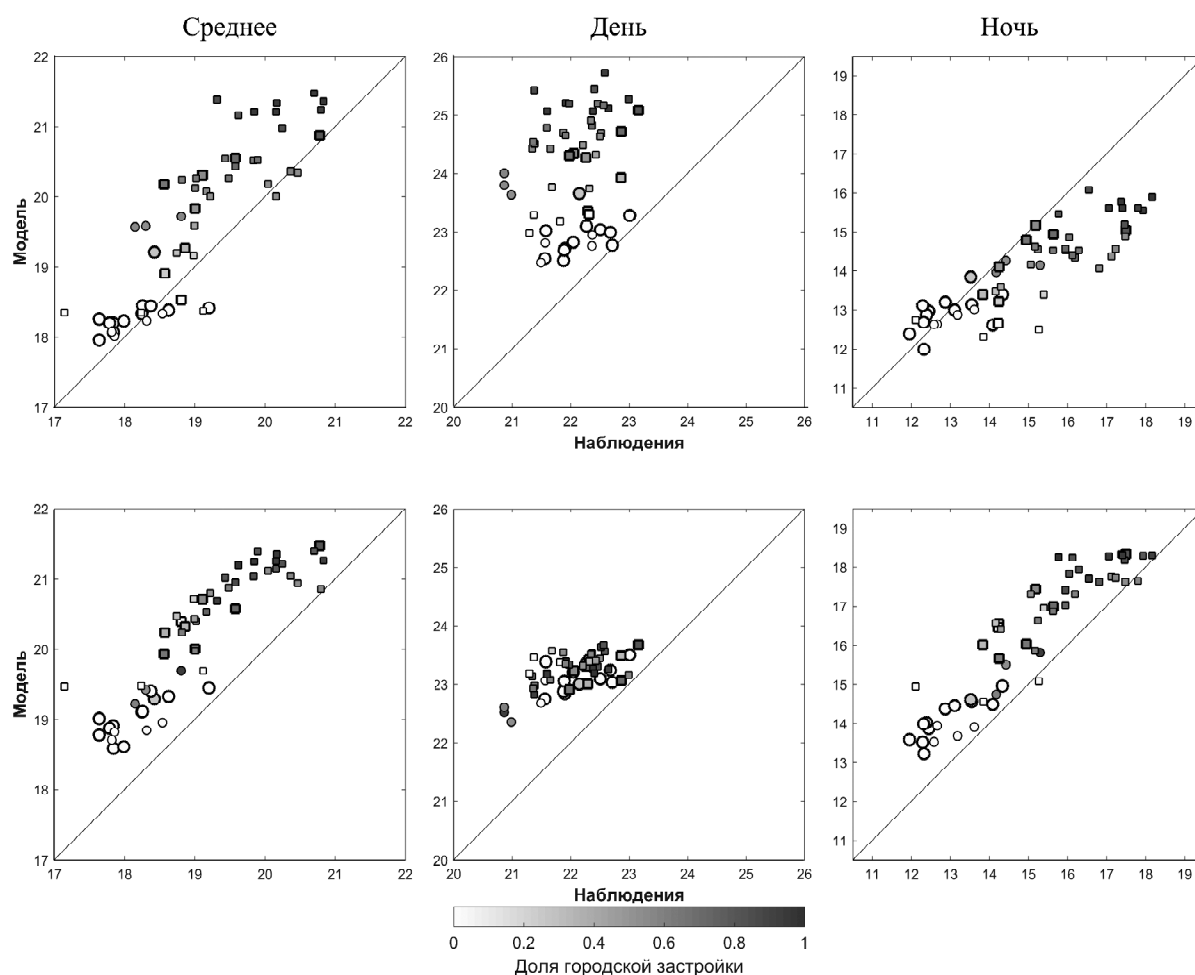


Рис. 3. Сравнение среднесуточных (слева), средних дневных (по центру) и ночных (справа) температур за лето 2014 года по данным наблюдений метеостанций (крупные маркеры) и станций МосЭкоМониторинга (маленькие маркеры) для Москвы и ближайшего Подмосковья и результатам моделирования с использованием схемы ТЕВ (сверху) и схемы TERRA-URB (снизу). Квадратными маркерами показаны точки измерений, расположенные в пределах 25 км от центра города, круглыми – расположенные за пределами этого расстояния. Интенсивностью цвета маркеров показана доля городской застройки в соответствующей точке измерений модельной ячейке

Fig. 3. Comparison of daily mean (left), mean day-time (center) and mean nocturnal (right) temperatures for 2014 summer season according to observations at weather stations (big markers) and air-quality monitoring stations (small markers) in Moscow and surrounding area and results of modeling with parametrizations TEB (top) and TERRA-URB (bottom). Square markers are used for observation sites within 25 km from the city center and circle markers for sites beyond this distance. Color of the markers represents urban fraction in a corresponding model cell

стройки сильно занижает максимальные значения интенсивности острова тепла, наблюдаемые в ясные безветренные ночи в условиях устойчивой стратификации атмосферы. А в экспериментах с модифицированными параметрами турбулентной диффузии обе параметризации городской застройки относительно неплохо воспроизводят суточную динамику интенсивности острова тепла (дневной минимум и вечерний/ночной максимум) и его вариации, связанные с синоптическими условиями для трех рассматриваемых метеостанций (рис. 2, В–Д). При этом модель со схемой ТЕВ оказывается несколько хуже модели со схемой TERRA-URB: во-первых, она сдвигает максимум интенсивности острова тепла (в части случаев он достигается на 3 часа ранее, чем по данным наблюдений); во-вторых, она занижает максимальные значения интенсивности острова тепла для метеостанций Балчуг и ВДНХ. При использовании в качестве московской станции данных метеорологической обсерватории МГУ преимущество TERRA-URB не столь очевидно, так как использование данной параметризации приводит к завышению интенсивности острова тепла. Можно предположить, что для МГУ имеет место неадекватное сравнение модельной ячейки (содержащей примерно равные доли городской застройки и естественной территории) с данными наблюдений, полученными в лесопарковой зоне с редкими строениями, окружающей МГУ.

Для метеостанций Балчуг и ВДНХ такой проблемы нет: данные измерений сопоставляются с однородными модельными ячейками – практически полностью застроенной и полностью свободной от застройки соответственно.

Для более подробной оценки качества воспроизведения моделью пространственной структуры полей температуры в пределах Московской агломерации результаты моделирования, полученные с использованием скорректированных параметров турбулентной диффузии и параметризаций ТЕВ и TERRA-URB, были сопоставлены со средними за анализируемый летний сезон среднесуточными, средними дневными (за 12 UTC) и средними ночными (за 0 UTC) температурами по данным метеостанций Росгидромета и станций Мосэкомониторинга, расположенных в радиусе 100 км от центра города (рис. 3).

В случае использования обеих параметризаций городской застройки для среднесуточных температур точки на соответствующих диаграммах рассеяния окружают прямую с углом наклона, близким к 45 градусам, то есть средние различия температуры между городом и фоном модель воспроизводит корректно (на фоне имеющегося общего завышения температуры на 0,5–1 °C, наблюдаемого как для фоновых, так и для городских точек изменений). Однако в случае использования ТЕВ наблюдается существенное (примерно на 2–3 °C)

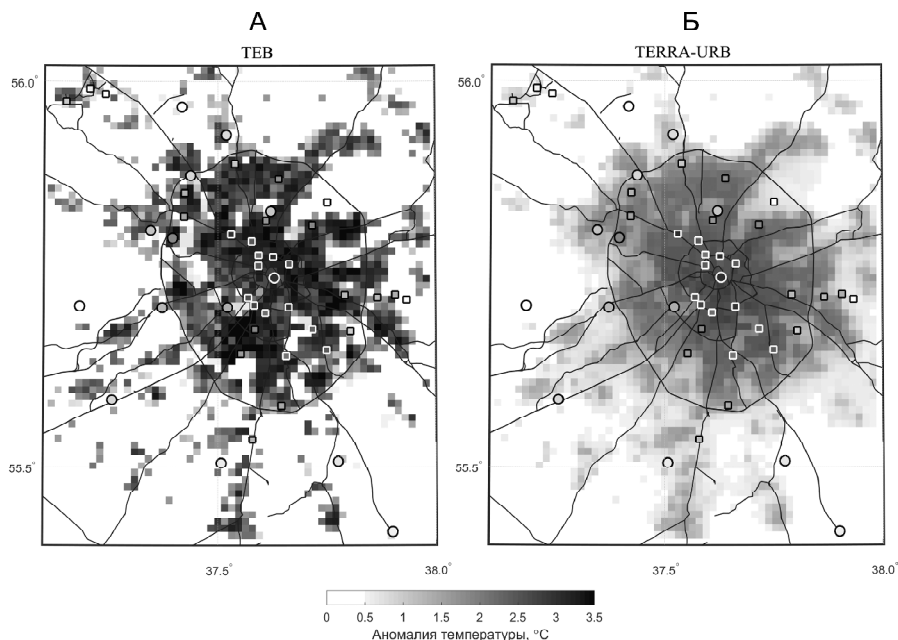


Рис. 4. Пространственное распределение аномалии среднесуточной температуры воздуха (отклонения от среднего значения по фоновым Подмосковная, Наро-Фоминск и Ново-Иерусалим), осредненной за лето 2014 г. ячейки по данным моделирования (показаны фоном) с использованием параметризаций городской застройки ТЕВ (А) и TERRA-URB (Б) и наблюдений на метеостанциях (круглые маркеры) и станциях МосЭкоМониторинга (квадратные маркеры), интенсивность цвета заливки которых соответствует данным наблюдений. Значения аномалии температуры менее 0,5 °C показаны белым цветом

Fig. 4. Spatial distribution of the anomaly of daily mean temperature (deviation from mean value for three rural stations – Podmoskovnaya, Naro-Fominsk and Novo-Ierusalim) for 2014 summer season according to modeling results (shown by colored background) and observations at weather stations (circle markers) and air quality stations (square markers); marker fill color represents the values of observations. Anomaly values below 0,5 °C are shown in white

завышение дневной температуры воздуха для станций, которым соответствуют «городские» ячейки; при этом чем больше доля застройки, тем больше ошибка. Если сравнить ночные температуры, то в случае использования TERRA-URB распределение точек на соответствующей диаграмме рассеяния показывает ярко выраженную корреляцию значений при угле наклона линии регрессии 45 градусов. В случае использования ТЕВ, точки также концентрируются вдоль линии регрессии, но с меньшим наклоном за счет существенного (на 2–3 °C) занижения моделью температуры для наиболее теплых точек, расположенных в центральной части

мегаполиса в окружении плотной застройки. Также заниженной оказывается температура в городских парках (белые квадратные маркеры на диаграммах), что согласуется с графиком для станции ВДНХ на рис. 2.

Еще более наглядно принципиальные различия между двумя версиями демонстрируют пространственные поля среднесуточной температуры, построенные по данным моделирования и приведенные на рис. 4. Хорошо видно, что модель со схемой ТЕВ воспроизводит существенно более пестрое поле температуры, чем модель со схемой TERRA-URB, причем основные различия наблюдаются в городских

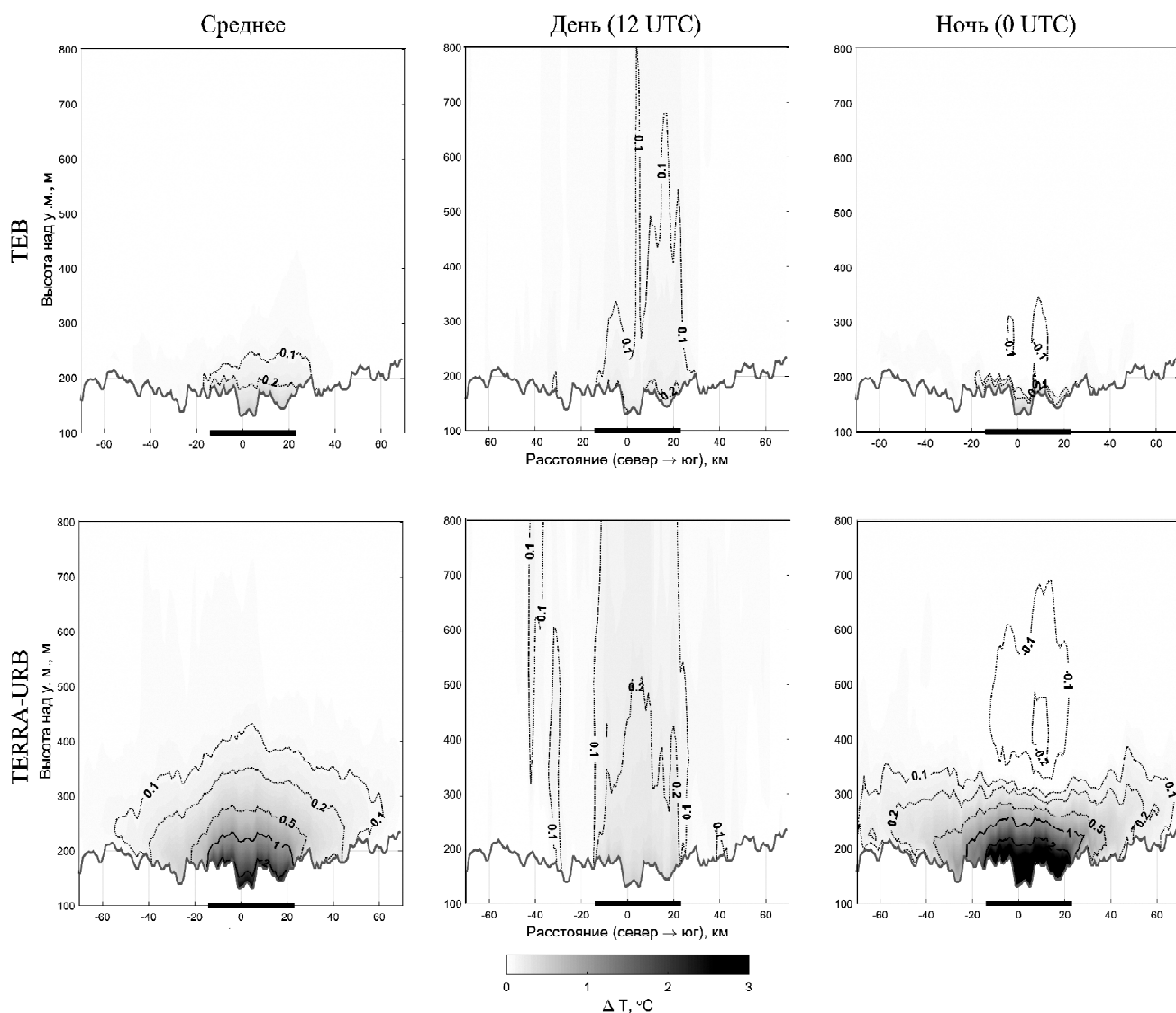


Рис. 5. Вертикальный разрез через центр Москвы с севера на юг, построенный для разницы среднесуточных (слева), средних дневных (по центру) и средних ночных (справа) значений температуры воздуха за лето 2014 г. между экспериментами с включенной и выключенной параметризацией городской застройки для версий модели COSMO-CLM со схемой ТЕВ (сверху) и со схемой TERRA-URB (снизу). Ось X направлена с севера на юг, нулю соответствует положение метеостанции Балчуг, черный отрезок показывает, где данный разрез пересекает урбанизированную территорию

Fig. 5. Vertical cross-section through the center of Moscow, build for the difference of daily mean (right), mean day-time (center) and nocturnal (right) temperatures for 2014 summer season between the results of numerical experiments with and without application of urban parameterization for the model version with TEB (top) and with TERRA-URB (bottom). X axis is directed from north to south, zero point represents the location of Balchug weather station, bold black segments show where the cross-section goes through the urbanized area

парках и на окраинах мегаполиса: в случае использования схемы ТЕВ такие модельные ячейки оказываются не теплее фоновых (закрашены белым цветом), в то время как при использовании схемы TERRA-URB они оказываются холоднее застроенных ячеек, но теплее «фоновых» загородных, что лучше соответствует данным наблюдений. При этом для застроенных ячеек модель со схемой ТЕВ воспроизводит более высокие температуры, чем со схемой TERRA-URB. Видимо, влияние городской застройки, моделируемое схемой ТЕВ и учитываемое при расчете локальной температуры в модельных ячейках, практически не передается соседним свободным от застройки ячейкам.

Для понимания того, как модель воспроизводит вертикальную протяженность создаваемой городом термической аномалии, были проанализированы вертикальные разрезы *разницы температуры воздуха* между численным экспериментом с включенной городской параметризацией и экспериментом с выключенной параметризацией (то есть в котором город отсутствует в модельном климате), построенные для среднесуточной температуры и отдельно дневных (12 UTC) и ночных сроков (0 UTC) и приведенные на рис. 5. Видно, что включение схемы TERRA-URB приводит к распространению термической аномалии на 100–200 м вверх ночью, примерно на 1000 м днем и 200–300 м в среднем за сутки, что в целом соответствует представлениям о вертикальной протяженности городского острова тепла Московского мегаполиса [Локощенко с соавт., 2016; Кислов с соавт., 2017; Кадыгров с соавт., 2002]. Примечательно, что для ночных сроков модель со схемой TERRA-URB также воспроизвела приподнятый «остров холода» над городом на высотах 300–500 м, формирование которого также отмечается по данным наблюдений [Локощенко с соавт., 2016]. В то же время, на включение схемы ТЕВ приземные модельные уровни в атмосфере реагируют слабо: среднесуточная величина отклика не превышает 0,2 °C, и он распространяется по вертикали не более чем на 100 м, практически от-

сутствует отклик ночью, а дневная интенсивность и вертикальная протяженность отклика существенно меньше, чем в случае использования TERRA-URB (при том, что приземная температура днем сильно завышается версией модели со схемой ТЕВ).

Выводы:

— проведенное исследование показало, что мезомасштабная модель COSMO-CLM с параметризацией TERRA-URB и модифицированными параметрами турбулентной диффузии способна воспроизводить влияние урбанизированной поверхности на термический режим Московского мегаполиса в летний период, включая пространственно-временную изменчивость и вертикальную протяженность острова тепла. Важным признаком адекватной работы данной версии модели является то, что она воспроизводит отепляющее влияние города не только для урбанизированных ячеек, но и для свободных от застройки городских парков и примыкающих к городу территорий. Версия модели COSMO-CLM с параметризацией ТЕВ воспроизводит пространственно-временную изменчивость городского острова тепла значительно хуже, и, главное, практически не воспроизводит формирование термической аномалии в пограничном слое атмосферы над городом, что позволяет предположить, что взаимодействие моделей атмосферы и городской застройки в данном случае описано некорректно.

Таким образом, успешно показана возможность использования мезомасштабной модели атмосферы, дополненной параметризацией городской подстилающей поверхности и снабженной реалистичной информацией о ее морфологических характеристиках для моделирования термического режима крупной агломерации с высоким пространственным разрешением. В перспективе полученный инструмент может быть использован для региональной детализации атмосферных полей для урбанизированных территорий, а также для изучения влияния тех или иных изменений городской застройки и планировки на микроклимат.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Русским географическим обществом (грант № 12/2014/РГО-РФФИ) и Российском фондом фундаментальных исследований (гранты № 15-35-70006 мол_а_мос и № 15-05-03911 А). Анализ и модельная обработка выходных данных оригинальной ГИС-технологии была выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 15-17-30009. Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам ФГБУ «Центральное УГМС» и лично начальнику отдела метеорологии и климата Н.А. Терешенку и начальнику отдела гидрологических прогнозов Н.А. Ефремовой, а также руководству ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставление использовавшихся в данном исследовании данных метеорологических наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алферов Д.Ю., Ривин Г.С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-Ru: ансамблевый прогноз // Тр. Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 5–16.
- Александров Г.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С. Антропогенные потоки тепла в столичных агломерациях России и Китая // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 1. С. 101–106.

- Варенцов М.И., Веземская П.С., Заболотских Е.В., Репина И.А. Оценка качества воспроизведения полярных мезоциклонов по данным реанализов и результатам регионального климатического моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 168–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-168-191.

Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439. № 2. С. 256–259.

Горбаренко Е.В., Абакумова Г.М. Вариации радиационного баланса подстилающей поверхности по многолетним наблюдениям МО МГУ // Метеорология и гидрология. 2011. № 6. С. 42–54.

Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных / Доклады Академии наук. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.

Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Моск. ун-та. 2017 (в печати).

Кислов А.В., Розинкина И.А., Чернышов А.В. Технология моделирования микроклиматических особенностей горной территории в рамках моделей общей циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 45–53.

Локощенко М.А., Корнеева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е. О высотной протяженности городского «острова тепла» над Москвой // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.

Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат / Под ред. М. Мягкова. М.: Архитектура-С, 2007. 340 с.

Anders I., Paumann M., Chimani B., Hofstätter M. Impacts of using spectral nudging on COSMO-CLM simulations of single Vb-events // 3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop Proceedings, 2014. P. 154–155.

Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225–235.

Bontemps S., Defourny P., Bogaert E.V., Arino O., Kalogirou V., Perez J.R. GLOBCOVER 2009-Products description and validation report. 2011.

Buzzi M., Rotach M.W., Holtslag M., Holtslag A.A. Evaluation of the COSMO-SC turbulence scheme in a shear-driven stable boundary layer // Meteorologische Zeitschrift. 2011. V. 20. № 3. P. 335–350.

Cerenzia I., Tampieri F., Tesini M.S. Diagnosis of Turbulence Schema in Stable Atmospheric Conditions and Sensitivity Tests // Cosmo Newsletter. 2014. V. 14.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hölm E.V., Isaksen L., Källberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828.

Doms G., Foerstner J., Heise E., Herzog H.-J., Mironov D., Raschendorfer M., Reinhardt T., Ritter B., Schrodin R., Schulz J.-P., Vogel G. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part II: Physical Parameterization. COSMO-Model 4.20. Offenbach, 2011, 154 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoPhysParamtr.pdf>

Doms G., Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. COSMO-Model 5.1. Offenbach, 2015, 158 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumes.pdf>

Ebert E.E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: a review and proposed framework // Meteorological applications. 2008. V. 15. № 1. P. 51–64.

Fan H., Sailor D.J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes // Atmospheric Environment. 2005. T. 39. № 1. С. 73–84.

Feser F., Barcikowska M. The influence of spectral nudging on typhoon formation in regional climate models // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. № 1. P. 14–24.

Flanner M.G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. № 2.

Haklay M., Weber P. Openstreetmap: User-generated street maps // IEEE Pervasive Computing. 2008. V. 7. № 4. P. 12–18.

Gorchakov G.I., Kadygrov E.N., Kunitsyn V.E., Zakharov V.I., Semutnikova E.G., Karpov A.V., Kurbatov G.A., Miller E.A., Sitanskii S.I. The Moscow heat island in the blocking anticyclone during summer 2010 // Doklady Earth Sciences. Springer Science & Business Media, 2014. V. 456. № 2. P. 736–740.

Masson V.A. Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models // Boundary-Layer Meteorology. 2000. V. 94. № 3. P. 357–397.

Nunez M., Oke T.R. Energy Balance of an Urban Canyon // J. Applied Meteorology. 1977. V. 16. P. 11–19.

Rossa A.M., Domenichini F., Szintai B. Selected COSMO-2 verification results over North-eastern Italian Veneto // COSMO Newsletter. 2012. V. 12. P. 64–71.

Stewart I., Kennedy C. Estimating anthropogenic heat release from megacities. ICUC9 – 9th International Conference on Urban Climate held jointly with the 12th Symposium on the Urban Environment, 20–24 July 2015, Toulouse, France.

Samsonov T.E., Konstantinov P.I. Openstreetmap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling // Extended Abstract Proceedings of the GIScience 2014, September 23–26, Vienna, Austria. GeoInfo Series. 2014. V. 40. Hochschule, TU Vienna Vienna, Austria. P. 395–399.

Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling // Urban Climate. 2015. V. 13. P. 122–139.

Stoffelen A. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. № C4. P. 7755–7766.

Storch H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes // Monthly weather review. 2000. V. 128. № 10. P. 3664–3673.

Trusilova K., Früh B., Brienens S., Walter A., Masson V., Pigeon G., Becker P. Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM // J. Applied Meteorology and Climatology. 2013. V. 52. P. 2296–2311.

Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E. Investigation of detailed spatial structure of the Moscow urban heat island with application of the newest meteorological observations and regional climate modelling // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly 2016. V. 18. EGU General Assembly. 2016.

Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., van Lipzig N.P. The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modelling // Urban Climate. 2015. V. 11. P. 24–50.

Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van Lipzig N.P. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1. 0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 9. P. 3027–3054.

Wyngaard J.C. Toward numerical modeling in the «Terra Incognita» // J. the atmospheric sciences. 2004. V. 61. № 14. P. 1816–1826.

Поступила в редакцию 18.08.2016
Принята к публикации 09.06.2017

M.I. Varentsov¹, T.E. Samsonov²,
A.V. Kislov³, P.I. Konstantinov⁴

SIMULATIONS OF MOSCOW AGGLOMERATION HEAT ISLAND WITHIN THE FRAMEWORK OF THE REGIONAL CLIMATE MODEL COSMO-CLM

The paper discusses the first application of the mesoscale regional climate model COSMO-CLM coupled with two spatialized urban canopy parameterizations, single-layer urban canopy model TEB (Town Energy Balance) and bulk parameterization TERRA-URB for the modeling of summer microclimatic conditions in Moscow agglomeration. The model was used for dynamic downscaling of reanalysis data with due regard to specific physical features of urban surface, which are responsible for the formation of urban heat island (UHI). Urban morphology parameters, needed for the parameterizations, were calculated from the OpenStreetMap database using the original GIS-based technology. Verification of the model was based on the comparison of modeling results and temperature observations of weather stations and air-quality monitoring stations, including new stations which were installed during recent years. Comparison of modeling results, obtained with two urban canopy parameterizations, has shown that both of them are able to simulate UHI within the near-surface air temperature field and temporal variations of its intensity. However, more detailed analysis shows a significant difference between two schemes. Warming influence of urbanized surface simulated with TERRA-URB affects both model cells with buildings, and adjacent «green» cells (first of all urban parks) and higher model levels, resulting in a temperature anomaly of few hundred meters high, which is in good agreement with observation data. In the TEB scheme the influence of urbanized surface on adjacent model cells and the boundary layer above the city was less pronounced. Therefore, we can conclude that the COSMO-CLM model with TERRA-URB parameterization reproduces the UHI phenomenon in more realistic way. The importance of correct definition of model parameters of turbulent diffusion for adequate simulations of UHI behavior was also shown.

Key words: urban heat island, urban climate, microclimate, Moscow agglomeration, COSMO, regional climate modeling, global warming, downscaling, atmospheric boundary layer.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Geographical Society (project № 12/2014/РГО-РФФИ) and the Russian Foundation for Basic Research (projects № 15-35-70006 мол_а_мос and 15-05-03911-а).

Authors are grateful to the administration and staff of the Central UGMS, personally to N.A. Tereshenok, head of the section of meteorology and climatology, and N.A. Efremova, head of the section of hydrological forecasts, as well as to the administration of Mosecomonitoring for providing the data of meteorological observations which were used for the study.

REFERENCES

- Alferov D.Y., Rivin G.S. Sistema mezomasshtabnogo prognoza pogody COSMO-Ru: ansamblevyy prognoz [System of mesoscale weather forecast COSMO-Ru: ensemble forecast] // Proceedings of Hydrometeorologica Center of Russia. 2011. V. 346. P. 5–16 (in Russian).
- Alexandrov G.G., Belova I.N., Ginzburg A.S. Antropogennyye potoki tepla v stolichnykh aglomeratsiyah Rossii i Kitaya [Anthropogenic heat fluxes in capital agglomerations in Russia and China] // Doklady Akademii Nauk. 2014. V. 457. № 1. P. 101–106 (in Russian).
- Anders I., Paumann M., Chimani B., Hofstätter M. Impacts of using spectral nudging on COSMO-CLM simulations of single Vb-events. In: 3rd International Lund Regional-Scale Climate Modelling Workshop Proceedings, 2014, P. 154–155.
- Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications. COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225–235.
- Buzzi M., Rotach M.W., Holtlag M., Holtlag A.A. Evaluation of the COSMO-SC turbulence scheme in a shear-driven stable boundary layer. Meteorologische Zeitschrift, 2011. V. 20. № 3. P. 335–350.
- Cerenzia I., Tampieri F., Tesini M.S. Diagnosis of Turbulence Schema in Stable Atmospheric Conditions and Sensitivity Tests. Cosmo Newsletter. 2014. V. 14.
- Champeaux J.L., Masson V., Chauvin F. ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. Meteorological Applications. 2005. V. 12. № 1. P. 29–32.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hölm E.V., Isaksen L., Källberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépau J.-N. Vitart. The ERA-Interim reanalysis: configuration and

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, postgraduate student; e-mail: mvar91@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Head of Department, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkislov@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Senior Lecturer, PhD in Geography; e-mail: kostadini@mail.ru

performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828.

Doms G., Foerstner J., Heise E., Herzog H.-J., Mironov D., Raschendorfer M., Reinhardt T., Ritter B., Schrodin R., Schulz J.-P., Vogel G. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part II: Physical Parameterization. COSMO-Model 4.20. Offenbach, 2011, 154 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoPhysParamtr.pdf>.

Doms G., Baldauf M.A. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. COSMO-Model 5.1. Offenbach, 2015, 158 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>.

Ebert E.E. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. Meteorological applications. 2008. V. 15. № 1. P. 51–64.

Fan H., Sailor D.J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. Atmospheric Environment. 2005. T. 39. № 1. C. 73–84.

Feser F., Barcikowska M. The influence of spectral nudging on typhoon formation in regional climate models. Environmental Research Letters. 2012. V. 7. № 1. P. 14–24.

Flanner M.G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. № 2.

Haklay M., Weber P. OpenStreetMap: User-generated street maps. IEEE Pervasive Computing. 2008. V. 7. № 4. P. 12–18.

Ginzburg A.S., Belova I.N., Raspletina N.V. Antropogennyye potoki tepla v gorodskih aglomeratsiyah [Anthropogenic heat fluxes in urban agglomerations] // Doklady Akademii Nauk. 2011. V. 439. № 2. P. 256–259 (in Russian).

Gorbarenko E.V., Abakumova G.M. Variatsii radiatsionnogo balansa podstilayushhej poverhnosti po mnogoletnim nabljudeniyam MO MGU [Variations of surface radiation balance according to the long-term observations at the MSU meteorological observatory] // Meteorologiya i gidrologiya. 2011. № 6. P. 42–54 (in Russian).

Gorchakov G.I., Kadyrov E.N., Kunitsyn V.E., Zakharov V.I., Semutnikova E.G., Karpov A.V., Kurbatov G.A., Miller E.A., Sitanskii S.I. The Moscow heat island in the blocking anticyclone during summer 2010. Doklady Earth Sciences. Springer Science & Business Media, 2014. V. 456. № 2. P. 736–740.

Kadyrov E.N., Kuznecova I.N., Golicyn G.S. Ostrov tepla v pogranichnom sloe atmosfery nad bol'shim gorodom: novye rezul'taty na osnove distantsionnykh dannykh [Heat island in the atmospheric boundary layer over a big city: new results according to remote sensing data] // Doklady Akademii Nauk. 2002. V. 385. № 4. P. 541–548 (in Russian).

Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alekseeva L.I. «Ostrov tepla» moskovskoy aglomeratsii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepneniya [«Heat island» of the Moscow agglomeration and urban amplification of global warming] // Vestnik Moskovskogo universiteta. 2017 (in Russian, in print).

Kislov A.V., Rozinkina I.A., Chernyshov A.V. Tehnologiya modelirovaniya mikroklimaticheskikh osobennostej gornoj territorii v ramkah modelej obshhej tsirkulyatsii atmosfery [Technology of modeling the microclimatic features of mountain area within the framework of global atmospheric circulation models] // Meteorologiya i gidrologiya. 2006. № 10. P. 45–53 (in Russian).

Lokoshchenko M.A., Korneeva I.A., Kochin A.V., Duboveckij A.Z., Novitskiy M.A., Razin P.E. O vysotnoj protyazhennosti gorodskogo

«ostrova tepla» nad Moskvoy [Vertical extension of the urban heat island over Moscow] // Doklady Akademii nauk. 2016. V. 466. № 2. P. 213–217 (in Russian).

Masson V. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. Boundary-Layer Meteorology. 2000. V. 94. № 3. P. 357–397.

Myagkov M.S., Gubernskij Ju.D., Konova L.I., Lickевич V.K. Gorod, arhitektura, chelovek i klimat [City, architecture, man and climate]. Moscow: Arhitektura-S, 2007. 340 p. (in Russian).

Nunez M., Oke T.R. Energy Balance of an Urban Canyon. J. Applied Meteorology. 1977. V. 16. P. 11–19.

Rosenzweig C., Solecki W., Slosberg R. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. A report to the New York State Energy Research and Development Authority. 2006. 5 p.

Rossa A.M., Domenichini F., Szintai B. Selected COSMO-2 verification results over North-eastern Italian Veneto. COSMO Newsletter. 2012. V. 12. P. 64–71.

Stewart I., Kennedy C. Estimating anthropogenic heat release from megacities. ICUC9 – 9th International Conference on Urban Climate held jointly with the 12th Symposium on the Urban Environment, 20–24 July 2015, Toulouse, France.

Samsonov T.E., Konstantinov P.I. OpenStreetMap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling. Extended Abstract Proceedings of the GIScience 2014, September 23–26, Vienna, Austria. GeoInfo Series. 2014. V. 40. Hochschulerschaft, TU Vienna Vienna, Austria. P. 395–399.

Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. Urban Climate. 2015. V. 13. P. 122–139.

Storch H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. Monthly weather review. 2000. V. 128. № 10. P. 3664–3673.

Stoffelen A. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation. J. Geophysical Research. 1998. V. 103. № C4. P. 7755–7766.

Trusilova K., Früh B., Brienens S., Walter A., Masson V., Pigeon G., Becker P. Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM. J. Applied Meteorology and Climatology. 2013. V. 52. P. 2296–2311.

Varentsov M.I., Verezemskaya P.S., Zabolotskikh E.K., Repina I.A. Ocenka kachestva vosproizvedeniya polynarnykh mezociklonov po dannym reanalizov i rezul'tatam regional'nogo klimaticheskogo modelirovaniya [Evaluation of the quality of polar mesocycles reproducing by reanalyses data and results of the regional climate modeling] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 4. P. 168–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-168-191 (in Russian).

Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., van Lipzig N.P. The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modeling. Urban Climate. 2015. V. 11. P. 24–50.

Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van Lipzig N.P. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v 1.0 for atmospheric modeling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 9. P. 3027–3054.

Wyngaard J.C. Toward numerical modeling in the «Terra Incognita». J. Atmospheric sciences. 2004. V. 61. № 14. P. 1816–1826.

Received 18.08.2016

Accepted 09.06.2017