

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

Научная статья

УДК 551.509.5

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-99-109

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ЛАНДШАФТОВ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ WRF-ARW ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ О КЛИМАТЕ МЕГАПОЛИСА И ЕГО ПРИГОРОДОВ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО РЕГИОНААлен Арманович Коспанов¹, Павел Игоревич Константинов²^{1,2} Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия² Российский Гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия¹ kospanov.alen@gmail.com² kostadini@mail.ru

Аннотация. Современный уровень развития городской метеорологии как синтетической науки, включающей в себя элементы климатологии, экологии, урбанистики и вычислительной математики, требует создания адекватных баз данных для метеорологических параметров, поскольку только они могут быть востребованы для решения задач как прикладных наук, так и фундаментальных исследований.

Поэтому полученная информация о внутригородском распределении температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра должна отвечать наиболее строгим критериям качества. Наиболее современным методом для получения баз данных высокого разрешения является гидродинамическое моделирование с использованием региональных моделей прогноза погоды и климата (WRF, COSMO_RU, ENVIRO-HIRLAM итд).

Однако для горизонтального разрешения порядка километра уже требуется использовать так называемые многоуровневые параметризации городского приземного слоя атмосферы, учитывающего вертикальную структуру внутри городской застройки. Исходя из этого перспективно адаптировать самые современные физически обоснованные параметризации нижней атмосферы, такие как Building Energy Parameterization (BEP) и Building Energy Model (BEM) для популярной, свободно распространяемой региональной модели WRF-ARW, на примере Московского региона (Москва + Московская область). Обзору преимуществ данного подхода и результатов первых вычислительных экспериментов и посвящена данная статья.

В статье даются оценки точности воспроизведения температуры и относительной влажности воздуха для полноценного эксперимента по динамическому даунскейлингу данных реанализа ERA5 в пределах Московского региона за 2010 год (как период с заметными сезонными контрастами температуры и включающий в себя печально известную экстремальную волну жары на ЕТР) и приводятся соображения относительно природы пространственных различий в пределах домена.

Ключевые слова: городской климат, WRF-ARW, многоуровневые параметризации BEP-BEM, Московский регион

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-938 «Развитие инфраструктуры для оценки качества воздуха в Московском мегаполисе». Работа А.А. Коспанова в области проведения численных экспериментов по адаптации модели WRF-ARW к крупному шагу сетки частично выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-27-00254.

Для цитирования: Коспанов А. А., Константинов П. И. Применение многоуровневой параметризации городских ландшафтов в климатической модели wrf-arw для создания базы данных о климате мегаполиса и его пригородов: первые результаты на примере Московского региона // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 4(67). С.99–109. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-99-109

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-99-109

APPLICATION OF MULTI-LAYER PARAMETERIZATION OF URBAN LANDSCAPES IN WRF-ARW REGIONAL MODEL TO CREATE A DATABASE ON THE CLIMATE OF A MEGACITY AND ITS SUBURBS: FIRST RESULTS FOR THE MOSCOW REGIONAlen A. Kospanov¹, Pavel I. Konstantinov²^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia¹ kospanov.alen@gmail.com² kostadini@mail.ru

*Метеорология**Коспанов А.А., Константинов П.И.*

Abstract. The current development level of urban meteorology as a synthetic science that includes elements of climatology, ecology, urban studies, and computational mathematics requires the creation of adequate databases of meteorological parameters: only in this way can they be properly used for solving problems of both applied sciences and fundamental research.

Therefore, obtaining information on the intra-urban distribution of air temperature, relative humidity, and wind speed must meet the most stringent quality criteria. The most modern method for obtaining high-resolution databases is hydrodynamic modeling with the use of regional weather and climate forecast models (WRF, COSMO_RU, ENVIRO-HIRLAM, etc.).

However, for horizontal resolution of about a kilometer it is already necessary to use so-called multilevel parameterizations of the urban surface layer of the atmosphere, which take into account the vertical structure within the urban area. For this purpose, it seems promising to adapt the most modern physically based parameterizations of the lower atmosphere, such as Building Energy Parameterization (BEP) and Building Energy Model (BEM), for the popular, freely distributed regional model WRF-ARW, which has been used in our study for the Moscow region (Moscow + Moscow Oblast). The article reviews the advantages of this approach and the results of the first computational experiments. We provide estimates of the accuracy of temperature and relative humidity simulation for a full-fledged experiment on dynamic downscaling of ERA5 reanalysis data within the Moscow region for 2010 (as a period with notable seasonal temperature contrasts, including the infamous extreme heat wave over European Russia).

Keywords: urban climate, WRF-ARW, multilevel parameterization BEP-BEM, Moscow region

Funding: the research was financially supported by Grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2021-938 'Development of infrastructure for air quality assessment in the Moscow megacity'. The work of A.A. Kospanov in part of numerical experiments on the adaptation of WRF-ARW model to large spatial resolution was partially supported by the Russian Science Foundation under project No. 23-27-00254.

For citation: Kospanov, A. A., Konstantinov, P. I. (2023). Application of multi-layer parameterization of urban landscapes in WRF-ARW regional model to create a database on the climate of a megacity and its suburbs: first results for the Moscow region. *Geographical Bulletin*. No. 4(67). Pp.99–109. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-99-109

Введение

Уже в первом десятилетии XXI в. развитие численных методов прогноза погоды и климата характеризовалось переходом от гидростатического к негидростатическому моделированию. Передовые метеорологические центры осуществляют прогноз погоды для ограниченной территории с шагом сетки порядка первых километров, явно разрешающим конвективные процессы. Однако подобный шаг сетки иногда не особенно практичен для долгосрочных климатических вычислительных экспериментов в силу нескольких причин. Одним из главных ограничивающих факторов является высокая вычислительная емкость подобных расчетов: поэтому при переходе от глобальных климатических моделей к моделированию климата на региональном масштабе необходимо четко понимать преимущества и точность данного подхода на количественном уровне.

Результаты данных расчетов обычно «упаковываются» в городские базы данных метеорологических полей, которые отличаются от глобальных (например, базы данных «реанализа») более высоким пространственным и временным разрешением. Ограниченный размер области счета позволяет использовать сложные параметризации процессов подсеточного масштаба, дающие возможность точно воспроизводить динамику метеорологических полей под влиянием местных факторов, например, сложного рельефа или городского климата. Кроме того, важно различать «реанализ» и «даунскейлинг» – телескопизацию: процесс, по сути, масштабирования, переход от более грубого шага сетки к более мелкому. Создание «базы данных реанализа» подразумевает усвоение данных наблюдений, что не всегда возможно при воспроизведении регионального климата в силу ограниченных вычислительных ресурсов или закрытых данных.

В данной работе речь пойдет о создании базы данных первого рода – данных динамического даунскейлинга глобального реанализа ERA5 [5] на примере 2010 г., как года с весьма контрастными погодными условиями.

Но почему же не ограничиться данными прямых метеорологических измерений? Дело в том, что в рамках своей основной задачи синоптические станции при размещении должны отражать климатические характеристики фоновой территории, не измененной антропогенной деятельностью, исходя из чего использование данных синоптической сети наблюдений для анализа городского климата методологически невозможно. При этом воспроизведение микроклиматических особенностей внутри города необходимо в связи с изменчивостью темпе-

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

ратур, в том числе экстремальных. Поэтому развитие именно городских микроклиматических баз данных является перспективным путем изучения городского климата на локальном масштабе. В качестве правильных инструментов для качественного моделирования авторы предлагают рассмотреть модель WRF-ARW с возможностью параметризации физических процессов городского пограничного слоя Building Energy Parametrization (BEP) и Building Energy Model (BEM) на примере Московского региона.

Модельный комплекс WRF-ARW

WRF – модельный комплекс, позволяющий решать задачи численного моделирования на различных масштабах. Благодаря открытому коду и длительному времени разработки именно эта модель стала наиболее часто используемой при исследованиях различных атмосферных процессов. Основными блоками модельного комплекса являются блок препроцессинга, динамическое ядро и блок постпроцессинга [21] (рис. 1).

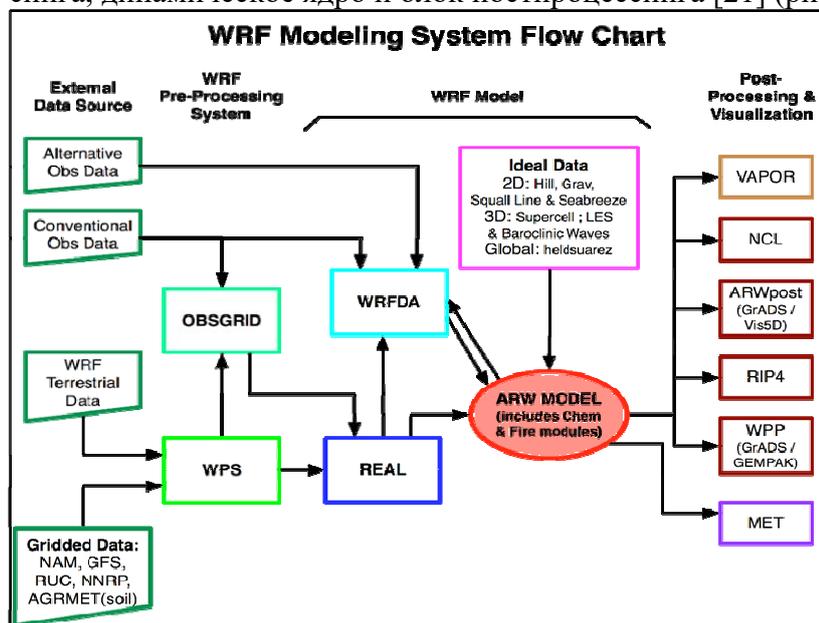


Рис. 1. Блок-схема модельного комплекса WRF [21]

Fig.1. Block diagram of the WRF modeling complex [21]

Различные дополнения к модели позволяют проводить эксперименты в области атмосферной химии, прогноза пожароопасности, а также гидрологическое моделирование.

Предыдущая версия модели – MM5 также использовалась для моделирования термического режима, например, Уральского региона [8], с высоким пространственным разрешением (8 км). Важной частью любой модели атмосферы являются параметризации процессов подсеточного масштаба, напрямую не воспроизводимыми WRF-ARW. Здесь уместно сравнение с фотографией – если размер объекта фотографирования одного порядка с размером пиксела, то свойства объекта, в частности, пространственная неоднородность внутри него, не будут переданы.

Исходя из поставленной задачи наиболее интересными для исследования были схемы параметризации подстилающей поверхности, пограничного слоя атмосферы и городских процессов. При шаге сетки 1 км большинство домов и улиц будут усредняться рядом с деревьями, поэтому очень важно знать хорошо параметризованные процессы городской циркуляции. По этой причине наиболее перспективным представляется использование параметризации BEM (Building Energy Model) [14], [15], которая будет подробно рассмотрена ниже. Если кратко, она позволяет рассчитать большое количество потоков тепла внутри городского ландшафта (“в” и “из” здания, между этажами, отопление), а также эффект городского каньона, обеспечивая при этом получение наиболее точных данных о распределении метеороло-

При моделировании с помощью динамического ядра ARW решается система уравнений Эйлера для сжимаемой жидкости. Прогностическими переменными являются: горизонтальные и вертикальная составляющие скорости ветра, а также данные отклонения давления на поверхности, потенциальная температура, параметры, отражающие состояние воды в различных фазах в атмосфере и геопотенциала относительно заданного стандартного распределения этих величин в атмосфере [17].

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

гических величин в городе. При этом следует иметь в виду, что успешные схемы параметризации пограничного слоя атмосферы, представленные в модели WRF [7], [22], не всегда совместимы с «городскими» схемами параметризаций [15]. Исключениями являются только схемы Bougeault-Lacarrere [1], YSU [11] и Mellor-Yamada-Janjic [6], которые могут включать и городские процессы.

Обзор существующих методик описания процессов в городских ландшафтах в региональных моделях атмосферы и климата

Параметризация UCM (Urban Canopy Model). Концептуально одномерные параметризации городской подстилающей поверхности были представлены еще в работе [13], где за единичный элемент городского энергетического баланса принимается городской каньон. Именно в городских каньонах производится обмен импульсом и энергией с атмосферой. Подобные модели применяются при сетках модели с первым уровнем выше, чем характерная высота зданий в городе, например, 50 м. Х. Кусака, как автор первых одноуровневых параметризаций для модели WRF, в статье 2001 г. [9] предлагает следующую схему для теплового баланса города.

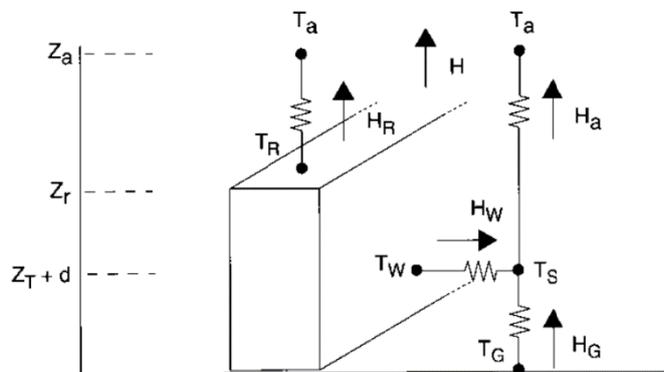


Рис.2. Схема одноуровневой параметризации процессов в городском полого атмосферы [9]

Fig.2. Scheme of single-level parameterization of processes in the urban canopy [9]

В данной схеме T_a – температура воздуха на первом уровне модели с высотой z_a , H – потоки тепла от крыши и стен, T – температуры крыши и стен.

В параметризации также используется схема упрощения геометрии зданий – улицы представлены двумерными симметричными городскими каньонами с бесконечной длиной. Несмотря на это радиационные процессы имеют трехмерное представление, так как учитывают и направление улицы, и изменение зенитного угла Солнца в течение суток.

Цель разработчиков схемы параметризации – описание эффекта городской подстилающей поверхности и явное задание переноса тепла и импульса между городом и свободной атмосферой. Для этого в параметризации рассчитываются температуры стен, крыш и дорог по соответствующему радиационному балансу. Подобная схема одноуровневого города представлена в городских параметризациях других региональных моделей. Например, схожая схема используется в параметризации TERRA_URB в модели COSMO [19], [20].

При рассмотрении исходного кода параметризации выделяется несколько типов переменных. Во-первых, это городские константы, которые можно задать вручную. Для этого в ядре модели создан отдельный файл, в котором можно задать альбедо стен, крыш и дорог, теплоемкость элементов зданий, поток антропогенного тепла, а также граничное условие на наименьшую температуру здания. Во-вторых, это входные переменные из мезомасштабной модели, а именно косинус зенитного угла Солнца, потоки радиации (зависит от облачности и влажности), скорость и направление ветра на модельных уровнях, влажность воздуха и температура. В-третьих, это выходные переменные, которые являются форсингом параметризации в модели. В чистом виде обратный форсинг задается изменением геометрии потоков тепла, появлением явного и скрытого тепла. В виде взаимозависимых переменных изменяются скорость и направление ветра после учета трения о здания, а также температуры поверхностей.

Подводя итоги, важными характерными особенностями данной параметризации являются вычислительная простота, дающая возможность сократить не только время вычислений, но и большое количество настраиваемых параметров города. Ограничение модели –

*Метеорология**Коспанов А.А., Константинов П.И.*

иногда недостаточный учет обмена теплом внутри зданий, т. е. главное ограничение состоит в парадигме одноуровневой модели [10]: большие ошибки в воспроизведении скорости ветра. Это свойство не позволяет решать задачи воспроизведения застойных эффектов в городе, а также оценивать реальные скорости ветра в пределах застройки. Поэтому следующим эволюционным шагом является развитие многослойных параметризаций городской атмосферы.

Многослойная параметризация BEP + BEM (Building Energy Model). Разработка параметризации городской подстилающей поверхности коллективом ученых, разработавших BEM (Building Energy Model), началась еще в начале 2000-х гг. Изначально была создана схема поверхностного обмена импульсом и теплом для мезомасштабной модели. Согласно [14], необходимость создания параметризации заключалась в описании городского качества воздуха. В частности, рассматривается два масштаба – городской масштаб первых десятков километров, где происходит выброс загрязнителей. Казалось бы, причем здесь город в понимании работы как непосредственно остров тепла? Изначально подробное описание высотной структуры города и турбулентного обмена импульсом позволило далее более точно описать городское замедление ветра.

По мере разработки параметризаций BEP и BEM в 2010 г. вышла статья, в которой сохранилось описание данной модели как новой парадигмы городского моделирования [14], [15]. Впервые были совмещены описания процессов переноса внутри зданий и процессы городской мезомасштабной метеорологии. Антропогенные потоки тепла задавались не как константа, а как зависящая от метеопараметров (температуры и скорости ветра в неявном виде через поддержание температуры и влажности в здании) величина. Это позволило значительно улучшить воспроизведение городского острова тепла в мезомасштабной модели WRF в сравнении с предыдущими параметризациями [16].

Первоначально, однако, была разработана схема BEP [12], которая не включала в себя потоки тепла внутри зданий, а также влияние количества человек на этаже. В отличие от UCM рассматриваемая трехмерная модель городской подстилающей поверхности учитывает вертикальное распределение источников и стоков тепла и импульса в виде зданий. Наряду с этим учитываются влияние вертикальных (стены) и горизонтальных (крыши, дороги) поверхностей на импульс, турбулентная кинетическая энергия и потенциальная температура, а также расчет потоков тепла от стен и дорог, факторы затененности, отражения и постепенной диссипации тепловой энергии Солнца внутри городских каньонов посредством нагрева поверхностей.

Параметризация BEM является продолжением схемы BEP, где впервые уделяется большое внимание переносу тепла по стенам, крышам и дорогам (прямую теплопередачу), тепловому обмену через окна, обмену теплом между этажами в здании, выделению тепла техникой, людьми и отоплением/кондиционированием зданий. Таким образом, оценивается влияние на температуру отопления, что впервые отмечалось в мезомасштабных моделях. Дальнейшие доработки параметризации BEM позволили ввести большое количество дополнительных параметров, которые можно изменять для каждого конкретного домена моделирования.

Важная веха в развитии BEM – возможность использования концепции локальных климатических зон (LCZ), предложенных в 2012 г. [18] и подробно описанных в [2], [3] Этот концепт включает в себя разделение города на несколько типов застройки с различными параметрами поверхности, что позволяет более подробно и точно описать неоднородную структуру застройки города с точки зрения потоков тепла и импульса.

*Метеорология**Коспанов А.А., Константинов П.И.***Методика модельных экспериментов для Московского мегаполиса**

Начиная с версии 4.3 в модели WRF появилась прямая возможность работы с картами локальных климатических зон. Для использования данных о локальных климатических зонах с помощью Python-скрипта анализируется тип подстилающей поверхности в домене. В случае городского типа подстилающей поверхности данные вырезаются, а далее на место городских ячеек переносится соответствующая локальная климатическая зона. Для работы программы необходимо, чтобы карта локальных климатических зон для города была больше по размеру, чем домен. В связи с тем, что имеющийся набор данных на момент проведения эксперимента не охватывал интересующий домен, моделирование проводилось без использования локальных климатических зон с помощью более традиционного подхода, в котором данные о подстилающей поверхности получаются из стандартного загружаемого набора данных MODIS с разрешением 15 угловых секунд.

Согласно проведенному районированию городские параметры для схемы ВЕР-ВЕМ включают в себя следующие параметры:

- 1) альбедо отдельно дорог, стен, крыши;
- 2) теплоемкость отдельно дорог, стен, крыши;
- 3) возможность ввода зеленых крыш с выбором вида растительности и профиля ирригации;
- 4) кондиционирование зданий – эффективность, комфортная температура и влажность, время включения и выключения кондиционеров, доля зданий с кондиционированием;
- 5) поддерживаемая температура внутри зданий;
- 6) количество людей на этаже;
- 7) поток тепла от техники;
- 8) параметры шероховатости крыши;
- 9) распределение зданий по высотам;
- 10) направление улиц.

Вариация этих параметров позволяет не только получать систему мезомасштабного моделирования конкретно для данного региона, но и проводить эксперименты, например, включать или отключать отопление и кондиционирование по всей Москве или добавлять зеленые крыши на весь город. Тестовые эксперименты для всего Московского региона в данной парадигме охватывали весь 2010 год.

Так, в рамках эксперимента проводился динамический даунскейлинг распространяемых в открытом доступе данных реанализа ERA5 с 1950 г. на широтно-долготной сетке с шагом $0,25^\circ$, что соответствует примерно 27 км между соседними узлами сетки. Наряду с этим использовались для телескопизации две последовательно вложенные сетки модели WRF-ARW (параметризация города ВЕР-ВЕМ) – с горизонтальными шагами сетки 5 км и 1 км. Самый крупный домен имел горизонтальный размер 240×240 ячеек и 52 вертикальных уровня. Временное разрешение выходных данных составило 1 ч.

Вычисления производились на суперкомпьютере Гидрометцентра России CrayXC40 на 17 узлах по 36 ядер в каждом. Параметры распараллеливания вычислений в модели WRF ограничивали максимальное количество узлов – 576, поэтому для задачи чтения и записи было запрошено еще 36 ядер: действие осуществлялось 4 процессами по 9 ядер в каждом. В результате средняя скорость счета составила около 40–45 модельных суток за реальные сутки.

Для удобства дальнейшей работы в рамках численных экспериментов была реализована в программном коде система вывода файлов, в которых содержались параметры, измеряемые на метеостанциях Московской области, а также основные параметры на изобарических поверхностях. Это было необходимо, поскольку полный выходной файл модели содержит более 100 переменных, большая часть из которых не пригодна для сравнения ввиду отсутствия данных наблюдений. Выходной массив метеорологических переменных приведен в табл. 1.

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

Таблица 1

Составляющие выходного массива метеорологических параметров атмосферы по итогам эксперимента с WRF-ARW
Components of the output array of meteorological parameters based on the results of the WRF-ARW experiment

Положение / модельный уровень	Метеорологический параметр
На высоте 2 м над подстилающей поверхностью	Удельная влажность
	Температура воздуха
На высоте 10 м над подстилающей поверхностью	Компоненты скорости ветра
Приземный слой	Атмосферное давление на поверхности Земли
	Поток тепла в почву
	Глубина снежного покрова
	Косинус зенитного угла Солнца
	Высота над уровнем моря
	Температура поверхности
	Накопленная сумма осадков
	Накопленная сумма осадков в твердой фазе
	Мгновенные потоки коротковолновой и длинноволновой радиации восходящие и нисходящие на уровне поверхности земли
	Высота пограничного слоя атмосферы
	Поток явного тепла
	Поток скрытого тепла
	На модельных уровнях WRF-ARW
Балл облачности	
На изобарических поверхностях	Компоненты скорости ветра
	Температура воздуха
	Относительная влажность
	Геопотенциал
	Скорость ветра
	Температура точки росы
	Удельная влажность

Результаты и обсуждение

Итогом работы, как и логично предположить, разумно представить оценки точности воспроизведения полей метеорологических величин с помощью WRF-ARW с параметризацией ВЕР-ВЕМ для Московского региона (в сравнении с данными станций сети ВМО). Тем не менее методически важно отметить, что для данных с подобным пространственным разрешением необходимо знать точные координаты метеостанции. Зачастую координаты метеостанций небольших городов представлены координатами центра города. Это вызывает завышение ошибок в воспроизведении некоторых метеорологических переменных, в особенности температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра. В данной работе были уточнены координаты метеостанций по данным спутниковых снимков. Для метеостанций аэропорта были выбраны точки в центре летного поля.

В табл. 2 и 3 приводятся данные по средней (CO), среднеквадратической (RMSE) ошибках и коэффициента корреляции между рядом наблюдений и рядом моделированных значений (corr) для района каждой сетевой метеостанции Московского региона отдельно для дневных (12 ч), ночных (00 ч) и среднесуточных значений температуры и относительной влажности воздуха.

Таблица 2

Воспроизведение стационарных данных полей температуры воздуха для Московского региона с помощью WRF-ARW
Simulation of air temperature station data in the Moscow region using WRF-ARW

Район метеостанции	Значение температуры воздуха на высоте 2 м, град С								
	ночная (00 ГСВ)			дневная (12 ГСВ)			среднесуточная		
	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr
Клин	1,07	2,32	0,98	-0,70	1,78	0,99	0,24	1,97	0,98
Дмитров	1,64	2,32	0,98	0,10	1,52	0,99	0,95	1,87	0,99
Переславль-Залесский	0,67	2,20	0,98	-0,40	1,76	0,99	0,27	1,98	0,98

Метеорология
Коспанов А.А., Константинов П.И.

Окончание табл. 2

Район метеостанции	Значение температуры воздуха на высоте 2 м, град С								
	ночная (00 ГСВ)			дневная (12 ГСВ)			среднесуточная		
	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr
Александров	2,32	3,06	0,97	0,15	1,63	0,99	1,17	2,23	0,98
Волоколамск	0,41	1,89	0,98	-0,31	1,67	0,99	0,06	1,81	0,98
Можайск	2,21	2,91	0,97	-0,02	1,56	0,99	1,17	2,17	0,98
Ново-Иерусалим	2,65	3,23	0,98	0,22	1,57	0,99	1,48	2,34	0,98
Шереметьево (аэропорт)	0,71	1,97	0,98	-0,56	1,64	0,99	0,04	1,78	0,99
Немчиновка	1,04	1,97	0,99	-0,19	1,50	0,99	0,43	1,64	0,99
Малое Сареево	1,03	2,31	0,98	-0,16	1,51	0,99	0,36	1,83	0,98
Павловский Посад	1,22	2,30	0,98	-0,41	1,71	0,99	0,46	1,91	0,98
Внуково (аэропорт)	0,31	1,65	0,99	-0,38	1,54	0,99	-0,08	1,59	0,99
Петушки	0,05	1,83	0,98	-0,50	1,72	0,99	-0,14	1,88	0,98
Москва (центр, Балчуг)	0,99	1,61	0,99	-0,06	1,40	0,99	0,37	1,45	0,99
Малоярославец	2,17	2,79	0,98	0,22	1,73	0,99	1,35	2,20	0,98
Наро-Фоминск	1,48	2,41	0,98	-0,05	1,62	0,99	0,77	1,96	0,98
Москва (ВДНХ)	2,76	3,13	0,98	0,30	1,51	0,99	1,46	2,18	0,98
Домодедово (аэропорт)	1,52	2,54	0,98	-0,63	1,76	0,99	0,62	2,00	0,98
Михайловское	1,04	2,26	0,98	-0,23	1,74	0,99	0,50	1,93	0,98
МГУ	1,91	2,37	0,98	-0,01	1,47	0,99	0,94	1,85	0,99
Серпухов	2,46	2,94	0,98	0,39	1,77	0,99	1,46	2,26	0,98
Москва (северо-запад, Тушино)	2,56	2,93	0,98	0,30	1,56	0,99	1,46	2,18	0,98
Коломна	1,16	2,42	0,98	-0,46	1,95	0,99	0,40	2,10	0,98
Кашира	0,15	1,69	0,99	-0,13	1,79	0,99	0,08	1,78	0,99

Таблица 3

Воспроизведение станционных данных полей относительной влажности воздуха для Московского региона
Simulation of relative humidity station data in the Moscow region using WRF-ARW

Район метеостанции	Значения относительной влажности воздуха на высоте 2 м, %								
	Ночная (00 ГСВ)			Дневная (12 ГСВ)			Среднесуточная		
	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr	CO	RMSE	corr
Клин	-5,51	9,67	0,66	1,48	10,55	0,78	-2,81	9,86	0,77
Дмитров	-7,16	10,93	0,72	-2,21	11,16	0,76	-5,29	10,62	0,78
Переславль-Залесский	-6,06	11,19	0,44	-1,89	10,09	0,80	-4,43	10,40	0,73
Александров	-13,18	14,18	0,65	-4,70	11,35	0,80	-9,07	12,54	0,75
Волоколамск	-3,34	8,65	0,68	0,20	10,12	0,80	-2,22	9,34	0,78
Можайск	-10,62	12,49	0,66	-1,80	10,76	0,78	-6,91	11,19	0,76
Ново-Иерусалим	-15,79	16,67	0,51	-4,42	11,46	0,79	-11,06	14,14	0,71
Шереметьево (аэропорт)	-3,44	9,55	0,72	3,14	11,35	0,82	-0,07	9,85	0,80
Немчиновка	-7,14	11,46	0,68	-1,09	10,12	0,81	-4,25	10,26	0,79
Малое Сареево	-9,30	12,80	0,53	-3,63	11,34	0,78	-6,62	11,66	0,74
Павловский Посад	-9,16	12,36	0,57	-0,60	11,13	0,80	-5,20	11,51	0,75
Внуково (аэропорт)	-2,30	9,35	0,75	1,12	10,69	0,82	-0,42	9,52	0,82
Петушки	-2,01	8,68	0,74	0,81	9,92	0,84	-0,98	9,38	0,82
Москва (центр, Балчуг)	-12,06	14,45	0,70	-3,67	12,36	0,74	-8,13	12,97	0,73
Малоярославец	-11,64	14,06	0,64	-3,64	11,66	0,77	-8,54	12,49	0,75
Наро-Фоминск	-7,75	11,62	0,60	-0,16	10,33	0,80	-4,41	10,55	0,76
Москва (ВДНХ)	-19,71	20,19	0,54	-9,14	12,78	0,79	-14,40	16,12	0,71
Домодедово (аэропорт)	-8,23	12,43	0,55	1,64	10,93	0,80	-3,62	11,16	0,74
Михайловское	-8,33	12,14	0,55	-0,45	11,16	0,77	-5,03	10,95	0,75
МГУ	-11,25	14,25	0,67	-1,14	9,86	0,81	-6,45	11,77	0,75
Серпухов	-14,20	15,40	0,65	-3,70	11,62	0,77	-9,11	13,11	0,75
Москва (северо-запад, Тушино)	-15,26	16,54	0,65	-5,37	11,91	0,75	-11,11	14,16	0,71
Коломна	-6,90	10,84	0,63	1,68	12,01	0,77	-3,32	11,16	0,75
Кашира	-3,03	9,91	0,75	-1,69	11,77	0,78	-2,45	10,79	0,79

*Метеорология**Коспанов А.А., Константинов П.И.*

Анализируя данные валидации модельного эксперимента (табл. 2 и 3), отметим определенные закономерности в распределении ошибок воспроизведения температуры воздуха системой WRF-ARW+ВЕР-ВЕМ. Так, наименьшие значения среднеквадратической ошибки отмечаются для единственной московской «городской станции» – Балчуг (менее километра от Кремля). Это справедливо как для дневных, так и для ночных и среднесуточных значений температуры. Наихудшие метрики приходятся на станцию Ново-Иерусалим, что, возможно связано с близостью к границе модельного домена. Для влажности воздуха наихудшие результаты показывает, как ни странно, опорная станция сети МЦГМС-Р – ВДНХ (27612). Не исключено, что это связано с ошибками позиционирования данной станции в рамках карты типов подстилающей поверхности – в ее районе WRF-ARW показывает отчетливо заниженную влажность, т. е. причина – «запечатанность» естественной поверхности застройкой и мостовыми метеостанциями внутри модельной расчетной области, когда турбулентный поток водяного пара может воспроизводиться с ошибками.

Таким образом, наилучшие результаты моделирования термического режима приходятся именно на зону плотной застройки. По мнению авторов, данный факт можно рассматривать как свидетельство перспективности применения параметризации ВЕР-ВЕМ в модели WRF-ARW именно для плотно застроенных городских территорий.

Заключение

В рамках проведенных экспериментов получена база данных динамического даунскейлинга глобального реанализа ERA5 за 2010 год для области 240 км * 240 км с центром в Москве с шагом сетки 1 км и временным разрешением 1 час для более чем 100 метеорологических переменных. Помимо базы данных создана программная основа для будущего электронного атласа Москвы и области за период 1979–2022 гг., где будут приведены как среднемесячные характеристики, так и характеристики повторяемости неблагоприятных явлений погоды за рассматриваемый период, а также такие характеристики, как даты первого и последнего заморозков, продолжительность отопительного периода и т.д.

Основной же результат работы – оценка точности моделирования температуры и относительной влажности воздуха для разных типов ландшафтов (в сравнении с расположенными в них метеостанциями сети Росгидромета) для Московского региона за 2010 г. Указанная оценка указывает на наилучшие результаты в воспроизведении приземной температуры воздуха (наименьшие значения RMSE) в районах плотной застройки (исторический центр г. Москвы по данным метеостанции 27613 Балчуг). Это можно рассматривать как свидетельство перспективности применения параметризации ВЕР-ВЕМ в модели WRF-ARW именно для городских территорий. Для фоновых ландшафтов, естественно, необходима дополнительная калибровка модели.

Список литературы

1. Bougeault, P. and Lacarrère, P. (1989) Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model. *Monthly Weather Review*, 117, 1872–1890.
2. Matthias Demuzere, Cenlin He, Alberto Martilli, & Andrea Zonato. (2023). Technical documentation for the hybrid 100-m global land cover dataset with Local Climate Zones for WRF (1.0.0). *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7670792>
3. Matthias Demuzere, Jonas Kittner, Alberto Martilli, Gerald Mills, Christian Moede, Iain D. Stewart, Jasper van Vliet, & Benjamin Bechtel (2022). Global map of Local Climate Zones (2.0.0) [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7324909>
4. Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X.-W., Xu, T., and Murray, D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L06702, <https://doi.org/10.1029/2010GL046582>
5. Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
6. Janjic, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes, *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945.
7. Kain, John S., (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
8. Kalinin N. A., Kislov A. V., Babina E. D., and Vetrov A. L. (2010). Estimation of air temperature reproduction quality by the MM5 model in the Urals in July. *Russian Meteorology and Hydrology*, 10(10):659–664.

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

9. Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. et al. (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology* 101, 329–358. <https://doi.org/10.1023/A:1019207923078>
10. Kusaka, Hiroyuki & Hara, Masayuki & Takane, Yuya. (2012). Urban Climate Projection by the WRF Model at 3-km Horizontal Grid Increment: Dynamical Downscaling and Predicting Heat Stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 90B. 47–63. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-B04>
11. Le Roy, B., Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Brion, D., Masson, V. (2020). Long time series spatialized data for urban climatological studies: A case study of Paris, France. *International Journal of Climatology*, 40: 3567–3584.
12. Martilli A, Clappier A, and Rotach M.W. (2002). An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
13. Nunez, M., & Oke, T.R. (1977). The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 11–19.
14. Salamanca, F. and Martilli A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0143-8>
15. Salamanca F; Andrea Krpo; Alberto Martilli; Alain Clappier (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model, *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4), 331–344. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
16. Salamanca F, Yizhou, Z., Michael, B., Fei, C., Alex, M., Shiguang M. (2018). Evaluation of the WRF-Urban Modeling System coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models over a Semi-arid Urban Environment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123, pp.2387–2408, <https://doi.org/10.1002/2018JD028377>
17. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
18. Stewart, I. D., and T. R. Oke, (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879–1900, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
19. Varentsov, M., Wouters, H., Platonov, V., Konstantinov, P. (2018). Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia. *Atmosphere*. 9. 50. <https://doi.org/10.3390/atmos9020050>
20. Varentsov, M.; Samsonov, T.; Demuzere, M. (2020). Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment. *Atmosphere*, 11, 1349. <https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
21. Weather Research & Forecasting Model (WRF) URL:https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html (дата обращения 01.09.2023)
22. Zheng, Ye, K. Alapaty, J. A. Herwehe, A. D. Del Genio, and D. Niyogi, (2016). Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an updated Kain–Fritsch scheme. *Monthly Weather Review*, 117–3, 833–860. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0005.1>

References

1. Bougeault, P. and Lacarrère, P. (1989) Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model. *Monthly Weather Review*, 117, 1872–1890.
2. Matthias Demuzere, Cenlin He, Alberto Martilli, & Andrea Zonato. (2023). Technical documentation for the hybrid 100-m global land cover dataset with Local Climate Zones for WRF (1.0.0). *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7670792>
3. Matthias Demuzere, Jonas Kittner, Alberto Martilli, Gerald Mills, Christian Moede, Iain D. Stewart, Jasper van Vliet, & Benjamin Bechtel (2022). Global map of Local Climate Zones (2.0.0) [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7324909>
4. Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X.-W., Xu, T., and Murray, D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L06702, <https://doi.org/10.1029/2010GL046582>
5. Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
6. Janjic, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sub-layer, and Turbulence Closure Schemes, *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945.
7. Kain, John S., (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
8. Kalinin N. A., Kislov A. V., Babina E. D., and Vetrov A. L. (2010). Estimation of air temperature reproduction quality by the MM5 model in the Urals in July. *Russian Meteorology and Hydrology*, 10(10):659–664.
9. Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. et al. (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology* 101, 329–358. <https://doi.org/10.1023/A:1019207923078>
10. Kusaka, Hiroyuki & Hara, Masayuki & Takane, Yuya. (2012). Urban Climate Projection by the WRF Model at 3-km Horizontal Grid Increment: Dynamical Downscaling and Predicting Heat Stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 90B. 47–63. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-B04>
11. Le Roy, B., Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Brion, D., Masson, V. (2020). Long time series spatialized data for urban climatological studies: A case study of Paris, France. *International Journal of Climatology*, 40: 3567–3584.
12. Martilli A, Clappier A, and Rotach M.W. (2002). An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
13. Nunez, M., & Oke, T.R. (1977). The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 11–19.
14. Salamanca, F. and Martilli A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0143-8>

Метеорология

Коспанов А.А., Константинов П.И.

15. Salamanca F; Andrea Krpo; Alberto Martilli; Alain Clappier (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model, *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4), 331–344. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
16. Salamanca F, Yizhou, Z., Michael, B., Fei, C., Alex, M., Shiguang M. (2018). Evaluation of the WRF-Urban Modeling System coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models over a Semi-arid Urban Environment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123, pp.2387–2408, <https://doi.org/10.1002/2018JD028377>
17. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
18. Stewart, I. D., and T. R. Oke, (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879–1900, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
19. Varentsov, M., Wouters, H., Platonov, V., Konstantinov, P. (2018). Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia. *Atmosphere*. 9. 50. <https://doi.org/10.3390/atmos9020050>
20. Varentsov, M.; Samsonov, T.; Demuzere, M. (2020). Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment. *Atmosphere*, 11, 1349. <https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
21. Weather Research & Forecasting Model (WRF) URL:https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html (дата обращения 01.09.2023)
22. Zheng, Ye, K. Alapaty, J. A. Herwehe, A. D. Del Genio, and D. Niyogi, (2016). Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an updated Kain–Fritsch scheme. *Monthly Weather Review*, 117–3, 833–860. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0005.1>

Статья поступила в редакцию: 19.09.2023, одобрена после рецензирования: 23.10.2023, принята к опубликованию: 12.12.2023.

The article was submitted: 19 September 2023; approved after review: 23 October 2023; accepted for publication: 12 December 2023.

Информация об авторах

Ален Арманович Коспанов

студент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1;

e-mail: kospanov.alen@gmail.com

Information about the authors

Alen A. Kospanov

Master's Student, Department of
Meteorology and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Павел Игоревич Константинов

кандидат географических наук, доцент кафедры
метеорологии и климатологии, географический факультет,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
старший научный сотрудник Лаборатории моделирования
средней и верхней атмосферы,
Российский Гидрометеорологический университет;
192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79

e-mail: kostadini@mail.ru

Pavel I. Konstantinov

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Department of
Meteorology and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia
Senior Researcher, Laboratory for the Modeling of Middle and
High Atmosphere,
Russian State Hydrometeorological University;
79, Voronezhskaya st., St. Petersburg, 192007, Russia

Вклад авторов

Коспанов А.А. – настройка модельного комплекса WRF-ARW, проведение вычислительных экспериментов, визуализация материала, написание и научное редактирование текста статьи.

Константинов П.И. – идея, анализ результатов, написание и научное редактирование текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Alen A. Kospanov – setting up the WRF-ARW model complex; computational experiments; visualization of the material; writing and scientific editing of the text.

Pavel I. Konstantinov – the idea; analysis of the results; writing and scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.