

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.58

А.В. Кислов¹, П.А. Торопов², В.С. Платонов³, А.В. Ольчев⁴, М.И. Варенцов⁵

РЕГИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ДЛЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Современное состояние и развитие климатического моделирования достигло такого уровня, что может рассматриваться как определенная альтернатива традиционным источникам информации об окружающей среде, экосистемах, их динамике и др. Стремительное развитие метеорологии и климатологии, вычислительных технологий и представлений о физических процессах в почве и растительности позволили включить в современные климатические модели детальное описание механизмов обмена теплом, влагой, парниковыми газами, а также взаимодействия между приземным слоем воздуха, подстилающей поверхностью, почвой и растительными сообществами.

Предметом настоящей статьи является вопрос о получении высокодетализированных данных о метеорологических переменных, о теплообмене и влагообмене поверхности с атмосферой. В данной статье рассматриваются методологические основы климатического моделирования и приводятся примеры конкретного применения результатов расчетов для решения широкого спектра эколого-географических задач.

Ключевые слова: даунскейлинг, мезомасштабные процессы, пространственно-временная детализация, гидрометеорологический архив, климат, моделирование

Введение. Решение большинства проблем географии методологически связано с изучением пространственно-временных закономерностей определенных показателей на некоторой территории. В настоящее время обычным средством анализа становится использование сеточных данных, то есть информации на регулярной сетке, покрывающей изучаемую область с определенными шагами в пространстве и, если решаются эволюционные задачи, то и во времени. При этом, разумеется, эти шаги должны быть такими, чтобы изучаемое явление могло быть надежно аппроксимировано с нужной степенью детальности. Примерами сеточной информации служат цифровые модели рельефа, распределение по пикселям генерализированных характеристик растительного покрова, гидрологических показателей, индексов вечной мерзлоты, характеристик городской среды и т. д. Во многих случаях решение конкретных задач требует сведений и о климатических переменных, причем эта информация также должна быть привязана к тем же пикселям [Эколого-географические ..., 2011; Климат Москвы ..., 2017; и др.]. Цель данной работы – дать введение в методологию получения сеточной информации для решения различных проблем географии, иллюстрируя общий подход конкретными примерами.

Известными источниками климатической информации служат данные стандартных метеорологических наблюдений. Однако пространственное разрешение сети станций весьма грубое, поскольку станции изначально были ориентированы на воспроизведение синоптических (крупномасштабных) характеристик атмосферы. Интерполяция метеорологических величин, пространственное распределение которых относительно гладкое (давление, температура воздуха), дает более или менее надежные результаты даже при разреженной сети наблюдений. Но для осадков, испарения, температуры поверхности, скорости ветра, влагосодержания почвы, компонентов теплового баланса такого рода интерполяция приводит к серьезным погрешностям. Спутниковые системы позволяют, казалось бы, восстановить метеорологическую информацию в регионах, плохо обеспеченных наземными данными (прежде всего, температуру поверхности и приземного воздуха (по данным http://planet.iitp.ru/Oper_pr/LST_Meteosat_9.htm), осадки (по данным <https://precip.gsfc.nasa.gov/>), в некоторых случаях влажность почвы [Bartalis et al., 2008] и др.). Однако точность дистанционных измерений в любом случае ниже, чем стандартных метеорологических наблюдений, причем для некоторых величин (например,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, заведующий кафедрой, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* avkislov@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail:* tormet@inbox.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* vplatonov86@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, вед. науч. с., докт. биол. н.; *e-mail:* aoltche@gmail.com

⁵ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, мл. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* mvar91@gmail.com

для влажности почвы) погрешность может достигать 100–150%.

Более надежные результаты получаются, если использовать не отдельные источники информации, а их синтез. Методика получения таких продуктов основана на том, что измеренные характеристики (полученные всеми средствами мониторинга, для всего земного шара, в разные моменты времени, как у поверхности, так и в атмосфере) поступают в гидродинамическую модель планетарной циркуляции. Эта глобальная модель интегрируется на несколько часов, и в результате происходящих внутри нее процессов тепло- и влагообмена и динамического сглаживания осуществляется пространственное и временное согласование всех характеристик. Поскольку модель реализована на некоторой сетке пространственных координат и времени, модельная метеорологическая информация представляет собой искомое сеточное поле, покрывающее даже те регионы, в которых исходные данные наблюдений отсутствовали. Так работают системы усвоения данных, создающие поле первого приближения для текущего прогнозирования погоды.

На этом принципе основаны и так называемые реанализы, обеспечивающие многолетние сеточные архивы данных (NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996], ERA5 (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation>), ERA-Interim [Dee et al., 2011], MERRA [Rienecker et al., 2011]; и др.). Их отличия от полей первого приближения заключаются в том, что для реанализа применяется атмосферная модель с заданной конкретной конфигурацией для всего временного диапазона, в то время как поле первого приближения строится на основе все время совершенствующихся расчетных схем и поэтому временные серии не получаются однородными. Шаг сетки по горизонтали в разных базах данных составляет 30–200 км, что определяется конечномерной аппроксимацией использованных глобальных моделей, обеспечивающих процедуру усвоения измерений.

Однако для многих задач географии предлагаемая дискретность не всегда достаточна. В самом деле, описание региональных (местных) условий горных склонов разной экспозиции, особенностей гидрографии, пятнистости ландшафтов, особенностей побережий и др. требует совершенно иного шага сетки. Поэтому необходима детализация информации. Это требование должно быть технологически разумно: в настоящее время из-за ограниченности возможностей мониторинга и компьютерных ресурсов можно требовать размера ячеек сетки порядка сотен метров – первых километров.

Методы, направленные на наращивание детализации, часто объединяют термином «даунскейлинг» (англ. «downscaling» [Wilby, Wigley, 1997]). Существует статистический вариант, когда информация грубого пространственного разрешения интерполируется на мелкую сетку за счет заранее приготовленных уравнений регрессии. Физически логичнее, но неизмеримо сложнее метод динами-

ческого даунскейлинга, при котором данные грубого разрешения (данные глобального реанализа или прогностических моделей) используются как граничные и начальные условия для гидродинамической модели атмосферы, реализованной на мелкой сетке. Подобные модели называют *региональными*. В последние ~25 лет данный метод активно применялся для разных задач. Сперва использовались упрощенные модели [Кислов, Суркова, 1995], затем, с развитием вычислительных возможностей, стали применяться гидродинамические модели, реализованные для отдельных регионов [Калинин с соавт., 2010]. Последний подход продолжает активно развиваться, и именно его применению посвящена данная статья. Следует подчеркнуть, что реализация модели на мелкой сетке – не простое формальное увеличение разрешения. Физические процессы по-разному проявляются в зависимости от пространственных масштабов. Наиболее яркий пример такой зависимости связан с явлением гидростатики: при пространственных масштабах, превышающих ~10 км, атмосферные движения можно считать гидростатическими, но при шагах сетки порядка нескольких километров движения уже существенно негидростатичны. Существуют и другие отличия.

Современные модели включают не только атмосферу, но также блоки, описывающие растительный покров, гидросферу и почву, что позволяет детально описать обмен теплом, влагой, парниковыми газами между приземным слоем воздуха, подстилающей поверхностью, почвой и растительностью. По сути, эти модели являются синтетическим инструментом, на консолидирующей базе которого могут быть объединены географические и экологические науки, ставящие своей целью описание и прогноз состояния природной среды в ее четырехмерном воплощении.

В данной статье дается представление о методологии моделирования в рамках мезомасштабных моделей COSMO-CLM и WRF-ARW, а также приводятся примеры конкретного применения результатов расчетов для решения широкого спектра эколого-географических задач. Это сделано в том числе для того, чтобы была возможность оценить необходимые технологические требования для выполнения такого рода работ.

Материалы и методы: описание структуры моделей и технологии моделирования. Циркуляция атмосферы Земли имеет ряд специфических особенностей, составляющих суть геофизической гидродинамики. Имея в виду глубокую зависимость физических механизмов от пространственно-временных масштабов, атмосферные процессы принято делить на классы (хотя необходимо понимать, что четкой границы между типами атмосферных движений в природе не существует). При рассмотрении так называемых *мезомасштабных* процессов, которые являются предметом обсуждения данной статьи, выделяются:

1) мезо-альфа процессы с горизонтальными размерами от 200 до 2000 км (фронты, полярные

мезоциклоны и тропические циклоны) и продолжительностью жизни от одной недели до суток;

2) мезо-бета процессы с размерами от 20 до 200 км (горные ветры и волны, кластеры кучево-дождевых облаков, бризы океанских побережий, низкоуровневые струйные течения) и продолжительностью жизни от одних суток до одного часа;

3) мезо-гамма процессы с размерами от 2 до 20 км (городская циркуляция, гравитационные волны, отдельные кучево-дождевые облака, зоны турбулентности ясного неба) и продолжительностью жизни порядка часа.

Модели атмосферы, которые описывают мезопроцессы и, одновременно, процессы большего масштаба, принято называть *мезомасштабными*. Необходимым условием мезомасштабности модели является следующее: шаг сетки для аппроксимации уравнений гидродинамики не должен превышать примерно $1/8$ нижней границы указанных выше интервалов, то есть *разрешающая способность* должна быть примерно в 8 раз больше шага сетки [Warner, 2011; Wedi, 2014]. Таким образом, для воспроизведения, например, мезо-бета процессов шаг сетки должен быть менее, чем $(20 \text{ км})/8 = 2,5 \text{ км}$.

В настоящее время в мире используется несколько региональных мезомасштабных моделей атмосферы, главное предназначение которых – прогноз погоды и моделирование климата. Наиболее известными являются модели международных консорциумов COSMO (<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>), ALADIN-HIRLAM (<http://www.umr-cnrm.fr/aladin/spip.php?article8>), модель UM метеослужбы Великобритании (<https://beta.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model>) и американская модель WRF (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>). Свойства всех моделей и качество получаемых результатов достаточно близки. Рассмотрим подробнее две модели, поскольку именно они использованы в тех исследованиях, результаты которых демонстрируются далее.

Деятельность консорциума COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) направлена прежде всего на совершенствование прогнозирования погоды в странах-участницах (в том числе России). В России модель COSMO-RU внедрена в оперативную практику в качестве базовой системы прогнозирования [Ривин с соавт., 2015], а также используется для моделирования климата. В последнем случае конфигурацию модели принято обозначать COSMO-CLM (CLM = Climate Limited-area Model community).

Модель WRF-ARW (Weather Research and Forecast – Advanced Research) разработана прежде всего для научных исследований. Для применения в оперативной практике прогнозирования погоды в США подготовлена иная версия – WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), в которую добавлены специальные параметризации, учитывающие специфику атмосферных процессов на территории США, заменена сетка узлов конечно-разностного анализа и перестроено динамическое ядро модели.

Климатические расчеты с региональными мезомасштабными моделями построены по схеме динамической детализации (даунскейлинга) данных реанализа. Они 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 домена остаются близкими к реально наблюдавшимся. Дополнительно, для обеспечения более надежной привязки внутреннего модельного режима к реальной атмосферной динамике, использовалась технология корректировки динамики внутри самой расчетной области (так называемый «спектральный наджинг») («spectral nudging»).

Для моделирования атмосферы необходимы параметры, определяющие условия природной среды у подстилающей поверхности, в том числе и их сезонный ход. К ним относятся: рельеф, степень шероховатости, листовой индекс, тип почвы, доля и тип растительности, глубина залегания корней и др. Эти параметры задаются для каждой ячейки сетки. Информация берется из глобальных баз данных – например, Ecolimap [Champeaux et al., 2005] или Globcover [Defourny et al., 2006]. Также необходим состав оптически активных веществ (газовых примесей и аэрозолей) [Huneeus et al., 2011; Inness et al., 2013].

Результаты: примеры решения задач, основанные на региональном моделировании климата. Создание регионального архива детализированной метеорологической информации. Как было отмечено, информация, представленная глобальными реанализами, имеет для многих задач недостаточное пространственное разрешение. Для создания детализированного архива данных использована модель COSMO-CLM, путем численного интегрирования которой на протяжении 30 лет был осуществлен даунскейлинг данных реанализа ERA Interim (этот архив обеспечивает информацией с шагом 6 часов по времени и $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ широты и долготы – по пространству). В качестве географической области выбран Дальний Восток и прилегающие морские акватории, поскольку для этого региона мы получили заказ на создание архива [Кислов с соавт., 2017], ориентированного на возможность анализа структуры и генезиса опасных метеорологических явлений. В результате была получена гидрометеорологическая информация для вложенных друг в друга доменов с шагами сетки 13,2 и 6,6 км за период 1985–2014 гг., и, для отдельных случаев, для домена с шагом 2,2 км, причем каждое поле (13,2 и 6,6 км) представляло собой стартовый архив для моделирования следующей области более высокого разрешения. Вычислительная задача подобного масштаба решалась в России впервые, да и в мировой практике подобный опыт также весьма ограничен [Bromwich et al., 2016, 2018; Mesinger et al., 2006].

Описанная технология расчетов была реализована в Главном вычислительном центре Росгидромета на вычислительной системе Российской суперкомпьютерной компании «Торнадо». Расчеты 30-летнего периода в домене с шагом сетки 13,2 км на кластере с пиковой производительностью 35 Тфлопс при использовании 288 ядер заняли примерно 600 часов процессорного времени, а в домене с шагом сетки 6,6 км – 1800 часов. Таким образом, всего только для этих основных расчетов было использовано ~2400 часов процессорного времени, что эквивалентно 100 дням непрерывной работы вычислительной системы.

Для демонстрации качества полученных результатов рассмотрим возможность модельного воспроизведения экстремальных значений скорости ветра. На метеорологических станциях восточного побережья о. Сахалин (Мыс Терпения, Ноглики) 14 февраля 1996 г. скорости ветра превышали 30 м/с. В этот день над Охотским морем располагался мощный полярно-фронтальный циклон (рис. 1, А), однако по данным реанализа максимальные скорости ветра составляли только 25 м/с. Применение метода динамического даунскейлинга привело к увеличению неоднородности распределения скорости ветра, причем экстремальные значения существенно возросли, достигнув 35 м/с (рис. 1, Б).

Анализ воспроизведения 15-ти экстремальных ситуаций в Охотском море показал, что в подавляющем большинстве случаев детализация модели до 2,2 км приводит к заметному (а иногда существенному) уменьшению ошибок воспроизведения средней скорости ветра и порывов. Значения среднего квадратического отклонения сокращаются на 10–30%, составляя практически во всех случаях менее 2 м/с для средних скоростей ветра и менее 3 м/с для порывов.

Влияние процессов обезлесения и облесения на региональные метеорологические условия.

Для решения данной задачи была выполнена серия численных экспериментов с мезомасштабной атмосферной моделью COSMO-CLM. Для модельного исследования выбрана территория, включающая центральную часть Восточно-Европейской равнины. В пределах «модельного региона», ограниченного координатами 55° и 59° с.ш., 28° и 37° в.д., проводилась имитация изменения степени облесенности территории. «Модельный регион» включал подзону темнохвойных лесов южной тайги на севере, смешанных лесов в центральной части и широколиственных лесов на крайнем юге.

В ходе исследования было проведено три вычислительных эксперимента. Первый эксперимент имитировал полное сведение лесов (обезлесение) на исследуемой территории и их замещение травянистой растительностью. Второй эксперимент был сценарием, наоборот, полного облесения за счет увеличения доли мелколиственных пород деревьев (береза, осина). В третьем, контрольном, эксперименте расчеты проводились для современной структуры землепользования и лесистости [Кузьмина с соавт., 2017; Ольчев с соавт., 2017].

Все численные эксперименты выполнялись для теплого периода 2010 г. с шагом сетки 13 и 6 км. В качестве начальных данных и граничных условий использовался реанализ ERA Interim (см. выше). Моделирование производилось в непрерывном цикле, с «подпиткой» данными на боковых границах области интегрирования.

Результаты компьютерных экспериментов показали, что изменение лесистости в природно-климатических условиях Восточно-Европейской равнины может привести к некоторым изменениям погод-

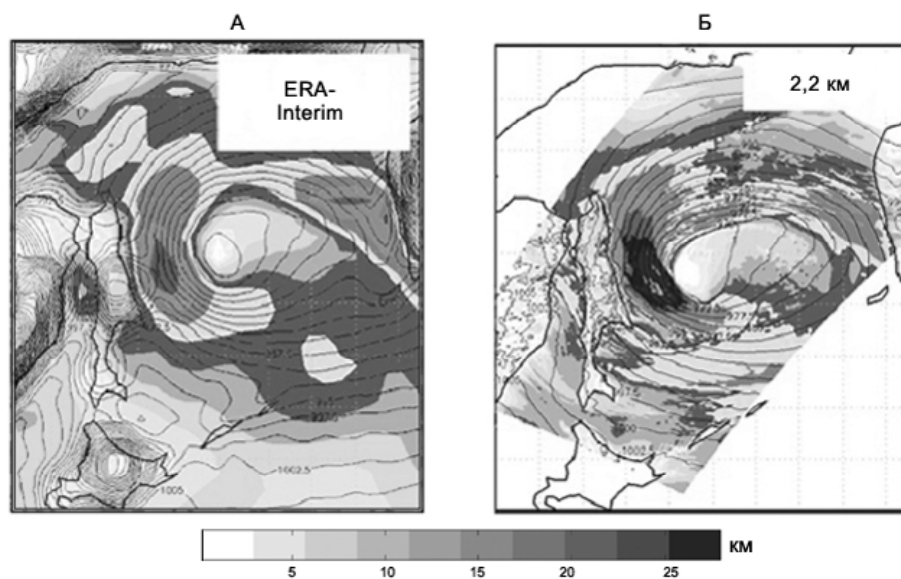


Рис. 1. Поля давления (черные линии, гПа) и скорости ветра (градации серого, м/с), 14 февраля 1996 г., 23 часа ВСУ по данным глобального реанализа ERA-Interim (А) и модели COSMO-CLM (Б) с разными шагами сетки по пространству

Fig. 1. Sea level pressure (black lines, hPa) and wind speed (colors, m/s), on 14.02.1996, 23 h UTC by ERA-Interim reanalysis (A, left) and COSMO-CLM model (B, right) with various spatial horizontal resolution

ных условий в теплую половину года. Обезлесение ведет к росту приземной температуры воздуха, а облесение, наоборот, к ее уменьшению. Максимальные различия для июля составили $+0,6^{\circ}\text{C}$ для сценария с обезлесением, и $-0,1^{\circ}\text{C}$ с облесением. Процессы обезлесения в теплый период года приводят также к росту средних и максимальных скоростей ветра в приземном слое, уменьшению количества нижней облачности и относительной влажности. Процессы облесения привели к обратным эффектам. Влияние на выпадение осадков проявляется в увеличении их общего количества при облесении территории (на 5%) и в снижении при сценарии с обезлесением (до -9%). Различия сравнительно небольшие, однако более важно то, что при сценарии, имитирующем обезлесение, прогнозируется увеличение продолжительности периодов с аномально жаркой погодой [Ольчев с соавт., 2017].

Трехмерная структура острова тепла Московской агломерации. Наглядным примером применения мезомасштабного моделирования в географических исследованиях является изучение трехмерной структуры острова тепла (ОТ) Московской агломерации. ОТ является хорошо известной климатической особенностью урбанизированных территорий [Ландсберг, 1983; Lokoshchenko, 2017; Климат Москвы ..., 2017]. Его интенсивность (разность температуры между городом и окружающими его «фоновыми» ландшафтами) для крупных городов составляет в среднем 2°C , а в ясные и безветренные ночи она может достигать 10°C и более.

Мезомасштабное моделирование открывает возможности для исследования особенностей городского метеорологического режима на принципиально новом уровне пространственно-временной детализации. Вычислительные ресурсы современных суперкомпьютеров делают возможными численные эксперименты продолжительностью месяцы и годы с горизонтальным шагом сетки ≈ 1 км, позволяющие явно задавать крупные особенности городского ландшафта (массивы застройки различной высоты и плотности, лесопарки, крупные водные объекты и пр.). Рассматриваемый пример основан на использовании модели COSMO-CLM с параметризацией TERRA_URB [Wouters et al., 2016]. Особенности методики проведения численных экспериментов, а также результаты верификации модели для условий Московской агломерации, подтверждающие ее адекватность, приведены в работе М.И. Варенцова с соавторами [2017].

Ключевое достоинство модели состоит в возможности включения или исключения отдельных ее блоков. Так, проведение численных экспериментов с включенной и выключенной параметризацией городской подстилающей поверхности TERRA_URB и их сопоставление позволяет изучать отклик модели на задаваемые свойства городской среды (которые интерпретируются без синергетических эффектов). В этом случае интенсивность ОТ для любой точки пространства и момента времени может быть определена как

$$\Delta T = T_{urb} - T_{nourb},$$

где T_{urb} и T_{nourb} – температура по данным моделирования с включенной и выключенной параметризацией TERRA_URB соответственно.

Рассмотрим в рамках подобного подхода пространственную структуру городской аномалии температур на примере летнего сезона 2014 г. Чтобы усилить анализируемый сигнал, использована выборка случаев за дни с максимальной суточной интенсивностью приповерхностного ОТ в центре города (на высоте 2 м) более 4°C (78% всех дней).

Результаты моделирования свидетельствуют о ярко выраженной суточной изменчивости вертикальной структуры и протяженности термической аномалии. Днем (15 ч по московскому времени) она диагностируется до высот 1–1,5 км, однако ее интенсивность мала и не превышает у земли $0,5^{\circ}\text{C}$. Вечером, на фоне сохранения схожей вертикальной протяженности, ОТ усиливается у земли вплоть до высоты 400 м над поверхностью (рис. 2, А). Ночью (3 ч, рис. 2, Б) ОТ максимально интенсифицируется у поверхности и прижимается к земле (вертикальная протяженность порядка 150 м), при этом на высотах 200–500 м возникает отрицательная аномалия, известная в литературе как «кросс-овер эффект» [Bornstein, 1968] или «линза холода» [Кузнецова, Нахаев, 2010].

Полученные модельные оценки вертикальной протяженности ОТ и приподнятого слоя холода на качественном уровне согласуются с опубликованными оценками по данным контактных измерений [Локощенко с соавт., 2016], дистанционных измерений микроволновых температурных профиломеров МТП-5 [Кадыгров с соавт., 2002; Кузнецова, Нахаев, 2010] и дистанционного спутникового зондирования [Горлач с соавт., 2017; Кислов с соавт., 2017].

Другая отличительная особенность трехмерной структуры ночного ОТ – его «расползание» за пределы города. Это связано с влиянием атмосферного переноса, формирующего над городом приподнятые тепловые шлейфы, вытянутые по ветру (рис. 2, В, Г). Их существование понятно из общих представлений о динамике атмосферного пограничного слоя над неоднородной поверхностью, однако ранее подтверждалось только разовыми экспериментальными исследованиями при самолетном или вертолетном зондировании.

Пространственно-временная детализация поля осадков на южном побережье Каспийского моря при холодных вторжениях. Для анализа тонкой структуры метеорологических полей и расчета экстремальных осадков в северных провинциях Ирана в районе Каспийского побережья была использована модель WRF-ARW с шагом сетки по горизонтали 2 км. Рассмотрим синоптическую ситуацию 4–7 февраля 2016 г. По восточной периферии небольшого холодного антициклона, центр которого располагался над Прикаспийской низменностью, осуществлялось движение к югу относительно холодного воздуха. Анализ обратных траекторий

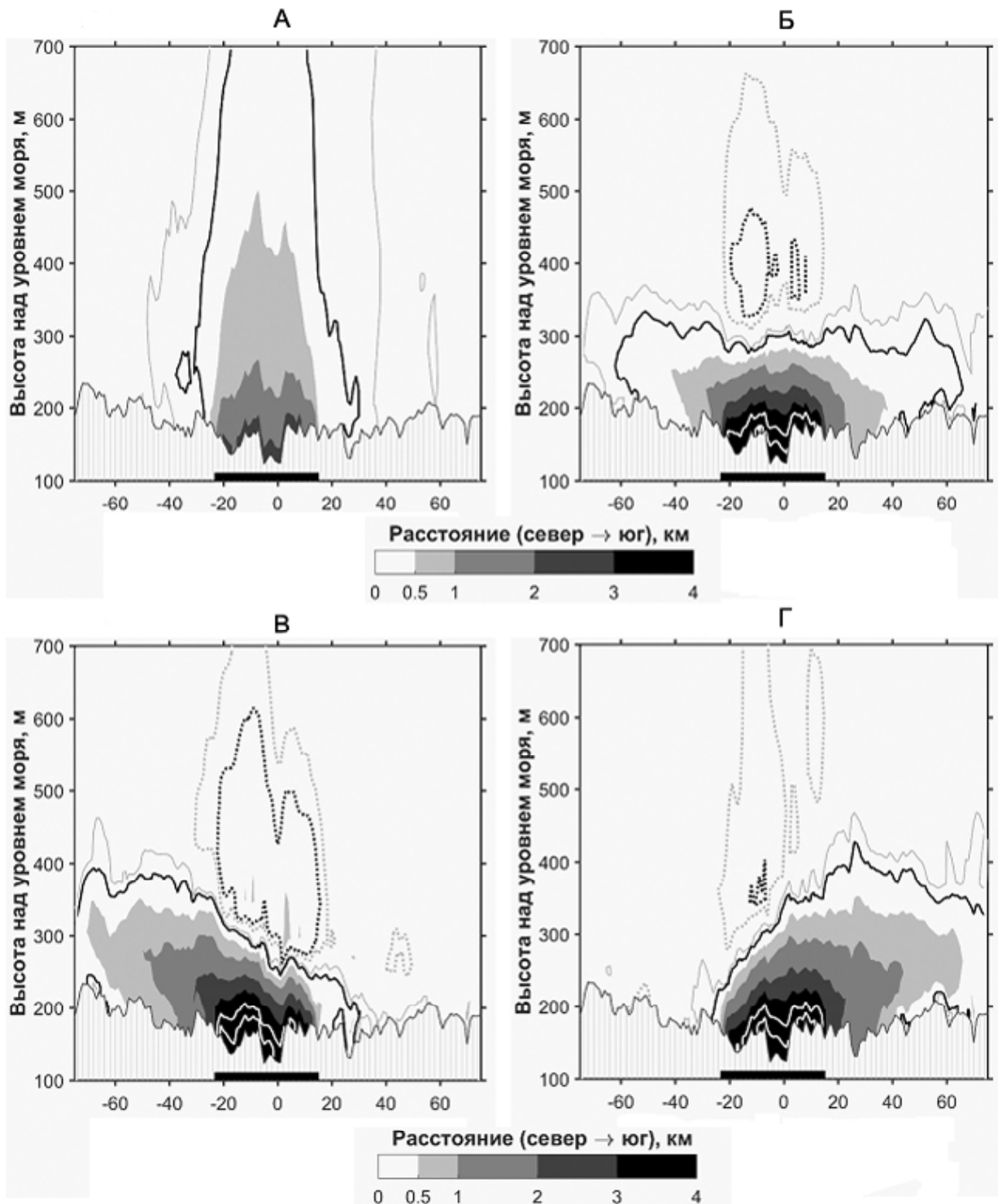


Рис. 2. Вертикальный разрез с севера на юг через центр Москвы городской аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$), рассчитанной в среднем за вечерние (А) и ночные (Б) сроки, а также за те ночные сроки, когда наблюдались ветры южной (В) и северной (Г) четвертей. Использовано осреднение за дни с интенсивным ОТ летом 2014 г. Модули аномалии показаны оттенками серого. Сплошные и пунктирные черные изолинии соответствуют значениям $0,2$ и $-0,2^{\circ}\text{C}$ соответственно. Серые сплошные и пунктирные линии – значениям $0,1$ и $-0,1$. Значения в 4°C и более показаны белыми изолиниями с шагом в 1°C . Серой вертикальной штриховкой дан городской рельеф. Ноль горизонтальной оси координат соответствует положению метеостанции Балчуг. Черный отрезок на этой оси обозначает пересечение разрезом города (где доля урбанизированной территории более 25%)

Fig. 2. Vertical north-south cross-section through the center of Moscow of the urban temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$), averaged on evening (А) and nocturnal (Б) times and nocturnal times with southern (В) and northern (Г) quarter winds for the days with intense heat island during summer 2014. Modules of anomalies are shown as grey shades. Solid and dashed black lines correspond to $0,2$ and $-0,2^{\circ}\text{C}$ values, respectively. 4°C and higher values are shown as white lines with 1°C step. Grey vertical hatching reflect the urban relief. The zero of horizontal axis corresponds to the Balchug meteorological station site. The black segment on the axis indicates the urban part of the cross-section (with urbanized area exceeding 25%)

показал, что 4–5 февраля эта воздушная масса сформировалась над акваторией Средиземного моря, но, перемещаясь над южными районами Европейской России, она несколько охладилась, сохранив при этом достаточно высокую влажность (в среднем 4–5 г/кг). 6 февраля холодный атмосферный фронт, активизировавшись над теплым Каспийским морем (температура поверхности около 8°C), подошел к его южному побережью. В результате в северных провинциях Ирана прошли интенсивные дожди. На некоторых горных станциях зафиксированы осадки, превышающие 80 мм за сутки, а в среднем по побережью и предгорным районам выпало около 20 мм осадков. Такая же оценка (~20 мм осадков) получена по данным реанализа ERA-Interim.

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования рассматриваемого случая. Они интересны прежде всего тем, что показали сложную пространственную структуру осадков. Над морской поверхностью сформировались соответствующие реальности ярко выраженные конвективные ячейки. Они выстроились в линейные структуры, напоминающие линии шквалов. Суточные суммы осадков в них достигали 30–40 мм. В то же время модель не воспроизвела осадки, превышающие 80 мм за сутки. Это следует интерпретировать прежде всего с позиций недостаточности горизонтального разрешения, не позволившего правильно описать воздействие рельефа на осадкообразующие процессы. В целом же гораздо более правильное воспроизведение осадков открывает возможность использования этих данных для прогнозирования паводковых и селевых процессов, что совершенно невозможно осуществить как по данным редкой сети метеостанций, так и на основе реанализа без использования процедуры детализации информации.

Заключение. В работе продемонстрирована методика получения детальных климатических характеристик, необходимых для комплексных географических исследований.

Это может обеспечить улучшение описания и прогнозирования состояний ландшафта при различных воздействиях, в том числе при изменениях климата. Также возможно детализированное воспроизведение состояния многолетнемерзлых пород, отличающееся большой пятнистостью в зависимости от особенностей рельефа, состояния грунта и растительного покрова. Детализация осадков открывает возможность прогнозирования дождевых паводков, что особенно актуально для коротких горных рек с небольшой площадью водосбора. На этой же основе возможно совершенствование методик расчетов интенсивности русловых процессов, овражной эрозии, лавин и селей, моделирования динамики береговой зоны морей в реальности ее пространственно-сложной структуры и т. д., то есть обеспечение

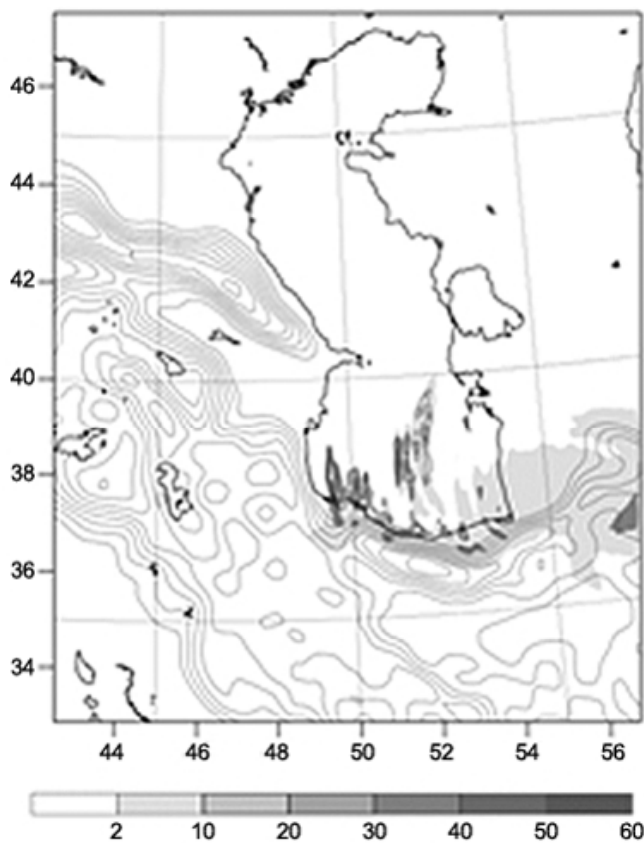


Рис. 3. Случай экстремальных осадков над Каспийским морем и прилегающими территориями 6 февраля 2016 г.: результаты численного моделирования суточной суммы осадков (мм) с помощью модели WRF-ARW

Fig. 3. Extreme precipitation event over the Caspian Sea and adjacent territories on 6.02.2016: numerical modeling results for diurnal precipitation sum (mm) using the WRF-ARW model

прогресса в тех задачах, в которых требуется учет детального описания взаимодействия поверхности с атмосферой. Для практического осуществления необходимо развить специализированные так называемые предметно-ориентированные модели геосистем. В них рассмотренный атмосферный блок (выходные данные которого перестраиваются с учетом требований к набору климатических параметров) войдет или как составной модуль (если по сути задачи требуется учет обратных связей при взаимодействии атмосферы с поверхностью), или в форме заданного «внешнего воздействия», то есть на основе заранее вычисленных характеристик.

Приведенные примеры демонстрируют широкие возможности использования атмосферного моделирования высокого разрешения специалистами разных эколого-географических специальностей, что должно вывести на новый уровень комплексные исследования географической оболочки.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной темы АААА-А16-116032810086-4 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60147).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 25–37.
- Горлач И.А., Кислов А.В., Алексеева Л.И. Опыт исследования вертикальной структуры городского острова тепла на основе спутниковых данных // Исследования Земли из космоса. 2017. № 4. С. 36–46.
- Кадыров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. АН. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
- Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л. Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 15–22.
- Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2017. № 4. С. 12–19.
- Кислов А.В., Суркова Г.В. О модели регионального климата // Метеорология и гидрология. 1995. № 5. С. 23–31.
- Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С. и др. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 381–385.
- Климат Москвы в условиях глобального потепления / Под редакцией А.В. Кислова. М.: Изд. Моск. ун-та, 2017. 288 с.
- Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в Московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры // 80 лет Гидрометцентру России. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 389–400.
- Кузьмина Е.В., Ольчев А.В., Розинкина И.А. и др. Применение мезомасштабной модели COSMO-CLM для оценки влияния изменения лесистости европейской части России на региональные метеорологические условия // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 48–58.
- Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 246 с.
- Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В. и др. О высотной протяженности городского «острова тепла» над Москвой // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
- Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В. и др. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 4. С. 79–101.
- Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58–70.
- Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / Под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова. М.: Макспресс, 2011. 496 с.
- Bartalis Z., Naeimi V., Hasenauer S., Wagner W. ASCAT Soil Moisture Product Handbook // ASCAT Soil Moisture Report Series. 2008. № 15. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria.
- Bornstein R.D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // J. Appl. Meteorol. 1968. Т. 7. № 4. P. 575–582.
- Bromwich D., Wilson A., Bai L. et al. The Arctic System Reanalysis Version 2 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018. doi:10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L.-S. et al. A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic // Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. 2016. V. 142. P. 644–658.
- 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., Simmons A. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. V. 553. P. 553–597.
- Defourny P., Vancutsem C., Bicheron P. et al. Globcover: a 300 m global land cover product for 2005 using ENVISAT MERIS time series // Proceedings of the ISPRS Commission VII mid-term Symposium: Remote Sensing: from pixels to processes. 2006.
- Huneeus N., Schulz M., Balkanski Y. et al. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. Т. 11. № 15. P. 7781.
- Inness A., Baier F., Benedetti A. et al. The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition // Atmospheric chemistry and physics. 2013. V. 13. P. 4073–4109.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
- Lokoshchenko M.A. Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2017. Т. 56. № 10. P. 2729–2745.
- Mesinger F., DiMego G., Kalnay E. et al. North American Regional Reanalysis // Bulletin of American Meteorological Society. 2006. V. 3. P. 343–360.
- Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications // Journal of Climate. 2011. V. 24. № 14. P. 3624–3648.
- Warner T. Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press, 2011. 526 p.
- Wedi N. Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2014. V. 372.
- Wilby R.L., Wigley T.M.L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations // Progress in Physical Geography. 1997. V. 21. P. 530–548.
- Wouters H., Demuzere M., Blahak U. et al. Efficient urban canopy parametrization for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian Summer // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 3027–3054.

Поступила в редакцию 26.12.2017

После доработки 15.03.2019

Принята к публикации 24.05.2019

A.V. Kislov¹, P.A. Toropov², V.S. Platonov³,
A.V. Oltchev⁴, M.I. Varentsov⁵

REGIONAL CLIMATE MODELING
FOR GEOGRAPHICAL ANALYSIS

The actual state and the progress of climate modelling allow considering this technique as full alternative to traditional data sources about environment, ecosystems, their dynamics, etc. The rash development of meteorology and climatology, computational technologies and understanding of physical processes in soil and vegetation cover made it possible to include the detailed description of mechanisms of heat, moisture and greenhouse gases exchange, as well as interactions between the atmospheric boundary layer, surface, soil and plant communities into modern climate models.

The article deals with the problem of obtaining highly-detailed data on meteorological parameters, as well as heat and moisture exchange with the atmosphere. We consider the methodological bases of climate modeling, giving the examples of applications of the results for solution of a wide range of eco-geographical tasks.

Key words: downscaling, mesoscale processes, spatio-temporal detalization, hydrometeorological archive, climate, modeling

Acknowledgements. The study was carried out under the state budget theme AAAA-A16-116032810086-4 and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-60147).

REFERENCES

- Bartalis Z., Naeimi V., Hasenauer S., Wagner W.* ASCAT Soil Moisture Product Handbook // ASCAT Soil Moisture Report Series. 2008. № 15. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria.
- Bornstein R.D.* Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // *J. Appl. Meteorol.* 1968. T. 7. № 4. P. 575–582.
- Bromwich D., Wilson A., Bai L. et al.* The Arctic System Reanalysis Version 2 // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2018. doi:10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Bromwich D.H., Wilson A.B., Bai L.-S. et al.* A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic // *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society.* 2016. V. 142. P. 644–658.
- 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., Simmons A. et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2011. V. 553. P. 553–597.
- Defourny P., Vancutsem C., Bicheron P. et al.* Globcover: a 300 m global land cover product for 2005 using ENVISAT MERIS time series // *Proceedings of the ISPRS Commission VII mid-term Symposium: Remote Sensing: from pixels to processes.* 2006.
- Gorlach I.A., Kislov A.V., Alexeeva L.I.* Opyt issledovanija vertikal'noj struktury gorodskogo ostrova tepla na osnove sputnikovyh dannyh [Study of the vertical structure of urban heat island based on the remote sensing data] // *Issledovanija Zemli iz Kosmosa.* 2017. № 4. P. 36–46. (In Russian)
- Huneus N., Schulz M., Balkanski Y. et al.* Global dust model intercomparison in AeroCom phase I // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2011. T. 11. № 15. P. 7781.
- Inness A., Baier F., Benedetti A. et al.* The MACC reanalysis: an 8^{yr} data set of atmospheric composition // *Atmospheric chemistry and physics.* 2013. V. 13. P. 4073–4109.
- Jekologo-geograficheskie posledstvija global'nogo potepnenija klimata HHI veka na Vostochno-Evropeskoj ravnine i v Zapadnoj Sibiri [Ecological and geographical consequences of the global climate warming over the East European Plain and Western Siberia] / Ed. by N.S. Kasimov and A.V. Kislov. M.: Makspress, 2011. 496 p. (In Russian)
- Kadygrov E.N., Kuznetsova I.N., Golitsyn G.S.* Ostrov tepla v pograničnom sloe atmosfery nad bol'shim gorodom: novye rezul'taty na osnove distancionnyh dannyh [The heat island in the atmospheric boundary layer over a large city: new results based on remote sensing data] // *Doklady Akademii Nauk.* 2002. V. 385. № 4. P. 541–548. (In Russian)
- Kalinin N.A., Kislov A.V., Babina E.D., Vetrov A.L.* Ocenka kachestva vosproizvedenija model'ju MM5 temperatury vozduha v ijule na Urale [Estimation of the quality of MM5 model reproduction of July air temperature in the Urals] // *Meteorologia i Hidrologia.* 2010. № 10. P. 15–22. (In Russian)
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
- Kislov A.V., Rivin G.S., Platonov V.S. et al.* Mezomasshtabnoye modelirovaniye ekstremal'nykh vetrov nad Okhotskim morem i ostrovom Sakhalin [Mesoscale atmospheric modeling of extreme

¹ 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

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail:* tormet@inbox.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* vplatonov86@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; *e-mail:* aoltche@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Junior Research Scientist, PhD. in Geography; *e-mail:* mvar91@gmail.com

winds over the Sea of Okhotsk and the Sakhalin Island] // *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana*, 2018. T. 54. № 4. P. 381–385. (In Russian)

Kislov A.V., Surkova G.V. O modeli regional'nogo klimata [About the regional climate model] // *Meteorologia I Gidrologia*. 1995. № 5. P. 23–31. (In Russian)

Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alexeeva L.I. «Ostrov tepla» Moskovskoy aglomeracii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepneniya [«Heat island» of the Moscow agglomeration and the urban amplification of global warming] // *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya*. 2017. № 4. P. 12–19. (In Russian)

Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepneniya. [The Moscow climate under the global warming condition] A.V. Kislov (ed.). Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. 2017. 288 p. (In Russian)

Kuzmina E.V., Olchev A.V., Rozinkina I.A. et al. Primenenie mezomasshtabnoj modeli COSMO-SLM dlja ocenki vlijanija izmenenija lesistosti evropejskoj chasti Rossii na regional'nye meteorologicheskie uslovija [Application of the COSMO-CLM mesoscale model for the assessment of the impact of forest cover changes on the regional meteorological conditions] // *Meteorologia i Gidrologia*. 2017. № 9. P.48–58. (In Russian)

Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Sezonnnye osobennosti termicheskoy struktury nizhnih sloev atmosfery v moskovskom megapolise po dannym mikrovolnovykh izmerenij temperatury [Seasonal features of thermal structure of surface atmospheric layers in the Moscow megapolis based on microwave temperature measurements data] // 80 let Gidrometcentru Rossii. Moscow: TRIADA Ltd, 2010. P. 389–400. (In Russian)

Landsberg G.E. Klimat goroda [Urban climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 246 p. (In Russian)

Lokoshchenko M.A. Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2017. T. 56. № 10. P. 2729–2745.

Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V. et al. O vysotnoj protjazhennosti 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)

Mesinger F., DiMego G., Kalnay E. et al. North American Regional Reanalysis // *Bulletin of American Meteorological Society*. 2006. V. 3. P. 343–360.

Olchev A.V., Rozinkina I.A., Kuzmina E.V. et al. Ocenka vlijanija izmenenija lesistosti central'nogo regiona Vostochno-Evropskoj ravniny na letnie pogodnye uslovija [Assessment of the impact of forest cover changes in the central region of the East European Plain on summer weather conditions] // *Fundamental'naja i Prikladnaja Klimatologija*. 2017. T. 4. C. 79–101. (In Russian)

Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications // *Journal of Climate*. 2011. V. 24. № 14. P. 3624–3648.

Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vilfand R.M. et al. Sistema COSMO-Ru negidrostaticheskogo mezomasshtabnogo kratkosrochnogo prognoza pogody Gidrometcentra Rossii: vtoroj jetap realizacii i razvitija [The COSMO-Ru system of non-hydrostatic mesoscale short-term weather forecast in the Hydrometcenter of Russia: the second stage of implementation and development] // *Meteorologia i Gidrologia*. 2015. № 6. P. 58–70. (In Russian)

Varentsov M.I., Samsonov T.Ye., Kislov A.V., Konstantinov P.I. Vosproizvedenie ostrova tepla Moskovskoy aglomeracii v ramkah regional'noj klimaticheskoy modeli COSMO-CLM [Representation of the urban heat island of Moscow agglomeration within the COSMO-CLM regional climate model] // *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya*. 2017. № 6. P. 25–37. (In Russian)

Warner T. Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press, 2011. 526 p.

Wedi N. Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? // *Phil. Trans. Roy. Soc. A*. 2014. V. 372.

Wilby R.L., Wigley T.M.L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations // *Progress in Physical Geography*. 1997. V. 21. P. 530–548.

Wouters H., Demuzere M., Blahak U. et al. Efficient urban canopy parametrization for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian Summer // *Geosci. Model Dev*. 2016. V. 9. P. 3027–3054.

Received 26.12.2017

Revised 15.03.2019

Accepted 24.05.2019