

УДК 551.581.1, 551.515.6, 551.588.7

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА КЛИМАТ ГОРОДА (ОЦЕНКИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ COSMO-CLM)

© 2021 г. А. С. Гинзбург^{а, *}, С. А. Докукин^{а, б}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 10.08.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Известно, что большие города и городские агломерации не только вносят решающий вклад в рост содержания парниковых газов в атмосфере, но и в значительной мере формируют свой собственный климат путем трансформации подстилающей поверхности урбанизированных территорий, а также теплового, газового и аэрозольного загрязнений городского пограничного слоя атмосферы. Наиболее сильным проявлением влияния города на локальные и региональные климатические процессы является тепловое загрязнение атмосферы, создаваемое антропогенными потоками тепла, формирующимися в первую очередь за счет энергопотребления городского хозяйства. В настоящей работе подводятся результаты работы авторов по моделированию влияния антропогенных потоков тепла (теплового загрязнения городской атмосферы) на климатические характеристики городских агломераций с помощью мезомасштабной климатической модели COSMO-CLM в рамках проекта РНФ “Анализ влияния региональных изменений климата на энергопотребление городского хозяйства российских мегаполисов”.

Ключевые слова: климат города, тепловое загрязнение, остров тепла, мезомасштабные климатические модели

DOI: 10.31857/S0002351521010053

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире подавляющая часть энергии, получаемой за счет использования ископаемого топлива, расходуется на территории городских агломераций. Поскольку вся использованная в городах энергия превращается в тепло, результатом является повышение температуры поверхности и приземного воздуха, а также тепловое загрязнение пограничного слоя атмосферы. Основным фактором воздействия городов на мезомасштабные атмосферные и климатические процессы являются антропогенные потоки тепла (АПТ), обусловленные всеми видами источников тепловой энергии на урбанизированных территориях – от промышленности и отопления до метаболизма жителей.

Начиная с середины XX в. стали появляться фундаментальные работы по исследованию формирования климата города и роли антропогенных потоков тепла в этом процессе. В первую очередь надо отметить монографию Г. Ландсберга, опубликованную в США в 1981 г. и вышедшую в русском переводе в 1983 г. [1], и вышедшую ранее монографию П. Кратцера [2]. Важный вклад в ис-

следование городского климата внесли статьи и монографии Т. Оке, опубликованные за последние полвека, из которых отметим одну из его первых статей [3] и монографию 2017 г. [4]. Во второй половине прошлого столетия доминировал феноменологический подход к описанию климата отдельных крупнейших городов мира. С начала XXI в. на первый план выходят работы по численному моделированию городского климата и его изменений на фоне глобального потепления.

Для оценки влияния теплового загрязнения атмосферы на климат городских агломераций очень важно понимать, что вырабатываемое в процессе производства и потребления энергии тепло является климатически активной примесью. Примерно полвека назад была опубликована одна из первых работ по исследованию критических проблем окружающей среды [5]. В отчете рабочей группы Келлога про тепловое загрязнение сказано, что к 2000 г. производство тепловой энергии вряд ли скажется на глобальных изменениях климата, но по мере роста производства тепловой энергии тепловое загрязнение может создавать региональные климатические эффекты. Динамика климата городов за

последние десятилетия полностью подтвердила этот прогноз.

На рубеже тысячелетий появился ряд работ по систематизации методов оценки теплового загрязнения атмосферы. В первые годы XXI в. внимание этому вопросу уделили и лауреаты Большой золотой медали им. М.В. Ломоносова РАН 2019 г. акад. Г.С. Голицын [6] и иностранный член РАН, лауреат Нобелевской премии П. Крутцен [7]. Статья Г.С. Голицына с соавторами из Центральной аэрологической обсерватории и Гидрометцентра Росгидромета РФ посвящена одному из наиболее сложных методов оценки характеристик городского острова тепла — с помощью дистанционного зондирования.

В течение многих лет в журнале *Atmospheric Environment* в специальной рубрике *New Directions* публикуются колонки приглашенных авторов о последних прорывных, спорных или спекулятивных проблемах всех аспектов атмосферных наук. В такой колонке в 2004 г. П. Крутцен, судя по всему, впервые четко сформулировал тезис о том, что тепловое загрязнение является таким же климатообразующим фактором, как и выбросы аэрозоля и парниковых газов.

В последние десятилетия появился целый набор так называемых мезомасштабных (локальных) моделей, описывающих основные метеорологические и климатические процессы в масштабах городских агломераций. Обзор антропогенного воздействия на климат урбанизированных территорий представлен, например, в [8, 9] и других публикациях.

Одной из мезомасштабных моделей, широко используемых для оперативного прогноза погоды, атмосферных и климатических исследований во многих странах Европы и в России, является модель COSMO и ее различные версии, такие как COSMO-CLM, COSMO-ART, ICON. Описание этих моделей представлено на сайте консорциума [10] и в публикациях разработчиков этого семейства моделей (см. [11, 12] и др.). Для этого семейства моделей разработана простая и удобная схема TERRA_URB [13–15] описания процессов, происходящих на урбанизированной подстилающей поверхности, и, в частности, антропогенных потоков тепла, что особенно важно для исследования роли энергопотребления городского хозяйства в формировании климатических особенностей городских агломераций. Результаты моделирования климата городов России с использованием модели COSMO-CLM подробно описаны в монографии [16], а также в статьях [17–22] и ряде других публикаций.

В данной работе кратко излагаются методы и алгоритмы описания полей антропогенных потоков тепла в атмосферу с поверхности урбанизированных территорий, используемые в современ-

ных региональных климатических моделях на примере модели COSMO-CLM. Обсуждается место климатических процессов городского масштаба в спектре атмосферных и климатических процессов. Представлены также результаты численных экспериментов по оценке влияния антропогенных потоков тепла на температуру, влажность и скорость ветра в городской агломерации.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЫ

Тепловое загрязнение городской атмосферы за счет антропогенных потоков тепла существенно влияет на энергетический баланс поверхности урбанизированной территории (*SEB* — *surface energy balance*). Запишем выражение для энергетического баланса поверхности B_S аналогично [23]:

$$B_S = Q^* + Q_F - Q_H - Q_E - \Delta Q_S, \quad (1)$$

где Q^* — суммарный баланс радиационных потоков на поверхности (солнечного и теплового), Q_H и Q_E — потоки явного и скрытого тепла от поверхности в атмосферу, ΔQ_S — поток тепла в грунт и сооружения, называемый также потоком теплового накопления, Q_F — антропогенный поток тепла. В (1) для антропогенного потока тепла использовано обозначение Q_F , принятое еще в работе [23] и наиболее распространенное в публикациях последних лет (в ряде публикаций этот поток обозначается Q_A или Q_H). Для исследования влияния теплового загрязнения атмосферы на климат города и его пригородов необходимо оценить величину и пространственно-временное распределение тепловых выбросов городского хозяйства.

Опыт такой оценки сталкивается с большими трудностями, главная из которых заключается в отсутствии единой международной методологии статистического учета объектов производства и потребления энергии. В разных странах на различных урбанизированных территориях имеется огромное количество источников выделения антропогенного тепла: система теплоснабжения города, включающая в себя крупные тепловые станции и тепловые сети, автомобильный транспорт, котельные, а также промышленные, жилые, офисные и торговые здания, потребляющие тепловую и электроэнергию. При этом электроэнергия производится, как правило, вне городских территорий, и статистические данные по ее производству могут относиться к одному региону, а данные по потреблению — к другому. Аналогичная ситуация со статистикой потребления автомобильного топлива.

Если речь идет о городе в его административных границах, то существенная трудность состоит в том, что в силу исторических причин площадь различных городов оценивается по-разно-

му. С административной точки зрения, в одних случаях город имеет четко очерченные границы компактного проживания горожан, а в других случаях город рассматривается как огромная агломерация, состоящая из исторического центра, спальных районов, промышленных, природных и пригородных территорий.

Напомним основные современные методы оценки величины антропогенных потоков тепла:

1. Непосредственные (*in situ*) измерения антропогенных тепловых потоков, условно говоря, на уровне крыш.

2. Дистанционные спутниковые измерения потоков теплового излучения и выделение антропогенных потоков тепла с учетом данных о свойствах городской поверхности, застройки и пограничного слоя атмосферы.

3. Идентификация и суммирование всех потребителей тепловой и электрической энергии в городе с учетом транспортных средств, протяженности дорог и инженерных коммуникаций.

4. Расчет тепловой эмиссии по данным о суммарном энергопотреблении на душу населения и плотности населения.

Сравнительный анализ применимости этих методов приведен в [24, 25], где показано, что первый из перечисленных методов не может использоваться для описания пространственно-временного распределения антропогенных потоков тепла даже в пределах городского района. Второй метод может охватывать большие территории, но его применение достаточно сложное из-за трудностей решения обратных задач дистанционного зондирования в тепловой области спектра. В настоящее время для оценки пространственно-временного распределения антропогенных потоков тепла используются в основном третий и четвертый подходы, которые в ряде современных работ по климату города определяются как *top-down* (нисходящий, сверху вниз) и *bottom-up* (восходящий, снизу вверх) подходы.

В работах по физике атмосферы и изменению климата эти подходы наиболее широко используются при описании методик инвентаризации эмиссии парниковых газов. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) инициировала разработку Интегрированной глобальной информационной системы по парниковым газам (ИГИСПГ), в которой предлагается объединить данные измерений концентраций парниковых газов в атмосфере (метод “сверху вниз”) с кадастровыми данными о выбросах (метод “снизу вверх”). В методе “снизу вверх” суммируются выбросы от конкретных источников с учетом статистических данных, например о количестве и типе работающих предприятий и количестве автотранспорта. В методе “сверху вниз” эмиссия парниковых газов оценивается посредством инверсионного моделирова-

ния измеренных концентраций парниковых газов в атмосфере [26].

В ряде работ по оценке антропогенных потоков тепла также используется терминология *top-down* (сверху вниз) и *bottom-up* (снизу вверх) [27, 28]. Как правило, эти подходы описаны только в общих чертах. Мы будем считать, что инвентаризация различных источников антропогенного тепла является методом оценки суммарного потока снизу вверх, а эмпирические расчеты на основе данных о потреблении энергии на душу населения и плотности населения — методом оценки суммарного потока сверху вниз.

В [28] оценка АПТ методом сверху вниз описана следующим образом:

$$Q_F = Q_V + Q_B + Q_M, \quad (2)$$

где Q_V — тепло, выделяемое городским транспортом, Q_B — тепло, выделяемое зданиями, сооружениями и другими объектами инфраструктуры города, Q_M — тепло человеческого метаболизма. По различным оценкам величина Q_M составляет 2–3% от Q_F и поэтому обычно не учитывается. Существенным недостатком такого подхода являются трудности учета всех возможных источников тепла, например свалок бытовых отходов.

Основой метода сверху вниз является использование данных о потреблении энергии на душу населения в стране, где расположен тот или иной город, и данных о плотности населения на территории всей земной суши. Такие эмпирические формулы используются как для характеристики средних значений тепловой эмиссии для мегаполисов мира, так и для распределения антропогенного потока тепла по территории городских агломераций и их окрестностей (см., например, [29–32] и др.) Для оценки осредненной по территории города величины антропогенного потока тепла в [30] была предложена формула, уточняющая формулу, используемую в [29], за счет учета среднего энергопотребления на душу населения в конкретной стране по данным ООН [33],

$$Q_F = k \cdot PD \cdot EC, \quad (3)$$

где PD — плотность населения в пределах городской агломерации, EC — энергопотребление на душу населения (*per capita*) в стране. Если Q_F измеряется в Вт/м², PD — в чел./км², EC — в килограммах нефтяного эквивалента (кг н. э.), то коэффициент $k = 1.325$.

Интересно отметить, что хотя данные о суммарном энергопотреблении на душу населения во всех странах мира ежегодно приводятся во множестве национальных статистических сборников и обобщаются на мировом уровне агентствами ООН, в наиболее доступном виде они содержатся

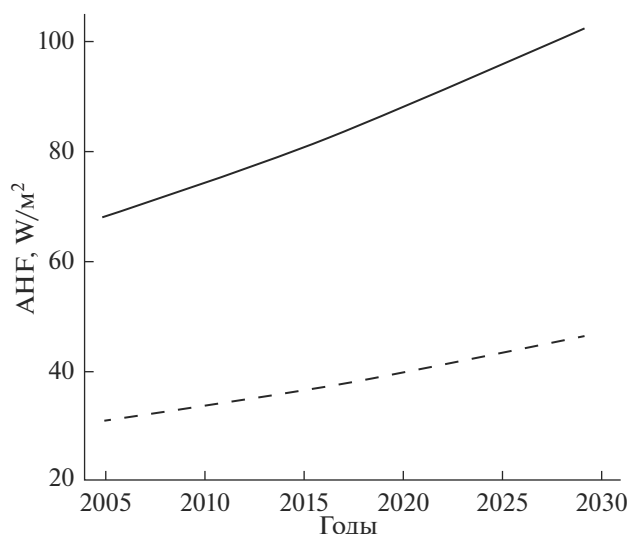


Рис. 1. Изменения среднегодовых значений АПТ в Москве с 2005 по 2030 гг. согласно сценарию [31]: пунктир — ячейка 0.5 на 0.5 градуса площадью примерно 1700 км² (больше площади Москвы в границах 2011 г.), сплошная кривая — 2.5 на 2.5 минуты площадью примерно 12 км² (в районе третьего транспортного кольца Москвы).

в ежегодной публикации Всемирного банка “Little Green Data Book” (см., например, [33]).

Для нужд численного моделирования локальных климатических процессов в городских агломерациях разрабатываются схемы описания пространственно-временного распределения антропогенных потоков тепла на всей поверхности суши Земли. В схеме TERRA_URB [13] используются среднегодовые значения антропогенного потока тепла $\overline{Q_F}$, представленные на сайте NCAR/UCAR [34]. Эти данные получены top down с использованием данных о плотности населения и энергопотребления на душу населения по состоянию на 2005 г. и сценария развития мировой энергетики до 2030 г. Годовой и суточный ход этих потоков получен с помощью формул, предложенных в [31],

$$Q_F(t_d, t_y) = \overline{Q_F} w_d(t_d) w_y(t_y), \quad (4)$$

где Q_F — антропогенный поток тепла в данное время в данном месте, t_d и t_y — местное время дня и года.

Весовая функция суточного хода АПТ w_d в зависимости от t_d рассчитывается как

$$w_d(t_d) = N(t_d) E1 b_1 + H(t_d) E1 E2 + b_2, \quad (5)$$

где $N(t_d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t_d-\mu)^2/2\sigma^2}$ — нормальное распределение, $H(t_d) = A_1 \cos(2\pi f t_d)$ — гармоническая функция, $E1 = 0.5 \{ \operatorname{erf} [\alpha(t_d - \mu + \epsilon)/\sigma] + 1.0 \}$ и $E2 = 0.5 \{ \operatorname{erf} [-\alpha(t_d - \mu - \epsilon)/\sigma] + 1.0 \}$ — первая и вто-

рая функции ошибок. Значения коэффициентов в данных функциях равны $b_1 = 0.451$, $b_2 = 0.8$, $\sigma = 0.18$, $\mu = 0.5$, $A_1 = -0.3$, $f = 2.0$, $\alpha = 10.0$, $\epsilon = 0.25$.

Весовая функция годового хода АПТ w_y в зависимости от t_y рассчитывается как

$$w_y(t_y) = 1 + A_2(\theta) \sin[2\pi(t_y + 0.25)], \quad (6)$$

где θ — широта в градусах, а весовая функция для Северного полушария на широтах севернее 33° с.ш.

равна $A_2(\theta) = 1 - e^{-(\theta-33)/25}$, $\theta > 33$, от экватора до 33° с.ш. предполагается отсутствие сезонного хода. Следует отметить, что в используемой в COSMO-CLM версии TERRA_URB некоторые коэффициенты в вышеприведенных выражениях скорректированы, а именно $\sigma = 0.3$, $A_1 = -0.5$.

Формулы Фланнера [31], несмотря на свою некоторую громоздкость, достаточно универсальны и удобны для численного моделирования влияния антропогенных потоков тепла на мезомасштабные погодные и климатические процессы. В последние годы стали появляться публикации с более простыми формулами для расчета пространственно-временного распределения антропогенных потоков тепла на конкретных городских агломерациях, но процесс получения новых универсальных алгоритмов описания АПТ еще далек от завершения.

В модели COSMO-CLM среднегодовые значения АПТ для конкретной ячейки сетки меняются со временем в соответствии со сценарием, предложенным в [31]. На рис. 1 показана динамика величин АПТ по [31] для двух размеров ячейки — 0.5 на 0.5 градуса и 2.5 на 2.5 минуты в Московском регионе.

В расчетах для подготовки файла с внешними параметрами используется онлайн система WebPER (Web utility for Preparation of External Parameters) [35], при этом страница доступна только пользователям, зарегистрированным в консорциуме COSMO (Лаборатория математической экологии ИФА им. А.М. Обухова РАН является таким пользователем). Программа является web интерфейсом для программы EXTPAR, которая подготавливает файлы с внешними параметрами путем аппроксимации на рассматриваемую вычислительную сетку исходных данных об орографии подстилающей поверхности, растительности, аэрозолях, антропогенных потоках тепла и т.д. В качестве исходных данных об антропогенных потоках тепла используются данные [34].

Надо отметить, что данные [34] и подготовленные системой WebPER [35] несколько отличаются друг от друга. На рис. 2 показаны поля АПТ в московском регионе по данным [34] для 2005 и 2016 гг. и полученные с помощью системы WebPER. В последнем случае различия величин АПТ в пределах Москвы (в границах 2011 г.) выражены значительно ярче.

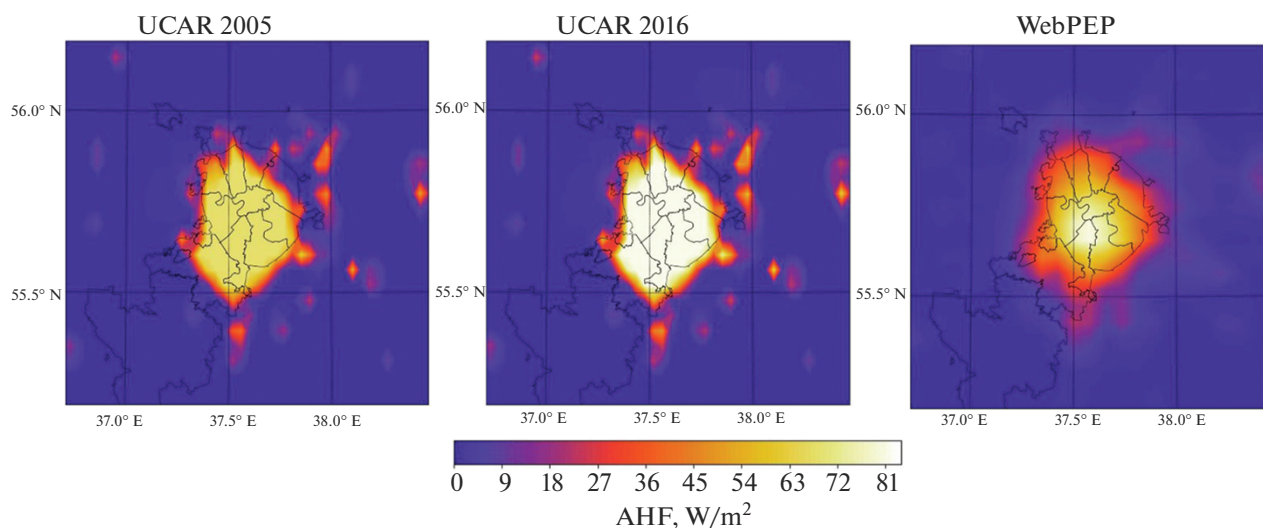


Рис. 2. Поля среднегодовых значений антропогенных потоков в московском регионе в 2005 и в 2016 гг. в соответствии со сценарием [31] и поле этих потоков, используемых для расчетов по модели COSMO-CLM.

На рис. 3 показаны среднегодовые значения АПТ для регионов, где расположены некоторые крупные города России и мира (Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Нью-Йорк, Пекин, Лондон), полученные с помощью системы WebPER.

Сравнение этих полей показывает, что Москва является одним из наиболее “горячих” мегаполисов мира. Более интенсивные антропогенные потоки тепла получены среди указанных городов только в Нью-Йорке. Напомним, что данные [34] основаны на оценках АПТ за 2005 г. и в настоящее время для отдельных городов (например, для Пекинской агломерации) могут быть сильно занижены. Отметим также, что в расчетах по модели COSMO-CLM по умолчанию используется набор данных, для которого среднегодовые значения АПТ на модельной сетке перераспределяются в соответствии с полем водонепроницаемости (“заасфальтированности”) городской территории (impervious surface area – ISA). Поэтому предполагается, что районы с большой долей ISA (в том числе промышленные районы с низкой плотностью населения) имеют более высокие значения антропогенных потоков тепла [15]. Учет доли водонепроницаемой поверхности может частично объяснять различие полей АПТ на рис. 2.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Исследование и моделирование мезомасштабных процессов в атмосфере берет свое начало в середине XX в. практически одновременно с усилением интереса к изучению климата города, что вполне естественно, поскольку масштабы городских агломераций находятся практически в середине спектра мезомасштабных атмосферных процессов.

Согласно [36], понятие мезомасштабных атмосферных процессов появилось в процессе становления исследования атмосферы с помощью радаров и было впервые употреблено в работе [37]. Подробно классификация мезомасштабных атмосферных процессов описана в [38, 39] и других обзорах.

На рис. 4 показан спектр атмосферных процессов от турбулентности (метры и секунды) до “длинных волн” (десяtkи тысяч километров и месяцы). Естественно, меньшие по горизонтали процессы являются более быстрыми и наоборот, но интересно отметить, что отношение пространственного и временного размеров, как это показано в [39], имеет примерно одинаковый порядок величины для большинства атмосферных процессов $\sim 10 \text{ м с}^{-1}$. Временные шкалы мезомасштабных явлений по [39] лежат в пределах от периода Брента–Вайсяля, равного $2\pi/N$ (примерно 10 мин), до периода вращения плоскости маятника Фуко (маятниковый день или *pendulum day*), равного $2\pi/f$ или примерно 17 часов на широте 45° . Здесь N – частота Брента–Вайсяля, а f – параметр Кориолиса.

При разработке новых версий численных моделей городского климата и постановке численных экспериментов необходимо учитывать, что в процессе роста и расширения городских агломераций атмосферные процессы “городского” масштаба сдвигаются по шкале мезомасштабных процессов “вправо” и “вверх” согласно диаграмме на рис. 4.

Одним из наиболее гибких в смысле возможностей моделирования влияния энергопотребления урбанизированных территорий на мезомасштабные атмосферные процессы является семейство моделей COSMO, разработанное, развиваемое и поддерживаемое Европейским консорциумом по

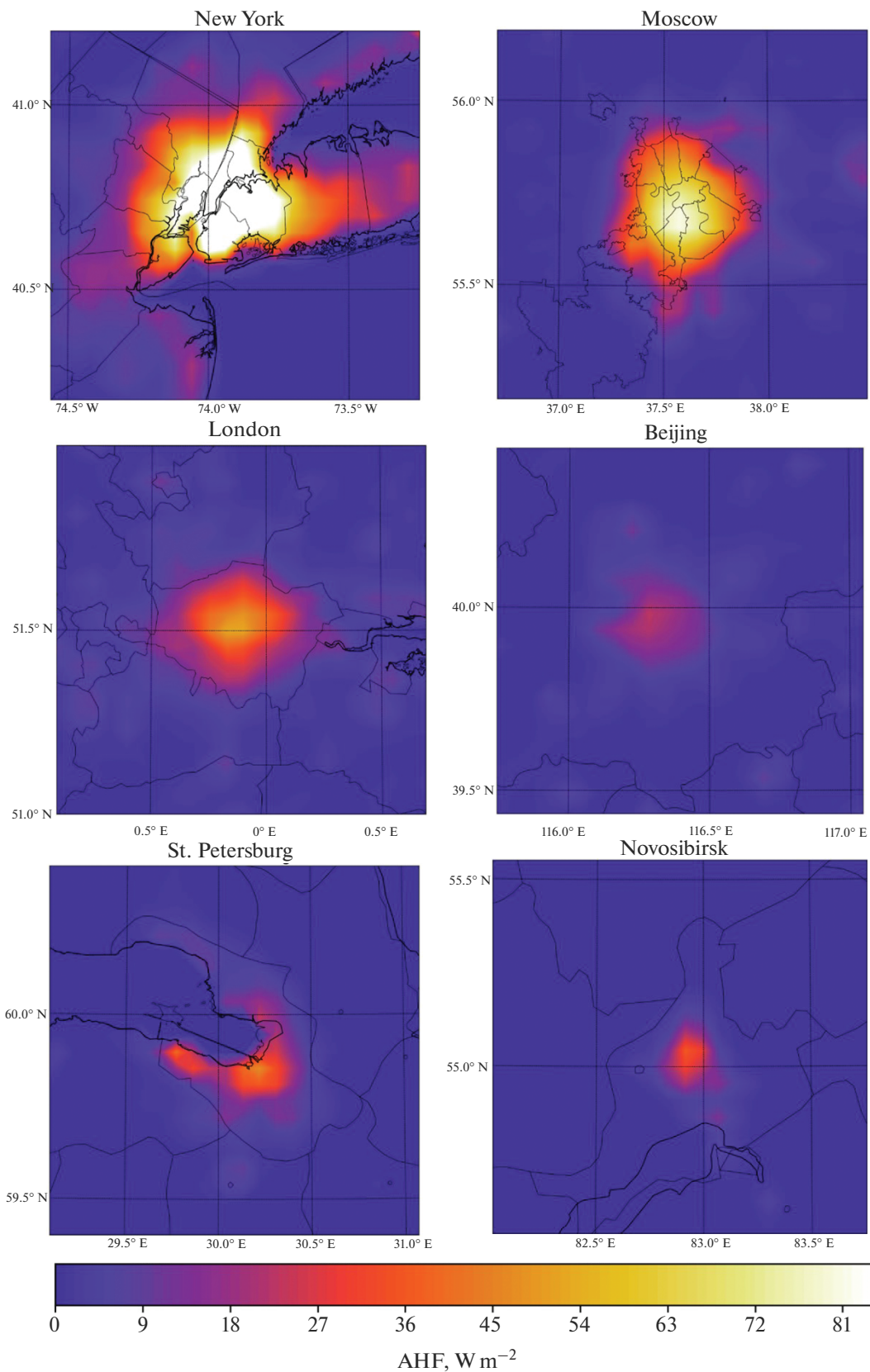


Рис. 3. Поля АПТ в регионах ряда мегаполисов мира, полученные с использованием утилиты WebPER на основе базы данных [34].

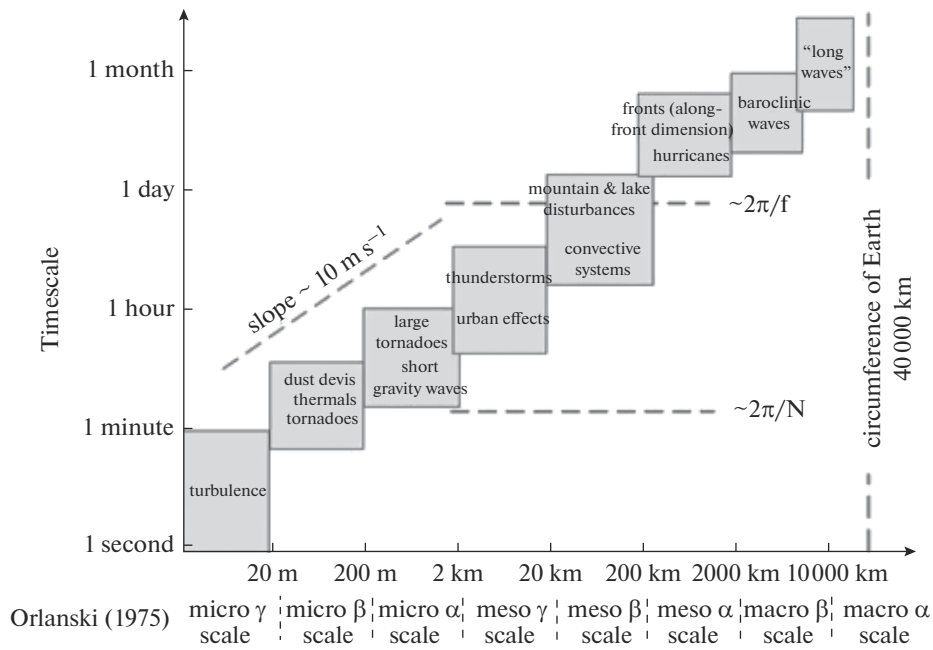


Рис. 4. Спектр атмосферных процессов (адаптировано из [36]).

мезомасштабному моделированию. По правилам консорциума Немецкая служба погоды (DWD) в оперативном режиме предоставляет из своей системы глобального моделирования начальные и граничные условия, необходимые для проведения расчетов на конкретной территории. Регулярно происходит обновление версий модели COSMO с включениями новых алгоритмов и возможностей. Подробную информацию о проектах и публикациях, связанных с использованием этой модели, можно найти на сайте <http://www.clm-community.eu/>.

Различные модификации моделей семейства COSMO в настоящее время широко используются как в научных исследованиях, так и в оперативной практике. Теория и практика использования моделей в России подробно описана в трудах сотрудников Росгидромета РФ и географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Одной из разновидностей моделей семейства COSMO является модель COSMO-CLM, предназначенная для исследования региональных климатических процессов и моделирования изменений климатического режима выбранной ограниченной территории.

В предыдущих работах авторов [20–22] был обоснован выбор модели COSMO-CLM с блоком описания баланса городской подстилающей поверхности TERRA_URB для оценки воздействия антропогенных потоков тепла на процессы формирования и трансформации городского острова тепла и показано, что воздействие особенно значимо в холодный период года.

В [20–22] было также показано, что антропогенные потоки тепла оказывают заметное влияние на ветровой режим мегаполиса. Так, в преде-

лах московской агломерации среднегодовая скорость ветра при учете антропогенных потоков тепла оказывается больше примерно на 1 м/с, чем при расчетах без учета антропогенных потоков тепла. При этом мезомасштабная атмосферная адвекция существенно влияет на интенсивность городского острова тепла и роль антропогенных потоков тепла в формировании температурного режима городской территории.

В модели COSMO происходит численное интегрирование системы термодинамических уравнений для сжимаемого потока воздуха во влажной атмосфере. Уравнения записываются в сферической системе координат со смещенным положением полюса для уменьшения искажений, связанных со схождением меридианов к полюсу. Значения параметров задаются на сетке С по классификации Аракавы по горизонтали и на сетке Лоренца по вертикали

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= -\nabla p + \rho \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times (\rho \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\mathbf{T}), \\
 \frac{dp}{dt} &= -(c_{pd}/c_{vd}) p \nabla \cdot \mathbf{v} + (c_{pd}/c_{vd} - 1) Q_h, \\
 \rho c_{pd} \frac{dT}{dt} &= \frac{dp}{dt} + Q_h, \\
 \rho \frac{dq^v}{dt} &= -\nabla \cdot \mathbf{F}^v - (I^l + I^f), \\
 \rho \frac{dq^{l,f}}{dt} &= -\nabla \cdot (\mathbf{P}^{l,f} + \mathbf{F}^{l,f}) + I^{l,f}, \\
 \rho &= p \left\{ R_d \left(1 + (R_v/R_d - 1) q^v - q^l - q^f \right) T \right\}^{-1},
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где t – время, p – давление, T – температура, ρ^x – парциальная плотность составляющей смеси x , $\rho = \sum_x \rho^x$ – общая плотность воздушной смеси, $q^x = \rho^x / \rho$ – массовая доля (удельное содержание) составляющей x , $v = \rho^{-1}$ – удельный объем, e – удельная внутренняя энергия, $h = e + pv$ – удельная энтальпия, \mathbf{v} – барицентрическая скорость (относительно вращающейся земли), I^x – источники/поглотители составляющей x , \mathbf{J}^x – диффузионный поток составляющей x , \mathbf{J}_e – диффузионный поток внутренней энергии (тепловой поток), \mathbf{R} – плотность потока солнечного и теплового излучения, $\boldsymbol{\Omega}$ – постоянная угловая скорость вращения Земли, \mathbf{g} – кажущееся ускорение силы тяжести, $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$ – оператор полной (лагранжевой) производной по времени, $\partial/\partial t$ – оператор локальной (эйлеровой) производной по времени, ∇ – оператор градиента (набла), c_{px} – удельная теплоемкость составляющей x при постоянном давлении, $c_v = \sum_x c_{vx} q^x$ – удельная теплоемкость влажного воздуха при постоянном объеме, $l_V = L_V - (c_{pl} - c_{pv})(T - T_0)$ – скрытая теплота парообразования, $l_S = L_V - (c_{pl} - c_{pv})(T - T_0)$ – скрытая теплота сублимации, $l_S = L_F - (c_{pl} - c_{pv}) \times (T - T_0)$ – разность l_S и l_V , $L_V = -(h_l^0 - h_v^0)$ и $L_F = L_S - L_V$ – значения l_V , l_S и l_F при эталонной температуре $T_0 = 273.15$ К, $h_x = h_x^0 + c_{px}(T - T_0)$ – частичные удельные энтальпии, h_x^0 – удельная энтальпия составляющей x , $\mathbf{T} = \rho \mathbf{v}'' \mathbf{v}''$ – турбулентный поток импульса (тензор напряжений Рейнольдса), $\mathbf{F}^x = \rho \mathbf{v}'' q^x$ – турбулентный поток составляющей x ($\sum_x \mathbf{F}^x = 0$), $\mathbf{F}_h = \rho \mathbf{v}'' h$ – турбулентный поток энтальпии, $\mathbf{P}^l = \rho q^l \mathbf{v}_T^l$ и $\mathbf{P}^f = \rho q^f \mathbf{v}_T^f$ – потоки осадков жидкой воды и льда, зависящие от средних скоростей падения соответствующих частиц, то есть их конечной скорости \mathbf{v}_T^l и \mathbf{v}_T^f , $Q_h = L_V I^l + L_S I^f - \nabla \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{R})$ – скорость диабатического нагрева/охлаждения, $\mathbf{H} = \mathbf{F}_h - \sum_x \widehat{h}_x \mathbf{F}^x$ – турбулентный поток ощутимого тепла, $\widehat{\psi}$ – усреднение переменной ψ по массе (среднее по Гессельбергу), $\overline{\psi}$ – усреднение ψ по конечному промежутку времени Δt и элемента объема ΔV , определяемое формулой $\overline{\psi} = \frac{1}{\Delta t \Delta V} \int \int \psi dt dV$, $x = d$ для сухого воздуха, $x = v$ для водного пара, $x = l$ для жидкой воды, $x = f$ для льда.

Отличительной особенностью COSMO-CLM является учет годового хода характеристик растительности и возможность задания зависимости концентрации парниковых газов от времени. Программный комплекс COSMO-CLM состоит из двух логических частей. Первая часть (int2lm) служит для предобработки данных. В данной работе использовалась программа int2lm версии 2.00_clm4. Вторая часть (cclm) занимается непосредственно реализацией численных вычислений модели COSMO-CLM. В данной работе использовалась программа cclm версии 5.00_clm9.

COSMO-CLM работает на мезо- γ и мезо- β масштабах. Для возможности вычислений на сетках с маленьким пространственным шагом применяется процедура динамического даунскейлинга [40]. В данной работе на первом шаге моделирования использовалась сетка с пространственным шагом ~ 16.9 км, покрывающая большую часть европейской территории России (рис. 5).

В качестве входных динамических параметров (температура воздуха, давление, скорость ветра и т.д.) для этой сетки использовалась аппроксимация данных реанализа ERA-Interim [41] (шаг сетки данных реанализа ~ 0.75 градусов). Величина шага по времени составляла 100 с. На втором шаге моделирования использовалась сетка с пространственным шагом ~ 5 км, примерно совпадающая по размеру с Московской областью (рис. 5). В качестве входных параметров для второго шага моделирования использовались значения переменных, полученных на первом шаге моделирования. Для моделирования на сетке с пространственным шагом 5 км использовался шаг по времени 30 с. Величина шага по времени для обеспечения устойчивости конечно-разностной схемы выбирается согласно правилу $\Delta t \leq \frac{\Delta s}{2v_{\max}}$, где Δs – минимальная величина пространственного шага сетки, а v_{\max} – значение максимальной скорости ветра.

Для работы COSMO-CLM также необходимы значения статических параметров (таких как высота поверхности над уровнем моря, глубина залегания корней и т.д.). Значения параметров для каждого домена были получены с помощью онлайн утилиты WebPEP, в основе которой лежит программа EXTPAR версии 4.0.1. Вычислительная сетка по вертикали состояла из 40 слоев атмосферы (верхняя граница ~ 22.7 км) и 10 слоев почвы (нижняя граница 11.5 м).

Схема учета физических процессов на подстилающей поверхности в условиях урбанизированной территории с городскими каньонами – TERRA_URB [11, 13, 15], представленная на рис. 6, была разработана на основе модуля учета природных процессов на подстилающей поверхности (почва и растительность) и взаимодействия под-

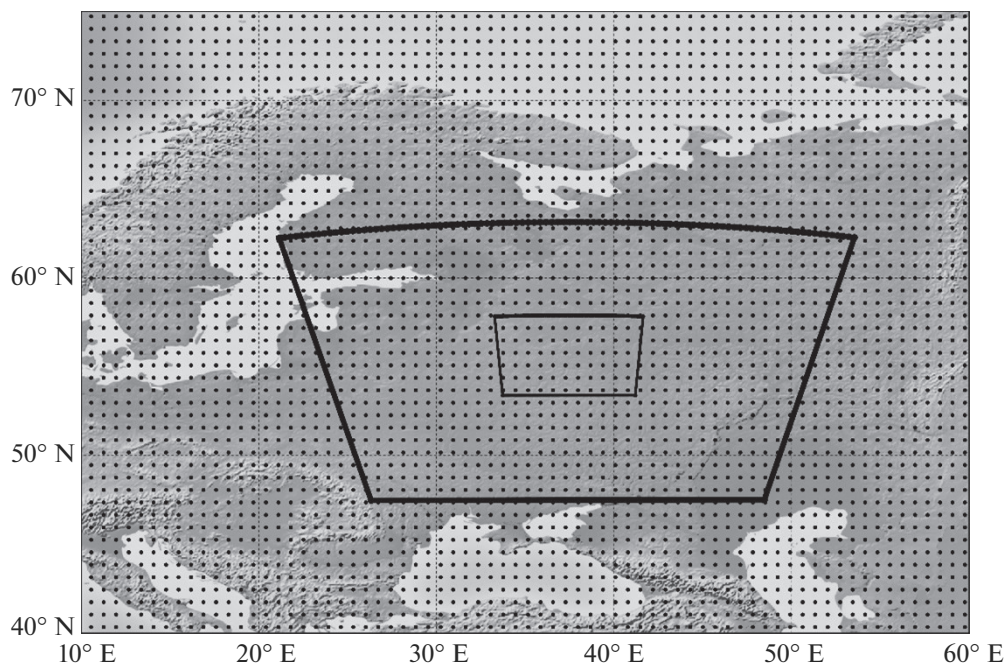


Рис. 5. Границы используемых при моделировании доменов и положение точек реанализа ERA Interim [41].

стиляющей поверхности с атмосферными процессами - SOILVEG и TERRA_ML, а также с учетом полуэмпирической параметризации SURY [11]. Данная схема была создана для исследования городского климата и прогнозирования погоды на урбанизированных территориях с помощью семейства моделей COSMO. Схема TERRA_URB включает в себя параметризацию альбедо урбанизированной территории с городскими каньонами, ее излучательную способность в тепловой области, аэродинамическую шероховатость, теплоемкость и теплопроводность. В схеме TERRA_URB также учитывается перенос турбулентной кинетической энергии вблизи поверхности. Антропогенные потоки тепла в TERRA_URB задаются на основе работы [31]. Также в TERRA_URB учитывается, что часть городской поверхности водонепроницаема и позволяет описывать гетерогенность городской среды, состоящей из непроницаемых поверхностей, почвы, растительности, луж и снега. В данном исследовании рассматривалась/использовалась параметризация, аналогичная представленной в работе [17].

ВЛИЯНИЕ АПТ НА ТЕМПЕРАТУРУ, ВЛАЖНОСТЬ И ВЕТЕР В ГОРОДЕ

В данной работе обобщены предыдущие исследования авторов и их коллег и представлены новые результаты моделирования метеорологических условий в Москве и ее окрестностях в период с декабря 2015 г. по январь 2018 г. В качестве граничных условий использовались данные ре-

анализа ERA INTERIM [41]. В качестве начальных данных использовались данные, получаемые с помощью утилиты EXTPAR [42, 43].

В работе производилось сравнение результатов моделирования в двух режимах: при отсутствии антропогенных потоков тепла — *no AHF* и при их наличии — *AHF*. Результаты расчета сезонного хода городского острова тепла в Московской агломерации за 2016–2017 гг. показали принципиальное различие влияния антропогенных потоков тепла на термический и ветровой режимы

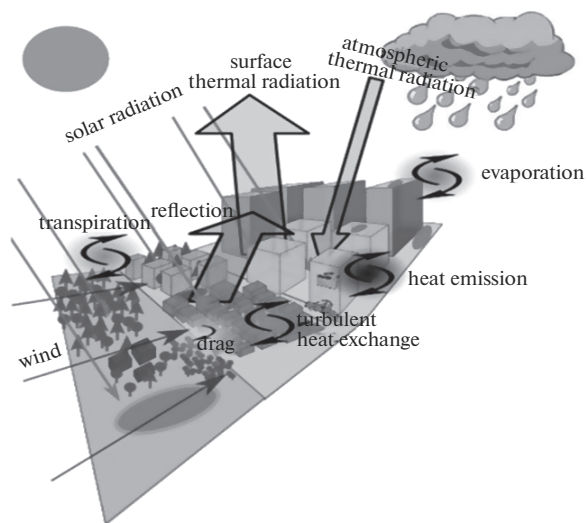


Рис. 6. Схема TERRA_URB [13].

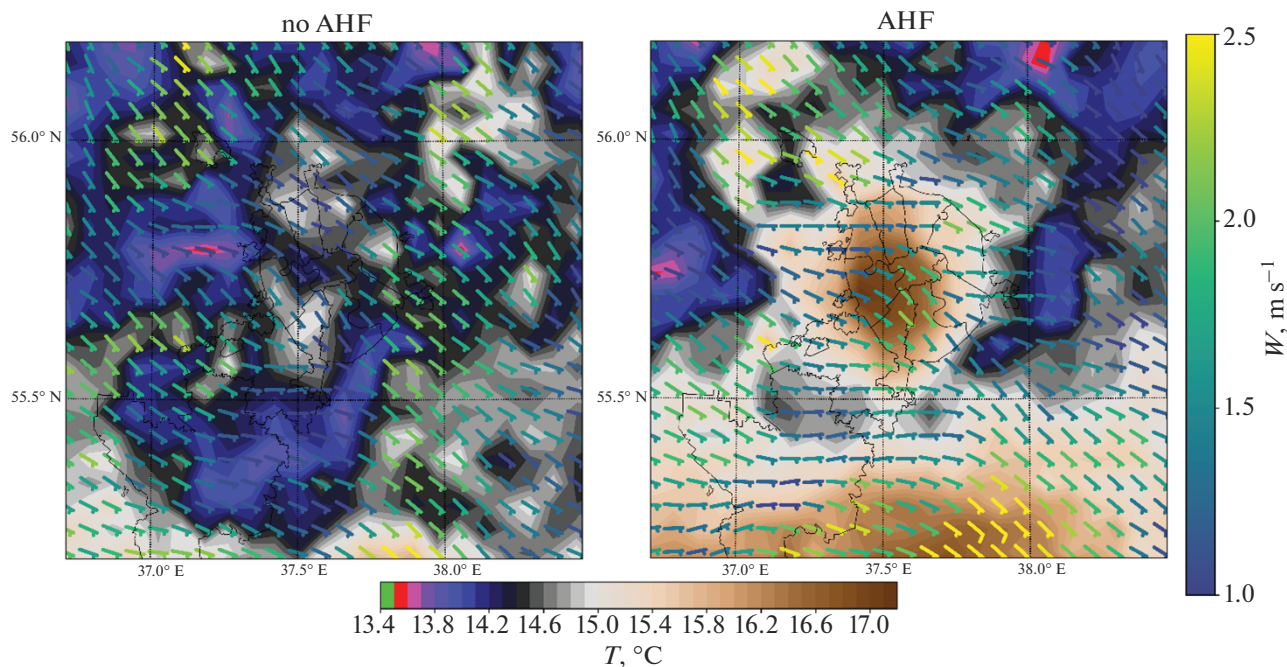


Рис. 7. Поля температуры, скорости и направления ветра 21.06.2016 г. при отсутствии (слева) и при учете (справа) антропогенных потоков тепла.

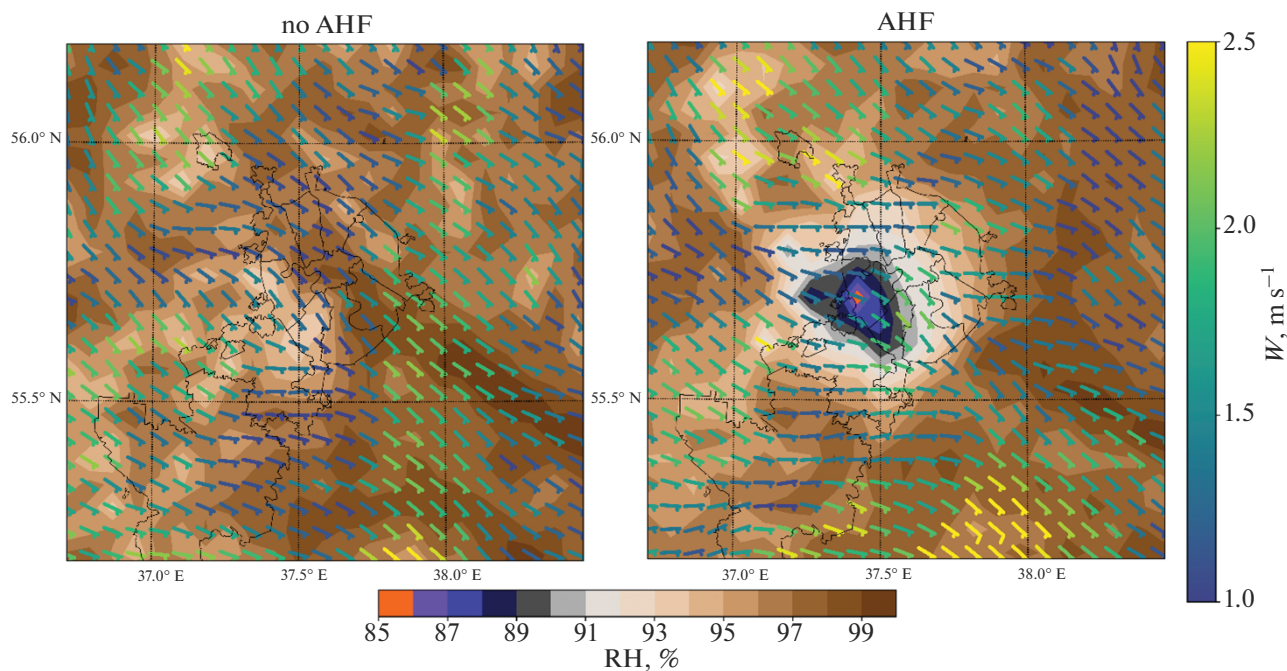


Рис. 8. Поля относительной влажности, скорости и направления ветра 21.06.2016 г. при отсутствии (слева) и при учете (справа) антропогенных потоков тепла.

городской атмосферы в теплый и холодный периоды года. Характерные примеры влияния наличия антропогенных потоков тепла на температурный, ветровой и влажностный режимы атмосферы московской агломерации для летних условий

(июнь 2016 г.) представлены на рис. 7 и 8, а для зимних условий (декабрь 2016 г.) — на рис. 9 и 10.

Результаты моделирования наглядно показывают, что влияние антропогенных потоков тепла на значение температуры существенным образом

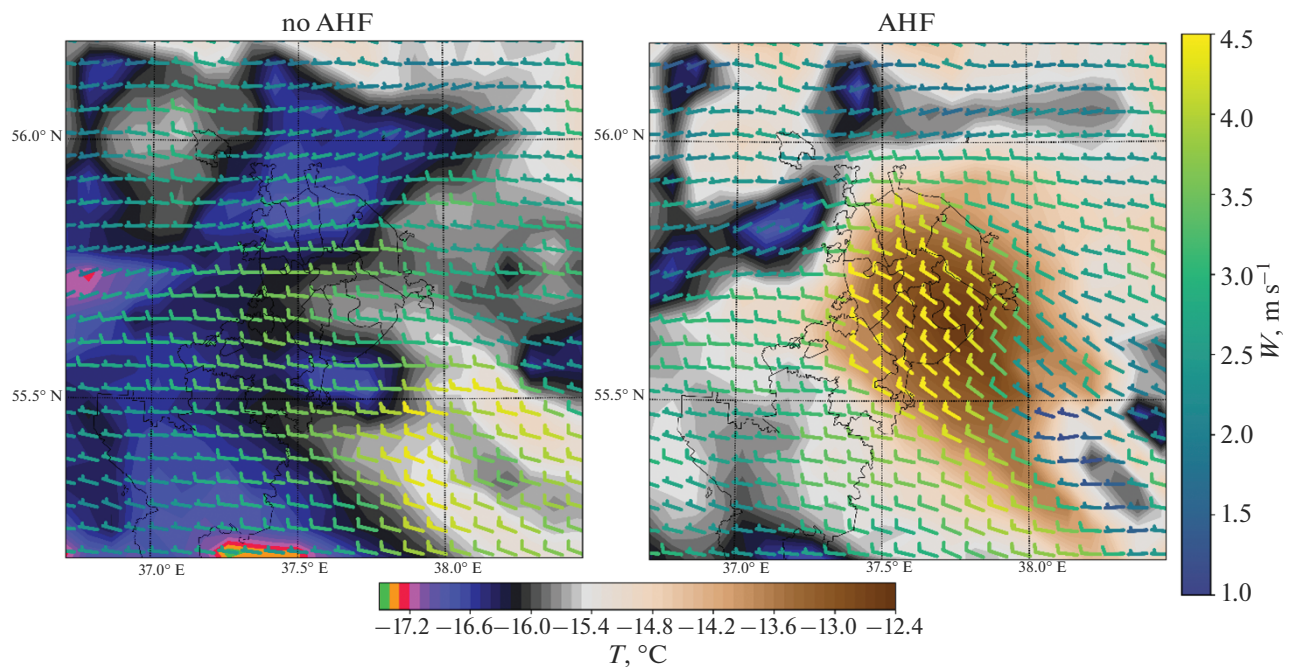


Рис. 9. Поля температуры, скорости и направления ветра 13.12.2016 г. при отсутствии (слева) и при учете (справа) антропогенных потоков тепла.

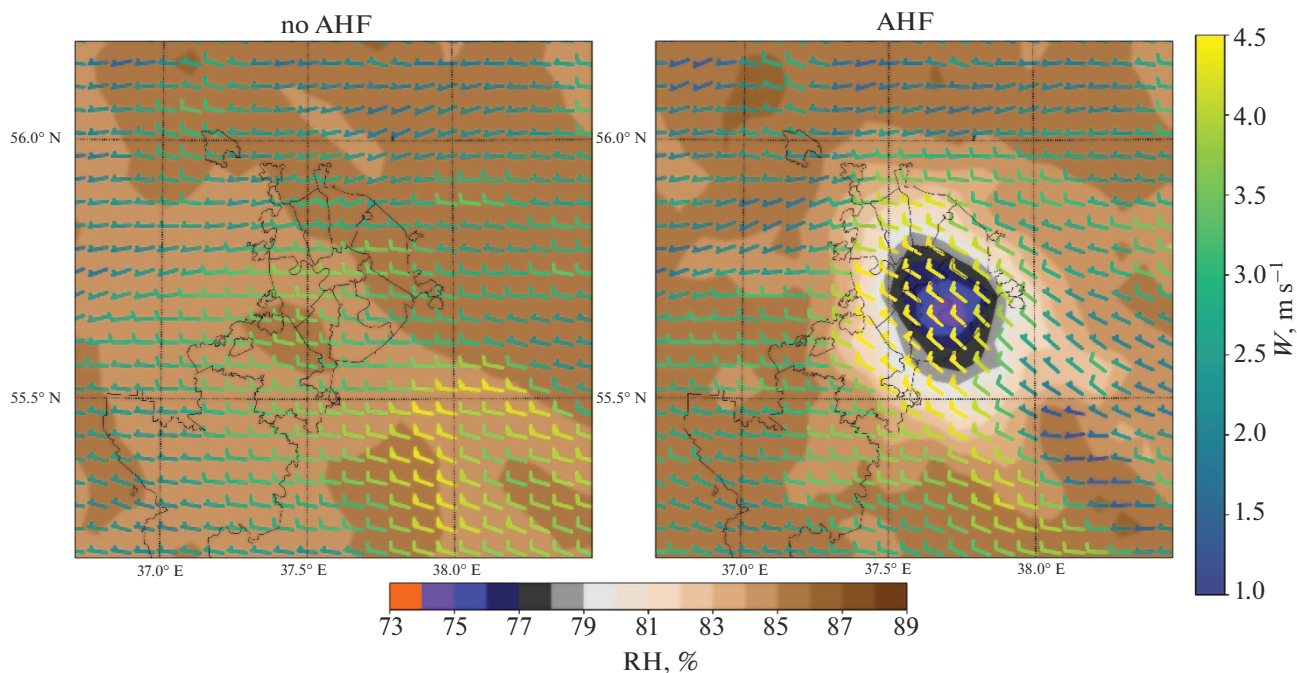


Рис. 10. Поля относительной влажности, скорости и направления ветра 13.12.2016 г. при отсутствии (слева) и при учете (справа) антропогенных потоков тепла.

зависит от погодных условий. Чем выше скорость ветра, тем меньше увеличение температуры под действием АПТ.

В процессе моделирования были выделены некоторые специфические метеорологические си-

туации, как, например, 12 января 2017 г., когда антропогенные потоки тепла “остановили” продвижение холодного северного фронта, и разность температур с и без учета АНФ составила 7 градусов. За исключением таких особых случаев про-

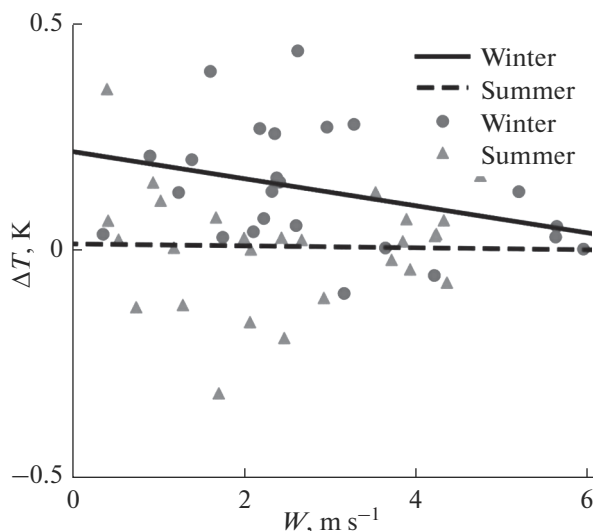


Рис. 11. Зависимость увеличения температуры под действием АПТ от скорости ветра.

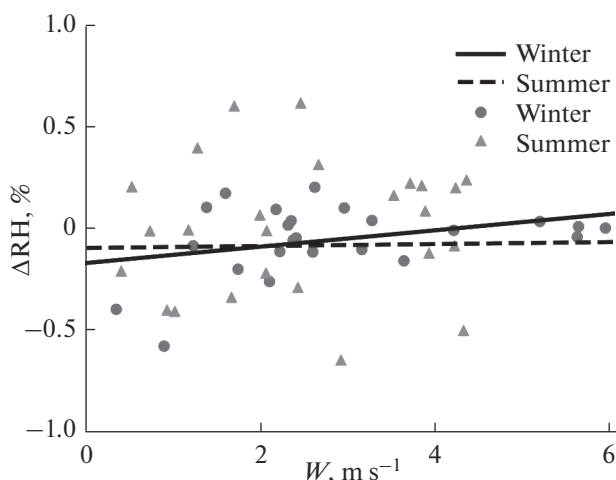


Рис. 12. Зависимость изменения относительной влажности воздуха под действием АПТ от скорости ветра.

слеживается практически линейная взаимосвязь между увеличением под действием АПТ средней по внутреннему домену температуры и средней скорости ветра (рис. 11).

Давление водяного пара при включении антропогенных потоков тепла меняется не очень сильно. Однако давление насыщенного водяного пара растет вместе с ростом температуры. Поэтому включение в рассмотрение антропогенных потоков тепла приводит к уменьшению относительной влажности воздуха — образуется остров сухости (см. рис. 8 и 10). Отметим, что наблюдается линейная зависимость между уменьшением под действием АПТ средней по внутреннему домену относительной влажности и средней скорости ветра (рис. 12).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения проекта РНФ были выполнены расчеты влияния энергопотребления урбанизированных территорий на мезомасштабные атмосферные процессы с помощью модели COSMO-CLM с блоком TERRA_URB. Расчеты показали, что из всех составляющих баланса энергии на урбанизированных территориях именно антропогенные потоки тепла определяют процессы формирования и трансформации городского острова тепла, особенно в холодный период года.

Исследование воздействия антропогенных потоков тепла на влагообмен поверхности и атмосферы урбанизированной территории показало, что тепловые выбросы незначительно влияют на общее содержание водяного пара в городской атмосфере, однако, поскольку давление насыщения водяного пара резко растет с ростом температуры, включение антропогенных потоков тепла приводит к уменьшению относительной влажности воздуха и образованию городского “острова сухости”.

Проведено моделирование влияния антропогенных потоков тепла на ветровой режим мегаполиса. В случае московской агломерации среднегодовая скорость ветра увеличивается при учете влияния антропогенных потоков тепла более чем на 1 м/с, при этом преобладающее направление ветра меняется незначительно. В свою очередь, региональная атмосферная адвекция существенно влияет на интенсивность городского острова тепла, усиление или ослабление обратных связей между температурным режимом и энергопотреблением урбанизированных территорий.

Как широко известно и было отмечено выше, в последние десятилетия особенно большое внимание влиянию АПТ на климат города уделяется в странах Юго-Восточной Азии, особенно в Японии, Китае и Южной Корее. В работах [44–48] и множестве других публикаций японских, китайских и корейских ученых, как правило, для оценки величины антропогенных потоков тепла используются локальные (обычно муниципальные) данные об энергопотреблении азиатских мегаполисов. Аналогичный подход развивается и в работах участников проекта РНФ “Анализ влияния региональных изменений климата на энергопотребление городского хозяйства российских мегаполисов” [49–51]. Описанные в данной статье методы и результаты моделирования влияния теплового загрязнения городской атмосферы позволяют оценивать эффекты изменения энергопотребления городского хозяйства на локальные и региональные метеорологические и климатические процессы.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 16-17-00114 в части численного моделирования и анализа результатов рас-

четов и проекта РФФИ № 20-05-00254 в части описания и сравнения мезомасштабных климатических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. / Пер. с англ. Л.: ГИМИЗ, 1983. 248 с.
2. Кратцер П.А. Климат города / Пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 239 с.
3. Oke T.R., East C. The urban boundary layer in Montréal // *Boundary-Layer Meteorology*. 1971. № 1. P. 411–437.
4. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban Climates*. Cambridge University Press, 2017. 510 p.
5. Kellogg W.W. *Man's Impact on the Climate*. Cambridge (MA): MIT Press, 1971. P. 123–132.
6. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // *Докл. РАН*. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
7. Crutzen P.J. New Directions: The growing urban heat and pollution “island” effect – impact on chemistry and climate // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. P. 3539–3540.
8. Chapman S., Watson J.E.M., Salazar A., Thatcher M., McAlpine C.A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review // *Landscape Ecol.* 2017. V. 32. P. 1921–1935.
9. Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. Антропогенные мезометеорологические обратные связи: обзор современных исследований // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 6. С. 94–113.
10. <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>
11. Wouters H., Demuzere M., Blahak U. et al. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3027–3054
12. Vogel B., Vogel H., Baumer D. et al. The comprehensive model system COSMO-ART – Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 8661–8680.
13. Wouters H., Varentsov M., Blahak U. et al. User guide for TERRA_URB v2.2: The urban-canopy land-surface scheme of the COSMO model. Technical Report. 2017. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33691.87847/1>
14. COSMO Technical Report No. 40. Analysis and Evaluation of TERRA_URB Scheme. 2019. <https://doi.org/10.5676/DWD/pub/nwv/cosmo-tr40>
15. Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., Van Lipzig N. The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modelling // *Urban Climate*. 2015. № 11. 24–50.
16. Климат Москвы в условиях глобального потепления / Под. ред. А.В. Кислова. М.: Изд-во Московского университета, 2017. 288 с.
17. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. P. 50. <https://doi.org/10.3390/atmos9020050>
18. Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 17573–17587.
19. Alexandrov G.G., Belova I.N., Varentsov M.I., Dokukin S.A. 2017 Impacts of climate change on energy consumption of Russian cities in the winter period // *Proc. SPIE 10466. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 104666K* (30 November 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2287766>
20. Ginzburg A.S., Dokukin S.A. Numerical modeling of anthropogenic heat flux impact on air temperature in Moscow in wintertime // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012019>.
21. Ginzburg A.S., Dokukin S.A. Anthropogenic heat fluxes in urban agglomerations and their impact on meteorological processes // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 386. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012049>
22. Dokukin S.A., Ginzburg A.S. The influence of anthropogenic heat fluxes on the temperature and wind regimes of the Moscow and St. Petersburg regions // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 606 (in press).
23. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // *Quart. J. R. Met. Soc.* 1982. V. 108. № 455. P. 1–24.
24. Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях // *Докл. РАН*. 2011. Т. 439. № 2. С. 256–259.
25. Александров Г.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С. Антропогенные потоки тепла в столичных агломерациях России и Китая // *Докл. РАН*. 2014. Т. 457. № 1. С. 101–106.
26. Lee S.H., McKeen S.A., Sailor D.J. A regression approach for estimation of anthropogenic heat flux based on a bottom-up air pollutant emission database // *Atmos. Environ.* Oct., 2014. V. 95. P. 629–633.
27. Sailor D.J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 189–199.
28. Allen L., Lindberg F., Grimmond C.S.B. Global city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 1990–2005.
29. Block A., Keuler K., Schaller E. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L12211.
30. Ginzburg A., Raspletina N. Anthropogenic heat fluxes estimation for metropolitan areas and urban regions // *Geophys. Res. Abstr. Vienna*. 2008. Vol. 10. EGU2008-A-02526.
31. Flanner M.G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L02801.

32. *Мохов И.И.* Связь интенсивности “острова тепла” города с его размерами и количеством населения // Докл. РАН. 2009. Т. 427. № 4. С. 530–533.
33. The Little Green Data Book 2017. Washington DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1034-3>
34. <http://www.cgd.ucar.edu/tss/ahf/data>
35. https://tools.clm-community.eu/web_per/gui/web_per.php
36. *Markowski P., Richardson Y.* Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Wiley-Blackwell, 2010. 414 p.
37. *Ligda M.G.H.* In: Radar storm observations // Compendium of Meteorology, American Meteorological Society. USA, Boston, 1951. P. 1265–1282.
38. *Orlanski I.* A rational subdivision of scales for atmospheric processes // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1975. V. 56. № 5. P. 527–530.
39. *Thunis P., Bornstein R.* Hierarchy of mesoscale flow assumptions and equations // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 380–397.
40. *Murphy J.* An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate // J. Climate. 1999. V. 12. P. 29.
41. *Dee D.P. et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. 137. P. 553–597.
42. http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/int2lm_2.05.pdf
43. <http://www.cosmo-model.org/content/tasks/work-Groups/wg3b/default.htm#EXTPAR>
44. *Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K.* Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo // Atmos. Environ. 1999. V. 33. P. 3897–3909.
45. *Feng J.-M., Wang Y.-I., Ma Z.-J., Liu Y.-H.* Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China // J. Clim. 2012. V. 2012. P. 7187–7203.
46. *Wang K.S., Jiang J., Wang C., Zhou X., Wang X., Lee X.* Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing meteorological network // J. Geoph. Res. Atmos. 2017. V. 122. P. 2131–2154.
47. *Ryu Y.H., Baik J.J., Lee S.H.* Effects of anthropogenic heat on ozone air quality in a megacity // Atmos. Environ. 2013. V. 80. P. 20–30.
48. *Lee S.H., Song C.K., Baik J.J., Park S.U.* Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea // Theor. Appl. Climatol. 2009. V. 96. P. 291–303. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0040-6>
49. *Клименко В.В., Гинзбург А.С., Демченко П.Ф., Терешин А.Г., Белова И.Н., Касилова Е.В.* Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // Докл. РАН. 2016. Т. 470. № 5. С. 519–524.
50. *Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н.* Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.
51. *Alexandrov G.G., Ginzburg A.S.* Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment // Energy Procedia. 2018. V. 149. P. 161–169.

Influence of Thermal Air Pollution on the Urban Climate (Estimates Using the COSMO-CLM Model)

A. S. Ginzburg^{1,*} and S. A. Dokukin^{1,2}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russian Federation*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russian Federation*

*e-mail: gin@ifaran.ru

It is known that large cities and urban agglomerations not only make a decisive contribution to the growth of greenhouse gases in the atmosphere, but also significantly shape their own climate by transforming the underlying surface of urban areas, as well as thermal, gas and aerosol pollution of the urban boundary layer of the atmosphere. The most powerful manifestation of the city’s influence on local and regional climate processes is the thermal pollution of the atmosphere created by anthropogenic heat flows, which are formed primarily due to the energy consumption of the urban economy. This paper summarizes the results of the authors’ work within the framework of the RSCF project on numerical modeling of the influence of anthropogenic heat flows (thermal pollution of the urban atmosphere) on the climatic characteristics of urban agglomerations using the mesoscale climate model COSMO-CLM.

Keywords: urban climate, thermal pollution, heat island, mesoscale climate models