

Изменения климата и экстремальные явления погоды в Московской агломерации

А. В. Кислов*, Л. И. Алексеева*,

М. И. Варенцов*, **, ****, *****, П. И. Константинов*, ***

На основе данных приземных сетей и спутникового зондирования, а также по результатам моделирования климата с помощью моделей COSMO-CLM и ENVI-MET исследованы динамика городских островов тепла и влажности (сухости) воздуха и их 3D-структура для Московской агломерации. Получено, что остров тепла создается за счет антропогенного притока тепла к городской атмосфере и в некоторой степени представляет собой самоподдерживающуюся систему за счет обратной связи (обеспечивающей около 10% эффекта) между температурой и нисходящим потоком длинноволновой радиации. Результаты моделирования показали, что существует вращение воздушных потоков против часовой стрелки, при этом остров тепла и его циркуляционную систему логично считать продуктом самоорганизации, когда под влиянием множественного действия мелких (масштаба мезо-гамма) воздействий порождается система циркуляции масштаба мезо-бета. Вместе с островом тепла существует остров влажности (сухости) воздуха. Куполоподобная структура островов нарушается при устойчивых фоновых ветрах, заменяясь шлейфовой структурой. В межгодовой динамике отмечен тренд усиления острова тепла. Это определяет эффект ускорения потепления, связанного с глобальным потеплением, и усиления дискомфортных эффектов в городской среде Москвы. Интенсивные волны тепла (явившиеся в 1972, 2002 и 2010 гг. причиной катастрофических засух и природных пожаров в европейской части России) — важнейший фактор уязвимости экономики и городского населения Москвы, причем воздействие аномалий усиливается городской средой.

Ключевые слова: климат города, климат Москвы, остров тепла, остров влажности (сухости) воздуха, модель COSMO-CLM, моделирование климата, урбанистическое ускорение потепления.

1. Введение

Важным трендом современного развития цивилизации является сосредоточение населения в городских агломерациях [40]. Внутри города на не-

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет; e-mail: avkislov@mail.ru (Кислов Александр Викторович).

** Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

*** Центр смарт-технологий устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений, Российский университет дружбы народов.

**** Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр.

больших площадях, в условиях коренным образом преобразованных природных ландшафтов создается своеобразный урбанизированный микроклимат. Мозаичное действие возникающих локальных эффектов складывается, генерируя аномалии температуры, влажности воздуха, содержания газовых примесей и аэрозолей в масштабах всего города. Исторически они получили название “островов”: острова тепла (ОТ), острова влажности (сухости), острова загрязнений. Изучению климата Москвы в XX и XXI вв. было посвящено несколько монографий [12—14].

Особенностью климата Московской агломерации (и некоторых других) является то, что рост температуры здесь происходит быстрее и эффективнее проявляется в сопутствующих явлениях, чем на окружающих территориях. Это можно трактовать как урбанистическое усиление глобальных (региональных) изменений климата [29]. Аномалии городского метеорологического режима вместе с повышенным уровнем загрязнения приводят к снижению комфортности для населения. Причем рост дискомфорта из-за его комплексного характера происходит быстрее, чем потепление.

2. Исходные данные

Для изучения климатического режима Московской агломерации авторами были проанализированы данные сетевых станций (Метеорологической обсерватории Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ), станций Балчуг и ВДНХ), а также различных наблюдательных сетей, развернутых ФГБУ “Центральное УГМС”, аэропортами Московского аэроузла и ГПБУ “Мосэкомониторинг”. Такая комплексная информация доступна с 2014 г. При установке автоматических станций необходимые условия их расположения для обеспечения стандартного качества наблюдений не всегда выполнялись. Однако сравнение с данными сетевых метеостанций показало, что в совокупности они подходят для мониторинга и анализа метеорологических особенностей города, по крайней мере на уровне среднесуточных значений [12].

Изучение трехмерной структуры ОТ базировалось на данных спутникового зондирования (спутники “MetOp-A” и “MetOp-B”) с использованием спектро радиометра IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer). Подробное описание процедуры получения и отбора данных для анализа приведено в работе [7]. Эти исследования профилей метеорологических величин представляются полезными, поскольку, несмотря на осознаваемую важность проблемы изучения городской метеорологии и климатологии [36], данных измерений внутри городского пограничного слоя пока очень мало. При этом оценки вертикальной протяженности ОТ существенно различаются. Так, в Москве по данным микроволновых радиометров [15], а также на основе сопоставления метеорологических измерений на Останкинской телебашне и Метеорологической мачте (г. Обнинск) с данными радиозондирования (г. Долгопрудный) [17] определено, что влияние города сказывается приблизительно в нижнем полукилометровом слое атмосферы. Использование спутниковых данных [1, 9] расширило этот диапазон до полутора километров, причем иногда возмущения прослеживались и выше.

Возможно, эти различия в оценках связаны с тем, что спутниковые данные получены в малооблачных условиях (из-за особенностей методики), и

таким путем были автоматически отобраны случаи оптимального проявления свойств городской атмосферы. Здесь имеется в виду, что микро- и мезоклиматические различия наилучшим образом выявляются в малооблачную погоду в условиях, близких к штилевым, поскольку при этом радиационные потоки (солнечной радиации днем и длинноволновой ночью) формируют локальные особенности наиболее эффективно, а воздействие ветрового перемешивания, нивелирующего пространственные различия, минимально. Для количественной характеристики такого рода оптимальности может применяться или эмпирическая зависимость [32], или формула, вытекающая из анализа уравнения теплового баланса [8].

Урбанизированные области находятся под влиянием специфических черт климата и природной среды конкретного региона. Так, особенностью городской воздушной среды Лондона и Нью-Йорка является их регулярная вентиляция морскими воздушными массами. Пекин расположен в аридном районе, и в загрязнении его атмосферы важную роль играет пылевой аэрозоль.

Климатические риски городов зависят от сезонного хода и режима изменчивости метеорологических процессов данного региона. Так, Токио, Манила, Новый Орлеан и др. уязвимы с точки зрения воздействия тайфунов (ураганов), в то время как для Москвы и других крупных городов Европы важнейший фактор риска в современных климатических условиях — летние волны тепла [19, 20, 39]. В муссонных регионах (например, в Дели) население также уязвимо к интенсивным положительным аномалиям температуры, часто развивающимся здесь поздней весной, однако фактор риска не так велик, как в Европе, поскольку эти аномалии не могут существовать длительное время из-за обязательного наступления муссона. Отметим, что кроме географических факторов своеобразие климата городов с точки зрения уязвимости и рисков определяется и социально-экономическим статусом стран [39].

Помимо данных наблюдений в работе для исследования особенностей климата Московской агломерации использованы и результаты высокодетального численного моделирования, осуществленного с помощью климатической версии модели COSMO-CLM [26] с шагом сетки по горизонтали 1 км. Для описания особенностей городской поверхности в рамках модели COSMO-CLM использовалась полуэмпирическая параметризация TERRA_URB [41]. Описание методики моделирования, конфигурации численных экспериментов, баз данных параметров, необходимых для моделирования, дано в работах [3, 12, 33, 37, 38]. Успешный опыт климатического моделирования позволил применить данный подход при развитии системы численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России [21].

Для сверхдетальных расчетов использованы результаты моделирования с шагом 5 м по модели ENVI-MET, основанной на осредненных по Рейнольдсу негидростатических уравнениях Навье — Стокса [27].

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Динамика острова тепла Московской агломерации

Традиционно остров тепла характеризуют его интенсивностью — разностью значений температуры внутри города и в ближайшей его окрест-

ности. Для Москвы при расчете данного показателя в качестве городской взята станция Балчуг, расположенная в Замоскворечье, данные о температуре которой сопоставлялись со средними значениями температуры по девяти станциям: Наро-Фоминск, Серпухов, Коломна, Павловский Посад, Александров, Клин, Дмитров, Ново-Иерусалим, Малоярославец. Анализ данных подмосковных станций показал, что начиная с 1970-х годов температура в пригороде возрастала, а затем с конца 1990-х на протяжении примерно 20 лет тренд отсутствовал, что соответствовало известной паузе в глобальном потеплении. В это же время интенсивность ОТ увеличивалась, причем особенно заметен ее рост в летнее время: за период 1977—2016 гг. Москва нагревалась на 40% быстрее по сравнению со средними темпами роста температуры в пригороде. Различия скорости потепления климата усилились, когда интенсификация ОТ ускорилась, а скорость фоновое потепления климата, напротив, замедлилась. Так, в период 1988—2016 гг. Москва нагревалась почти в два раза быстрее фоновых территорий. Этот эффект был обозначен как ускорение в Московской агломерации темпов глобального потепления [12, 29].

Интенсивность ОТ увеличивалась в те годы, когда наблюдались положительные аномалии температуры в летний период, связанные, как правило, с установлением блокирующих антициклонов, приводящим к блокированию осадкоформирующих циркуляционных систем, малооблачной погоде (способствующей радиационному прогреву) и, как правило, к адвекции тепла. Последний из перечисленных процессов особенно заметен, если “выше по течению” уже сформировалась засуха и атмосфера прогрелась до аномальных значений [4]. Вместе с этим влагосодержание почвы в самом регионе определяет уровень формирующейся аномалии [10].

Наиболее яркий пример — лето 2010 г. Отметим, что в этот период длительное преобладание антициклонической циркуляции над европейской частью России осуществлялось не единым, длительное время существующим вихрем: после его возникновения в начале июля 2010 г. пять раз происходила регенерация, осуществляемая благодаря приходу из разных регио-

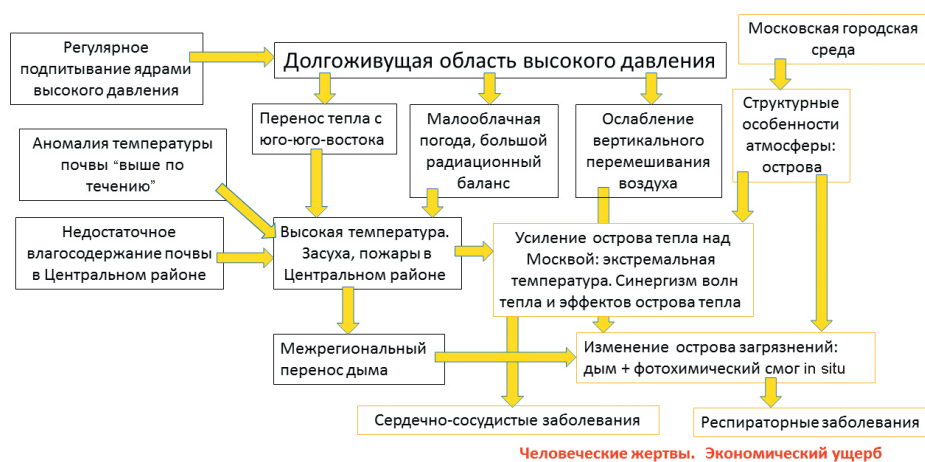


Рис. 1. Схема уязвимости городского населения и экономики Москвы к волнам тепла.

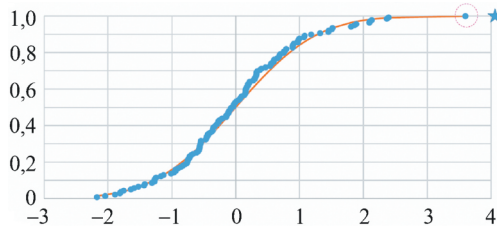


Рис. 2. Интегральная функция распределения повторяемости аномалий температуры в июле (нормированный и центрированный ряд) для пикселя, включающего Московскую агломерацию (по данным архива NOAA), и ее аппроксимация функцией Гаусса.

Звездочкой показана повторяемость аномалии 2010 г. по данным сверхдлинного ряда наблюдений в Москве [16].

соответствует отклонению 3,5 (σ — среднеквадратическое отклонение), что подчеркивает ее уникальный характер для Восточно-Европейской равнины. Однако на основе данных о температуре в Москве (с 1780 г.) отклонение температуры летом 2010 г. оказалось еще больше, немного превысив 4 [16]. Появлению в 2010 г. сверхбольшой аномалии температуры, превзошедшей аналогичные события, наблюдавшиеся в прошлом (например, в 1972 г.), способствовало и фоновое потепление климата.

Длительно наблюдающиеся высокие значения температуры (превосходящие важные с точки зрения медицинских показателей пороговые значения) в сочетании с повышенным загрязнением атмосферы (возникающим из-за горения лесов и торфяных болот, а также фотохимического смога) увеличивают дискомфорт, причем особенно в крупных агломерациях (таких как Московская), приводя к болезням, повышению смертности и экономическим потерям (рис. 1). Летом 2010 г. смертность населения увеличилась в пределах всех регионов России, охваченных аномальной жарой, но максимальный прирост (60% относительно показателей 2009 г.) наблюдался в Москве [19, 34].

3.2. Структура острова тепла (и других островов) Московской агломерации

Если оконтурить остров тепла изотермой 1 °C в поле средних летних или средних зимних значений температуры, то характерный радиус теплового пятна (напоминающего эллипс, вытянутый в направлении с северо-запада на юго-восток) равен ~15—20 км [12], что фактически соответствует той части Москвы, которая находится внутри кольцевой автомагистрали МКАД. Такая структура связана с тем, что Новая Москва пока еще вносит небольшой вклад в моноцентрическую структуру термического режима. Если взять изотерму 0,5 °C, то линейные размеры ОТ увеличиваются вдвое. Аномалия среднесуточной температуры 2 °C и более характерна для центральной, наиболее плотно застроенной части города внутри третьего транспортного кольца. В ясные и безветренные ночи контрасты темпера-

нов ядер высокого давления [22]. Схема развития процесса и возникающие сопутствующие явления показаны на рис. 1.

Уникальность лета 2010 г. подтверждают результаты статистического анализа. На рис. 2 представлена интегральная функция распределения повторяемости аномалий температуры, построенная по данным архива NOAA [28] за 1880—2018 гг. для пикселя, включающего Московский регион. Ее наилучшей аппроксимацией является функция нормального распределения, причем аномалия 2010 г.

туры многократно усиливаются, различия температуры “город — фон” могут достигать 10°C и более.

Результаты моделирования с помощью как достаточно простых моделей [11], так и более сложных [12, 38] воспроизводят аномалии метеорологических величин, горизонтальный размер которых в нижних слоях характеризуется средним радиусом ~40 км. С высотой область сужается, на высоте ~500 м радиус равен приблизительно 30 км. Налицо ситуация, когда размеры ОТ превышают размеры компактной застройки города.

Следует отметить, что данная структура имеет место при слабых фоновых ветрах. При устойчивом потоке воздуха остров тепла смещается по направлению ветра и формируется так называемый тепловой шлейф, простирающийся на несколько десятков километров [12].

За образование острова тепла ответственны специфические теплофизические свойства городской среды, определяющие особенности теплового баланса. Имеется в виду, что затраты тепла на испарение в городе существенно снижены по сравнению с пригородом, поскольку выпавшие осадки быстро удаляются за счет системы ливневой канализации, и радиационное тепло идет на прогревание воздуха городской среды. Роль последнего эффекта проявляется в том, что остров тепла формируется и в грунте под городом [12]. Важную роль играет и собственное выделение тепла (антропогенное тепло), особенно значительное в холодный период года. Согласно литературным данным, среднегодовой поток антропогенного тепла для Москвы составляет 75 Вт/м^2 [5, 24, 35]. При моделировании московского климата в модели COSMO-CLM поток был задан изменяющимся от 128 Вт/м^2 зимой до 21 Вт/м^2 летом согласно типичному годовому ходу [24]. Эти величины взвешивались на показатель плотности и этажности городской застройки, и в результате для центра города оценка антропогенного потока тепла превышала среднее по городу значение более чем 2 раза и достигала 250 Вт/м^2 зимой и 35 Вт/м^2 летом [12].

Еще одна особенность теплового баланса в Москве — это наблюдавшийся в последние десятилетия рост нисходящего потока длинноволновой радиации (F), проявившийся в итоге в возрастании с 1970-х годов до нашего времени величины годового радиационного баланса приблизительно на 10 Вт/м^2 [6, 12]. Особенно велик прирост притока радиации в зимнее время, в то время как летом эта величина близка к нулю. Данный эффект можно трактовать как обратную связь, когда остров тепла, возникнув за счет дополнительных притоков тепла, сам способствует нагреванию городской среды, усиливая встречное излучение атмосферы. Действительно, используя известную формулу Брента для расчета нисходящего потока длинноволновой радиации, получим, что его приращение (F) связано с аномалией температуры (T) соотношением

$$F \sim 4 \cdot T^3 (D + G\sqrt{e})(1 + Cn),$$

в котором — постоянная Стефана; $D = 0,61$; $G = 0,05$; облачный коэффициент $C = 0,76$. Принимая парциальное давление водяного пара $e = 6 \text{ гПа}$, $n = 0,5$ и $T = 2 \text{ К}$, получим оценку $F = 9,5 \text{ Вт/м}^2$. Это находится в хорошем соответствии с приведенным выше эмпирическим фактом, основанным на данных наблюдений. Таким образом, можно считать, что гипотеза о том, что встречное излучение усилилось за счет ОТ, подтверждается.

Отметим, однако, что обратная связь не способна заменить антропогенный приток тепла, который на порядок больше (см. выше).

Городская аномалия влажности воздуха может также трактоваться как остров, хотя изолинии можно провести далеко не всегда, учитывая погрешности измерений. С точки зрения относительной влажности всегда имеет место остров сухости — это естественная реакция на положительную аномалию температуры. Влияние города на удельную влажность имеет более сложный характер — знак аномалии в этом случае изменяется в зависимости от времени суток, сезона года и локальных условий. Так, анализ профилей удельной влажности, восстановленных по спутниковым данным за 2015—2017 гг., продемонстрировал, что во все месяцы теплого периода в дневное время до высоты 800—1300 м над Москвой наблюдался остров сухости, наиболее ярко проявившийся в сентябре (среднемесячные разности “город – пригород” составили 0,61 г/кг на высоте 150 м) [1]. В вечерние часы он был выражен гораздо слабее и распространялся до высоты ~500 м. Значительно лучше в это время выражен высотный остров влажности: в среднем для месяцев теплого периода он наблюдался в слое 1000—2750 м с максимальными значениями удельной влажности ~0,2—0,3 г/кг. По-видимому, это является следствием не прерываемого в вечернее и даже в ночное время вертикального перемешивания в городской атмосфере, а также накопления водяного пара под слоем приподнятых инверсий [7]. В месяцы холодного сезона профили удельной влажности совершенно иные: разности удельной влажности “город – пригород” малы, а в распределении среднемесячных значений не наблюдается сходства. Хотя для некоторых месяцев в нижних частях профилей отмечается наличие острова влажности, низкая статистическая достоверность полученных разностей не позволяет на основании имеющейся информации сделать выводы о влиянии Москвы на вертикальное распределение удельной влажности в холодный период.

Распределение загрязнения атмосферы имеет также форму локализованных пятен, привязанных к городской территории, в виде купола или шлейфа. Данная структура нарушается при вторжении извне — для Москвы это случаи 1972, 2002 и 2010 гг., когда поступление дыма от горящих лесов и торфяных болот резко изменяло упорядоченную структуру. Причем имеется в виду не только перенос тех или иных ингредиентов, но и появление веществ, в частности озона, за счет протекающих *in situ* в загрязненном воздухе фотохимических реакций [2] (см. рис. 1).

3.3. Циркуляционная система городского острова тепла

В условиях хорошо выраженного острова тепла (и в случае слабых фоновых ветров) между центральной частью города и пригородом возникает барический градиент, определяющий преимущественное движение воздуха к центру. Воздух от периферии стекается к центру города с подъемом и дальнейшим растеканием на высоте более 1 км (рис. 3). Можно считать это проявлением своеобразного бризового эффекта, выраженного наиболее ярко в вечерние часы. Однако настоящего бриза, когда ветер изменяет направление два раза в сутки, в городских условиях не бывает, потому что остров тепла не заменяется в суточном ходе на остров холода. Такое же

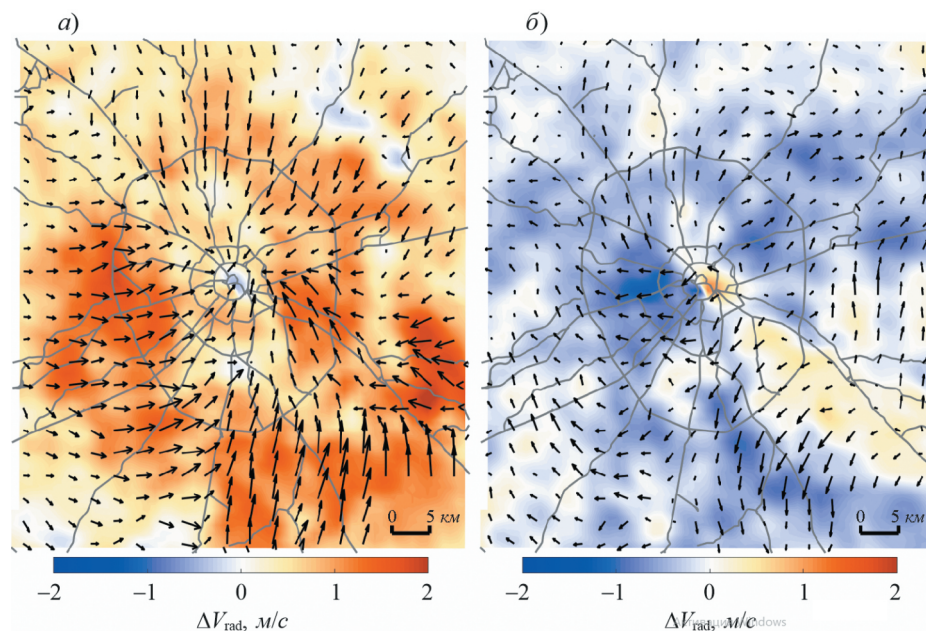


Рис. 3. Распределение скорости ветра (отклонение от фоновых значений) на уровнях 120 м (а) и 1700 м (б) (4-й и 16-й уровни вертикальной сетки модели COSMO-CLM) для выборок вечерних сроков (18—19 ч московского времени) со слабым фоновым ветром в дни с хорошо выраженным островом тепла (лето 2014 г.).

явление отмечается и в других крупных агломерациях, например в Париже [30, 32]. По данным расчетов по модели COSMO-CLM, радиальная составляющая скорости в среднем равна примерно 0,4—0,6 м/с. Интересной особенностью является получившееся в численном эксперименте вращение против часовой стрелки конвергирующего воздуха над городом в вечерние и ночные часы (рис. 3). Это означает, прежде всего, что образуется единая циркуляционная система городской атмосферы, существование которой связано, по-видимому, с островом тепла.

Для того чтобы выявить причинно-следственную связь, определим индуцируемую термической структурой завихренность (ζ) [18, 23]. Учитывая квазиосесимметричную куполообразную структуру ОТ, будем записывать уравнения гидродинамики в так называемой естественной (натуральной) системе координат с осями, направленными параллельно линии тока (s) и перпендикулярно к ней (n). Не учитывая силу трения (считая экмановские движения фоновыми), для модуля скорости $V = ds/dt$ получим следующую систему уравнений [25]:

$$\frac{dV}{dt} = g \frac{H}{s}, \quad \frac{V^2}{R} = fV + g \frac{H}{n}. \quad (1)$$

Причем в случае движения вдоль геопотенциальных поверхностей ($H = \text{const}$) остается только второе уравнение. В данной системе координат $\frac{V}{n} = \frac{V}{R}$. Рассмотрим разность высот двух изобарических поверхностей, расположенных в нижней части пограничного слоя (H) и у его

верхней границы (H_1): $H = H_1 - h$. Дважды продифференцируем данное выражение по n и умножим на g/f . Теперь, сопоставляя его с вторым выражением в системе (1), получим

$$= \frac{Rg}{Rf} \frac{^2h}{2V n^2} \frac{V}{R}. \quad (2)$$

В это выражение не включен член $\frac{g}{f} \frac{^2H_1}{n^2}$, представляющий собой компонент геострофической завихренности в свободной атмосфере (по порядку величины $\sim 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), которая, как будет показано далее, существенно меньше той, что существует в городской циркуляционной системе и для рассматриваемого масштаба движений может рассматриваться как фоновая.

Эллиптический оператор функции h , обращающейся в нуль на границах области, может быть оценен как $\frac{^2h}{n^2} \sim \frac{h}{R^2}$, где h — разность высот относительного геопотенциала в центре города и на его периферии. Следовательно,

$$\frac{1}{R} \frac{g}{Rf} \frac{h}{2V} \frac{V}{R}. \quad (3)$$

Из уравнения статики получаем

$$h = \frac{(\Gamma)}{g} \ln \frac{P_0}{P_1}.$$

Здесь Γ — газовая постоянная для воздуха; P_0 и P_1 — атмосферное давление в нижней части пограничного слоя и выше его верхней границы. Примем, что $P_0/P_1 = 1,1$; больших ошибок из-за этого достаточно произвольного определения не произойдет, потому что от отношения вычисляется логарифм. Задавая усредненную по высоте среднюю разность между городом и пригородом $\langle T \rangle = 0,4 \text{ С}$ [1], получаем $h \sim 1 \text{ м}$. Таким образом, из формулы (3) $\sim 10^{-4} \text{ 1/с}$, так что завихренность получается положительной, характеризуя вращение против часовой стрелки и совпадая по порядку величины с величиной параметра Кориолиса. Она существенно (на порядок) превосходит типичные значения завихренности синоптического масштаба. Значение входящего в формулу для компонента завихренности $V/R \sim 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$ получилось в пять раз меньше. Так что главные особенности вихревого движения воздуха в острове тепла определяются величиной сдвиговой завихренности и в меньшей степени зависят от кривизны течения.

В верхней части пограничного слоя кинематическим откликом на рассматриваемую куполообразную структуру поля геопотенциала будет циркуляция по часовой стрелке, сопровождаемая растеканием.

Это движение воздуха, инициируемое теплым ядром городской атмосферы, можно интерпретировать как вторичную циркуляцию масштаба мезо-бета, которая оказывает влияние на сам остров тепла. Поэтому ОТ представляет собой (по крайней мере в некоторой степени) продукт самоорганизации, когда мезо-гамма-процессы (связанные в том числе с обтека-

нием отдельных зданий и их термическим воздействием на движение воздуха) способны усиливать крупномасштабную вихревую структуру и поддерживать ее существование (см. [31]).

Явно воспроизвести мезо-гамма-масштабные особенности в рамках мезомасштабных моделей (COSMO-CLM, WRF и др.) невозможно из-за того, что их пространственное разрешение недостаточно (шаг по горизонтали даже в задачах оперативной синоптики не превышает $\sim 0,5$ км [21]). Однако на решение данной задачи можно выйти, используя гидродинамическую модель нужного разрешения, которая использует выходные данные более грубой модели или непосредственно данные измерений метеорологических переменных.

Для иллюстрации такой возможности рассмотрим пример моделирования в рамках модели ENVI-MET. С ее помощью осуществлена детализация поля скорости ветра в районе парка “Дубки” (Тимирязевский район Москвы). В ходе экспериментов моделировалась ситуация 29 мая 2017 г., когда на территории города наблюдалось усиление ветра до штормовых значений. В рассматриваемом районе скорость набегающего на препятствие (жилые пятиэтажные дома) западного ветра составляла ~ 15 м/с (по данным метеостанции ТСХА), однако в сужении городского рельефа в модельной циркуляции достигались порывы, превышающие 25 м/с (рис. 4).

В перспективе можно применять подобную иерархическую систему моделирования для обеспечения прогноза особенно опасных явлений погоды на масштабах десятков метров внутри городской среды.

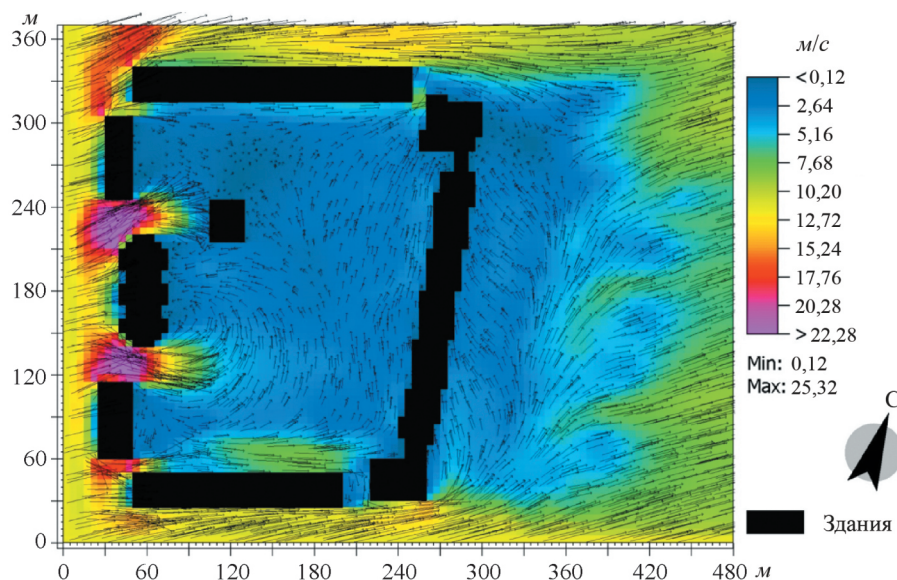


Рис. 4. Порывы скорости ветра 29 мая 2017 г. вокруг зданий, расположенных в районе парка “Дубки” (Тимирязевский район Москвы), по данным расчетов по модели ENVI-MET.

Здания показаны в плане черным цветом. Диапазон скорости в цветовой гамме составляет от 0,1 до 25 м/с.

4. Заключение

Остров тепла Московской агломерации существует за счет перестройки теплового баланса и постоянных антропогенных выбросов тепла. Вместе с ОТ существует остров влажности (сухости) воздуха. Структура островов куполоподобная при слабых ветрах и шлейфовая при наличии устойчивого переноса воздуха. На основе моделирования показано, что воздух в ОТ вращается против часовой стрелки, сходясь к центру вихря. В верхней части происходит растекание воздуха в антициклоническом вращении. Остров тепла логично считать продуктом самоорганизации, когда под влиянием множественного действия мелких (масштаба мезо-гамма) термодинамических воздействий городской среды порождается обладающая внутренним единством циркуляционная система (масштаба мезо-бета), размеры которой превышают территорию компактной застройки города.

Остров тепла представляет собой в некоторой степени самоподдерживающуюся систему за счет обратной связи (обеспечивающей около 10% эффекта) между температурой и нисходящим потоком длинноволновой радиации.

В межгодовой динамике отмечен четкий тренд усиления ОТ. Это определяет эффект ускорения потепления климата и усиления дискомфортных эффектов в городской среде Москвы, связанных с глобальным потеплением.

Интенсивные волны тепла (1972, 2002 и 2010 гг.), которые были причиной катастрофических засух и природных пожаров в европейской части России, являются важнейшим фактором уязвимости экономики и городского населения Москвы за счет того, что воздействие аномалий усиливается городской средой.

Авторы выражают благодарность С. С. Букину за содействие в проведении экспериментов с моделью ENVI-MET.

Работа выполнена за счет финансирования госбюджетной темы АААА-А16-116032810086-4. Исследование частично (работа П. И. Константинова по части экспериментов с моделью ENVI-MET) выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-30012). Анализ пространственной структуры острова тепла по данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» выполнен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Москвы (проекты № 19-35-70009, № 18-35-20052).

Расчеты проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова.

Литература

1. Алексеева Л. И., Горлач И. А., Кислов А. В. Вертикальная структура и сезонные особенности острова тепла и распределения влажности над Москвой по спутниковым данным. — Метеорология и гидрология, 2019, № 8, с. 107—118.
2. Беликов И. Б., Горбаренко Е. В., Еремина И. Д., Константинов П. И., Локощенко М. А., Незваль Е. И., Чубарова Н. Е., Шиловцева О. А., Шумский Р. А. Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2010 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ. /Под ред. Н. Е. Чубаровой. — М., МАКС Пресс, 2011, 180 с.
3. Варенцов М. И., Самсонов Т. Е., Кислов А. В., Константинов П. И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM. — Вестник Московского ун-та. Серия 5: География, 2017, № 6, с. 25—37.
4. Володин Е. М. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры. /В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. Под ред. Н. П. Шакиной. — М., ТРИАДА ЛТД, 2011, с. 48—57.
5. Гинзбург А. С., Белова И. Н., Расплетина Н. В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях. — Доклады АН, 2011, т. 439, с. 256—259.
6. Горбаренко Е. В. Эмпирическая модель изменчивости компонентов радиационного баланса подстилающей поверхности. — Вестник Московского ун-та. Серия 5: География, 2020, № 2, с. 23—35.
7. Горлач И. А., Кислов А. В., Алексеева Л. И. Опыт исследования вертикальной структуры городского острова тепла на основе спутниковых данных. — Исследование Земли из космоса, 2017, № 4, с. 37—46.
8. Кислов А. В. Климатология. — М., Академия, 2013, 223 с.
9. Кислов А. В., Варенцов М. И., Горлач И. А., Алексеева Л. И. “Остров тепла” Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления. — Вестник Московского ун-та. Серия 5: География, 2017, № 4, с. 12—19.
10. Кислов А. В., Варенцов М. И., Тарасова Л. Л. Роль весенней влажности почвы в формировании крупномасштабных засух Восточно-Европейской равнины 2002 и 2010 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 4, с. 464—471.
11. Кислов А. В., Константинов П. И. Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса. — Метеорология и гидрология, 2011, № 5, с. 25—32.
12. Климат Москвы в условиях глобального потепления. /Под ред. А. В. Кислова. — М., Изд-во МГУ, 2017, 288 с.
13. Климат Москвы (особенности климата большого города). /Под ред. А. А. Дмитриева, Н. П. Бессонова. — Л., Гидрометеиздат, 1969, 324 с.
14. Климат, погода, экология Москвы. /Под ред. Ф. Я. Клинова. — СПб, Гидрометеиздат, 1995, 435 с.
15. Кузнецова И. Н., Нахаев М. И. Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры. /В кн.: 80 лет Гидрометцентру России. Под ред. Р. М. Вильфанда. — М., ТРИАДА ЛТД, 2010, с. 389—400.
16. Локощенко М. А. Катастрофическая жара 2010 года в Москве по данным наземных метеорологических измерений. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, т. 48, № 5, с. 523—536.
17. Локощенко М. А., Корнева И. А., Кочин А. В., Дубовецкий А. З., Новицкий М. А., Разин П. Е. О высотной протяженности городского “острова тепла” над Москвой. — Доклады АН, 2016, т. 466, № 2, с. 213—217.
18. Нигматулин Р. И., Соловьев А. А. Физическая гидромеханика. — М., ГЭОТАР, 2005, 512 с.
19. Ревич Б. А. Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки. — Экология человека, 2011, т. 88, № 7, с. 3—9.
20. Ревич Б. А., Малеев В. В., Смирнова М. Д. Изменение климата и здоровье: оценка, индикаторы, прогнозы. — М., ИНП РАН, 2019, 196 с.

21. Ривин Г. С., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Розинкина И. А., Тудрий К. О., Блинов Д. Б., Варенцов М. И., Самсонов Т. Е., Бундель А. Ю., Кирсанов А. А., Захарченко Д. И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа. — Метеорология и гидрология, 2019, № 11, с. 33—45.
22. Семенов Е. К., Соколихина Н. Н., Тудрий К. О. К вопросу о регенерации субтропического антициклона как фактора его дальнейшей стабилизации (на примере лета 2010 г.). — Метеорология и гидрология, 2012, № 10, с. 5—15.
23. Сэффмэн Ф. Дж. Динамика вихрей. — М., Научный мир, 2000, 376 с.
24. Flanner M. G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. — *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, No. 2, pp. 1—5.
25. Holton J. R. and Hakim G. J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Fifth ed. — Amsterdam, 2013, 532 p.
26. <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom/clm-community-home-92864627.html>.
27. <https://www.envi-met.com/>.
28. <https://www.ncdc.noaa.gov>.
29. Kislov A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T., Gorlach I., and Trusilova K. Urban amplification of the global warming in Moscow megacity. — *EGU General Assembly Geophys. Res. Abstr.*, 2015, vol. 17, EGU2015-5620.
30. Lemonsu A. and Masson V. Simulation of a summer urban breeze over Paris. — *Boundary-Layer Meteorol.*, 2002, vol. 104, pp. 463—490; doi: 10.1023/A:1016509614936.
31. Levina G. On the path from the turbulent vortex dynamo theory to diagnosis of tropical cyclogenesis. — *Open J. Fluid Dynamics*, 2018, vol. 8, pp. 86—114; <https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.81008>.
32. Oke T. R., Mills G., Christen A., and Voogt J. A. *Urban Climates*. — Cambridge University Press, 2017, 542 p.
33. Samsonov T. E., Konstantinov P. I., and Varentsov M. I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. — *Urban Climate*, 2015, vol. 13, pp. 122—139.
34. Shaposhnikov D., Revich B., Bellander T., Bedada G. B., Bottai M., Kharkova T., Kvasha E., Lezina E., Lind T., Semutnikova E., and Pershagen G. Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. — *Epidemiology*, 2014, vol. 25, No. 3, pp. 359—364.
35. Stewart I. D. and Kennedy C. A. Metabolic heat production by human and animal populations in cities. — *Int. J. Biometeorol.*, 2017, vol. 61, No. 7, pp. 1159—1171.
36. Towards Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services; <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/towards-integrated-urban-weather-environment-and-climate-services>.
37. Varentsov M. I., Konstantinov P. I., and Samsonov T. E. Mesoscale modelling of the summer climate response of Moscow metropolitan area to urban expansion. — *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2017, vol. 96, p. 12009.
38. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., and Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. — *Atmosphere*, 2018, vol. 9, No. 2; <https://doi.org/10.3390/atmos9020050>.
39. Wilby R. L. *Climate Change in Practice*. — Cambridge University Press, 2017, 381 p.
40. World Urbanization Prospects. The 2009 Revision Report. — New York, United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2009, 47 p.
41. Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., and Lipzig N. P. M. van. 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, vol. 9, No. 9, pp. 3027—3054.