

УДК 911.9

А.В. Кислов¹, М.И. Варенцов², И.А. Горлач³, Л.И. Алексеева⁴**«ОСТРОВ ТЕПЛА» МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ И УРБАНИСТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ**

Изменения климата создаются глобальными изменениями концентраций парниковых газов и аэрозолей, а также региональными изменениями циркуляции атмосферы. Внутри большой урбанизированной области микроклиматические изменения (особенно проявляющиеся в форме нагревания) усиливаются за счет влияния сильно модифицированных свойств поверхности. Это означает формирование урбанистического усиления глобального потепления. Различия между метеорологическими особенностями городской территории и внегородских районов характеризуются понятием «островов». Это так называемый городской остров тепла/холода и городской остров повышенной сухости/влажности в случае наличия на урбанизированной территории избытка или недостатка влаги. Цель статьи в исследовании изменений климата московской агломерации, включая изменения структуры городских островов. Данные метеорологических наблюдений в московской агломерации и на окружающих территориях позволяют оценить урбанистически обусловленный компонент потепления и отделить его от потепления климата, развивающегося над всей центральной частью Восточно-Европейской равнины. Интенсивность острова тепла, характеризуемая данными приземных наблюдений, усилилась в последние 15 лет несмотря на паузу в глобальном потеплении. Чтобы получить наиболее надежные данные по структуре городских островов, мы использовали вместе с данными наземных наблюдений спутниковые данные (МЕТОР-А and МЕТОР-В), позволившие получить профили температуры и влажности воздуха с горизонтальным разрешением 25x25 км². Обнаружено, что по вертикали острова прослеживаются до ~2 км. В летнее время нижняя часть острова тепла представляет собой остров сухости, в то время как верхняя часть острова тепла соответствует острову влажности. Зимой в нижней части острова тепла выделяется остров влажности.

Ключевые слова: «острова тепла», московская агломерация, глобальное потепление, урбанистическое усиление потепления климата.

Введение. Как известно, важным трендом современного развития цивилизации является сосредоточение населения в городских агломерациях [World ..., 2009]. Здесь, на небольших площадях, в условиях коренным образом преобразованных природных ландшафтов, создается своеобразный урбанизированный микроклимат [Город ..., 2007; Ландсберг, 1983; Щербаков, 1987; Оке, 1987]. Статья посвящена анализу некоторых аспектов данного эффекта в крупнейшей агломерации России – московской агломерации.

Особенности метеорологического режима Москвы были подробно рассмотрены в ряде работ [Локощенко с соавт., 2016; Чубарова с соавт., 2014; Lokoshchenko, 2014], в которых главное внимание традиционно уделено термической структуре приземного слоя. Однако влияние городской среды на атмосферу трехмерно, поскольку оно формирует своеобразный пограничный слой городской атмосферы [Курбачкая, Курбачкий, 2015; Martilli et al., 2002]. В условиях развитой конвекции (днем) он охватывает более мощный слой нижней тропосферы по сравнению с пригородами. Его верхняя часть сдвигается по направлению преобладающих атмо-

ферных течений на окружающие город территории, и там происходит наложение городского воздуха на воздух пригородной зоны, часто выраженное изотермическим или даже инверсионным распределением температуры в средней части этого комплексного пограничного слоя. В условиях устойчивой стратификации, особенно в ночное время, городская атмосфера отличается тем, что приземные радиационные инверсии выхолаживания в городе далеко не так выражены, как на приграничных территориях, что также создает характерные пространственные различия. Если принять во внимание особенности подстилающей поверхности каждого конкретного города, то описанная выше структура еще более усложняется.

Специфичность термической структуры городской атмосферы традиционно характеризуют, используя введенное еще в начале XIX века понятие «острова тепла» (ОТ). Как уже было отмечено, подавляющее большинство работ, направленное на исследование его пространственно-временной структуры и мониторинг, основано на данных стандартных или специальных наблюдений у земной поверхности. И лишь в нескольких работах приводят-

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, аспирант, e-mail: mvar91@gmail.com

³ ФГБУ «Гидрометцентр России», вед. науч. с., канд. геогр. н., e-mail: ia_gorlach@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, ст. науч. с., канд. геогр. н., e-mail: garira2005@yandex.ru

ся данные о вертикальной структуре ОТ. Так, в работе М.А. Локощенко с соавт., [2016] для характеристики термического режима городской атмосферы привлечены данные аэрологического зондирования и данные измерений на высотных мачтах. В других работах [Кадыгров с соавт., 2002; Кузнецова, Нахаев, 2010] использованы данные микроволновых профиломеров, а в работах [Bornstein, 1968; Duckworth, Sandberg, 1954] приведена информация, полученная на основе аэростатных данных.

В еще более редких случаях исследуется распределение влажности воздуха по высоте. Большинство данных говорит о том, что в городе воздух обычно более сухой, чем за его пределами [Ландсберг, 1983]. Это явление часто называют «городским островом сухости», и, как показали исследования, чаще всего оно наблюдается летом в дневное время суток. Помимо недостатка испарения с бетонных и асфальтовых покрытий, формирование «острова сухости» в это время связано с более развитой конвекцией, в процессе которой водяной пар выносится в вышележащие слои, поэтому влагосодержание в приземном слое городского воздуха уменьшается. Однако в ночное время суток летом влагосодержание воздуха в городе может возрастать, что также связано с явлением ОТ: поскольку приземные температуры в городе реже достигают точки росы, водяной пар не конденсируется, не осаждается на поверхности, то есть не удаляется из атмосферы. Эта аномалия получила название «городского острова влажности» [Ужегова с соавт., 2011; Kuttler et al., 2007]. Увеличению влагосодержания воздуха способствуют и техногенные выбросы водяного пара. Это пар, выбрасываемый теплоэлектростанциями, а также приток водяного пара в результате сжигания природного газа, мазута, бензина и других видов органического топлива. Проведенные для Москвы расчеты показали, что количество влаги, поступающее за год в результате сжигания природного газа и приведенное к площади города, примерно в 12–15 раз меньше среднегогодового слоя осадков, выпадающих в Москве [Город ..., 2007].

Данных наблюдений о распределении температуры и влажности с высотой в пограничном слое городской атмосферы очень мало. Это делает актуальным развитие методики вертикального зондирования. В данной работе изложен такой подход, базирующийся на спутниковых данных.

Вторая проблема, которая рассмотрена в статье, это вопрос о том, как проявляются в городской среде изменения климата. Современный климат характеризуется глобальным потеплением [Второй ..., 2014; IPCC, 2013]. В ряде работ уже было показано, что на урбанизированных территориях имеет место усиление потепления [Kislov et al., 2015]. Здесь эти результаты изложены более подробно.

Материал и методы исследований. Для исследования пространственных аномалий температуры в московской агломерации были использованы ре-

зультаты стандартных измерений сети Росгидромета, из которых данные восьми станций (Малоярославец, Серпухов, Коломна, Павловский Посад, Александров, Клин, Ново-Иерусалим, Наро-Фоминск) взяты в качестве фоновых для характеристики Подмоскovie.

Для получения профилей температуры и влажности воздуха был использован продукт измерений и расчетов, осуществляемых на основе зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне полярно-орбитальной системой искусственных спутников Земли МЕТОР (МЕТОР-А и МЕТОР-В). Оно производится Фурье-спектрометром европейского космического агентства, а именно, интерферометром IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [Aires et al., 2002]. Этот прибор обеспечивает высокое спектральное разрешение (измеряется информация в 8461 каналах с дискретностью $0,02\text{--}0,5\text{ см}^{-1}$), однако для быстрой обработки и своевременной доставки данных потребителям информация сжимается и передается в сокращенном до 300 каналов виде. В силу известной математической некорректности задач обработки дистанционных измерений, в данном случае спектров уходящей радиации при обработке требуется проведение расчета спектров с помощью эталонных «Line-by-Line» моделей переноса ИК-радиации в атмосфере, представленных в базах HITRAN и GEISA [Колокутин, Фомин, 2014]. Поскольку облака нижнего яруса вносят большие хаотические погрешности в профили ИК-радиации, ситуации мощной и сплошной облачности (диагностированные специальным радиометром) отбраковывались. Наконец, важным этапом обработки явилось сопоставление модельных спутниковых данных и данных расчетов численной прогностической модели (модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды) и получение на этой основе совместного продукта.

Заявленная разработчиками точность измерений температуры (мгновенных значений) составляет $0,5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для удельной влажности относительная погрешность примерно равна 10%. Горизонтальное разрешение в надир равняется 25 км. Более подробно методика изложена в работе [Горлач с соавт., 2017].

Отбор данных для целей исследования урбанизированных территорий происходил так, чтобы охарактеризовать центральную часть города и окружающую зону. Так, для московской агломерации отбирались данные в зоне ~ 80 км, окружающие центральную 25-километровую, то есть собственно урбанистическую область. Следует отметить, что на каждом витке спутниковые данные попадали не в одни и те же «точки» земной поверхности. Поэтому при осреднении данных неявно происходило усреднение информации по площади региона. Кроме этого, при каждом витке спутниковые измерения внутри выбранной территории осуществлялись несколько в разное время. Поэтому при сопоставлении таких данных происходило усреднение и по времени внутри интервалов 19:30–23:30 и 10:00–13:00 часов все-

мирного времени, названных «вечер» и «утро» соответственно (последний диапазон логичнее было бы обозначить как «предполуденный»).

Профили температуры и влажности, изначально представленные как функция давления с шагом ~ 25 гПа, приводились (с помощью процедуры кубического сплайна, с учетом давления у поверхности) к одинаковым высотам с шагом 150–300 м в диапазоне от 10 до 3000 м. После осреднения на их основе производились расчеты разностей город–пригород.

Результаты исследований и их обсуждение.

Рассмотрим результаты температурно-влажностного вертикального зондирования атмосферы применительно к задаче диагностики интенсивности ОТ в Москве. Профили температуры (влажности) получаются благодаря синтезу: (1) рассчитанных температур $T = T(z)$ по радиационной модели на основе измерений, и (2) независимо рассчитанного прогностического профиля $T = T(z)$ по модели Европейского центра среднесрочных прогнозов. Как было отмечено, естественная нестабильность орбиты порождает проблему отбора данных, попадающих внутрь контура московской агломерации при разных витках спутников. Однако для Москвы соотношение разрешающей способности спутниковых данных и размеров агломерации позволяет формализовать процедуру отбора ситуаций, то есть выделить те, которые относятся к Подмосквовью и те, которые попадают внутрь выбранного городского контура (рис. 1).

Были предприняты попытки применить данный подход к анализу термической структуры других крупных городов России. Однако во всех случаях

возникли проблемы с отбором спутниковых данных, попадающих внутрь городского контура. Так, города Казань, Екатеринбург и др., имеют для рассматриваемой дискретности спутниковых данных слишком малые размеры. Кроме того, строение таких городов, как Санкт-Петербург, Саратов, Казань и др., несимметрично, что затрудняет однозначное отнесение спутниковой информации именно к урбанизированной территории. В названных случаях (и в других) к эффектам сложной конфигурации добавляется влияние рельефа как внутри города, так и вне его, а также наличия широких рек, озер или морских заливов. Поэтому процедура отбора становится чересчур сложной и попадание спутниковых измерений в урбанизированную зону не было гарантировано. Только Москва – огромный город, расположенный на сравнительно ровной и однородной поверхности, может быть изучен рассматриваемым методом.

Изначально все «внемосковские» данные были сгруппированы по четырем направлениям горизонта относительно центра города, затем все аномалии усреднялись и исследовалась величина городского ОТ по отношению именно к такому осредненному пригороду.

В летний период положительные аномалии прослеживаются от 150 до ~ 2000 м (рис. 2, А). Проверка на статистическую значимость разности средних значений температуры ΔT (выполненная на основе критерия Стьюдента) показала, что значимые положительные величины ΔT (на уровне значимости 0,05) в предполуденные часы наблюдаются вплоть до высоты ~ 1700 м, после чего сменяются

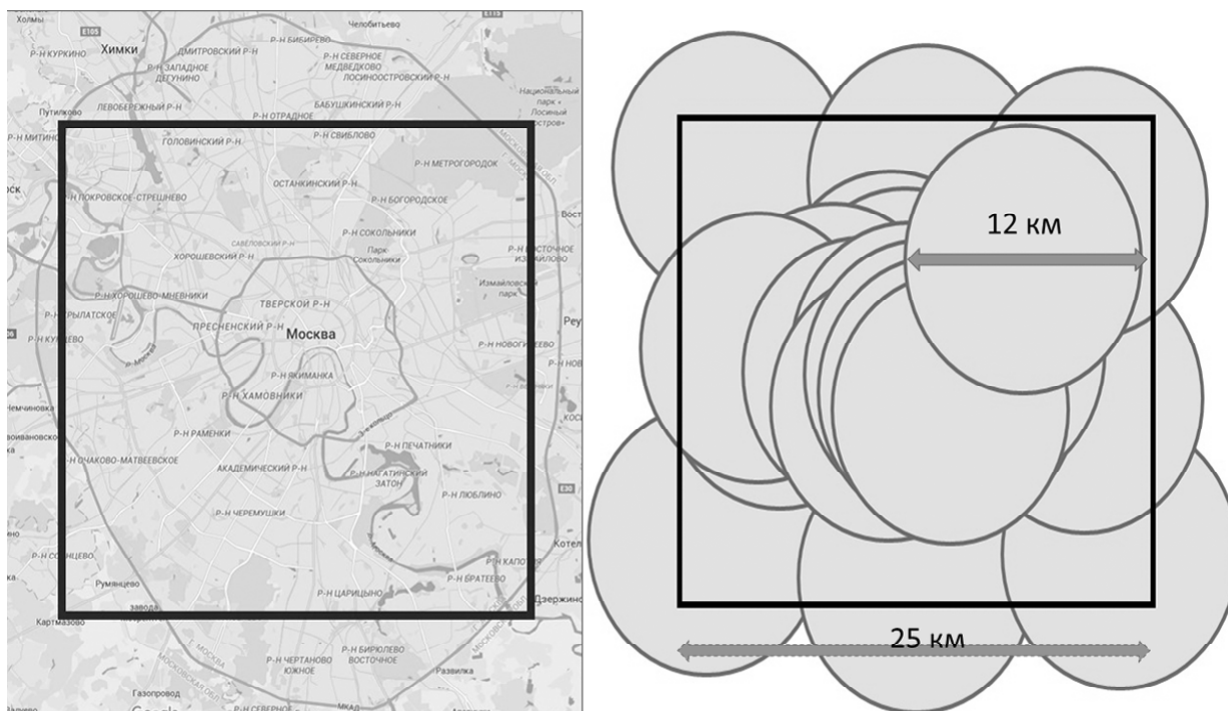


Рис. 1. Иллюстрация методики отбора ситуаций попадания спутниковых данных внутрь контура московской агломерации для целей температурно-влажностного профилирования спутникового зондирования METOP

Fig. 1. Illustration of technique of selecting the METOP satellite data within the Moscow agglomeration area for the temperature and humidity profiling

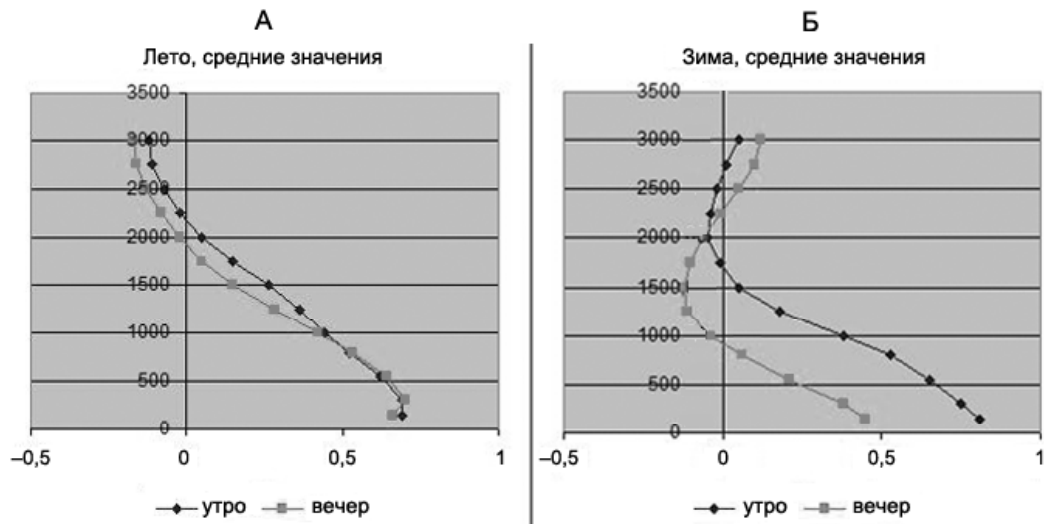


Рис. 2. Вертикальные профили разностей температуры город–пригород, °С: А – средние за май–август, Б – средние за январь–февраль 2015 г., характеризующие в вечернее и предполуденное время отличия термического режима Москвы и Подмосковья

Fig. 2. Vertical profiles of «urban–rural» temperature difference, °C: А – average for May to August, Б – average for January to February, 2015) characterizing the evening and before the midday difference of thermal regime in Moscow and its suburbs

отрицательными разностями, которые значимы, однако, лишь в самой верхней части профиля (выше 2700 м). В вечерние часы значимые положительные разности температур в Москве и Подмосковье наблюдаются до высоты 1500 м, а отрицательные – выше 2500 м. Таким образом, суточного хода в интенсивности ОТ в летний период не наблюдается. Сами значения разности температур довольно существенны: это ~0,7 °С на высотах 150–300 м, а выше ΔT остаются практически идентичными в течение суток до высоты 1000 м, где ΔT = 0,4°С.

Таким образом, спутниковые данные продемонстрировали наличие высотного «острова тепла» летом над Москвой, причем в гораздо большем диапазоне высот (особенно в ночное время), чем это отмечалось в литературе (правда, по данным за все сезоны). Смена знака аномалий (переход от ОТ к «острову холода» – так называемый кросс-овер эффект) отмечена на значительных высотах, чем это указывалось, основываясь на других (не спутниковых) источниках информации.

Перейдем к зимней картине ОТ над Москвой, полученной путем осреднения спутниковых данных за 4 месяца (январь–февраль 2015 и 2016 гг.). Из рис. 2, Б следует, что структура ОТ над Москвой несколько отличается от описанной выше. Прежде всего, это касается высотного диапазона значимых разностей температуры – он оказался значительно меньше, чем для лета. Так, в предполуденные часы статистически значимые величины ΔT наблюдаются до 1000 м, а в вечерние – только до 300 м. Это вполне ожидаемый результат, поскольку для этого времени года характерно преобладание устойчивой стратификации, следовательно, ослабление турбулентного обмена.

Наряду с изменениями температурного режима город оказывает значительное влияние и на поле влажности. Как уже было отмечено, этот эффект изучен гораздо хуже. В этом смысле спутниковые данные могут стать важным инструментом, позволяющим существенно расширить наши знания в этой области.

Вертикальные профили удельной влажности, восстановленные по спутниковым данным, продемонстрировали, что летом в предполуденные часы вплоть до высоты 1000 м наблюдаются значимые (и большие) отрицательные разницы между Москвой и Подмосковьем. На высоте 100 м они составляют –0,5 г/кг, уменьшаясь до –0,13 г/кг к высоте 1000 м (оставаясь статистически значимыми даже на уровне 0,01). Показательно, что в диапазоне вы-

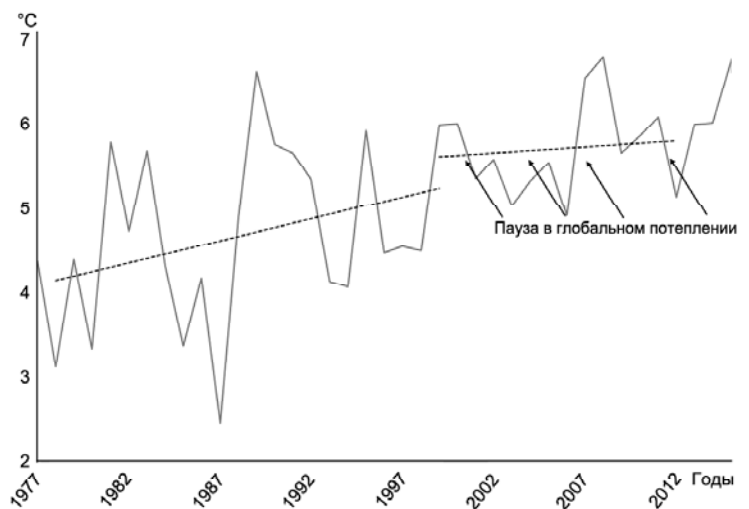


Рис. 3. Средняя по 8 станциям, окружающим Москву (см. текст), динамика среднегодовых значений температуры воздуха в Подмосковье

Fig. 3. Dynamics of the mean annual air temperature in the Moscow suburbs (average of 8 suburban stations, see the text)

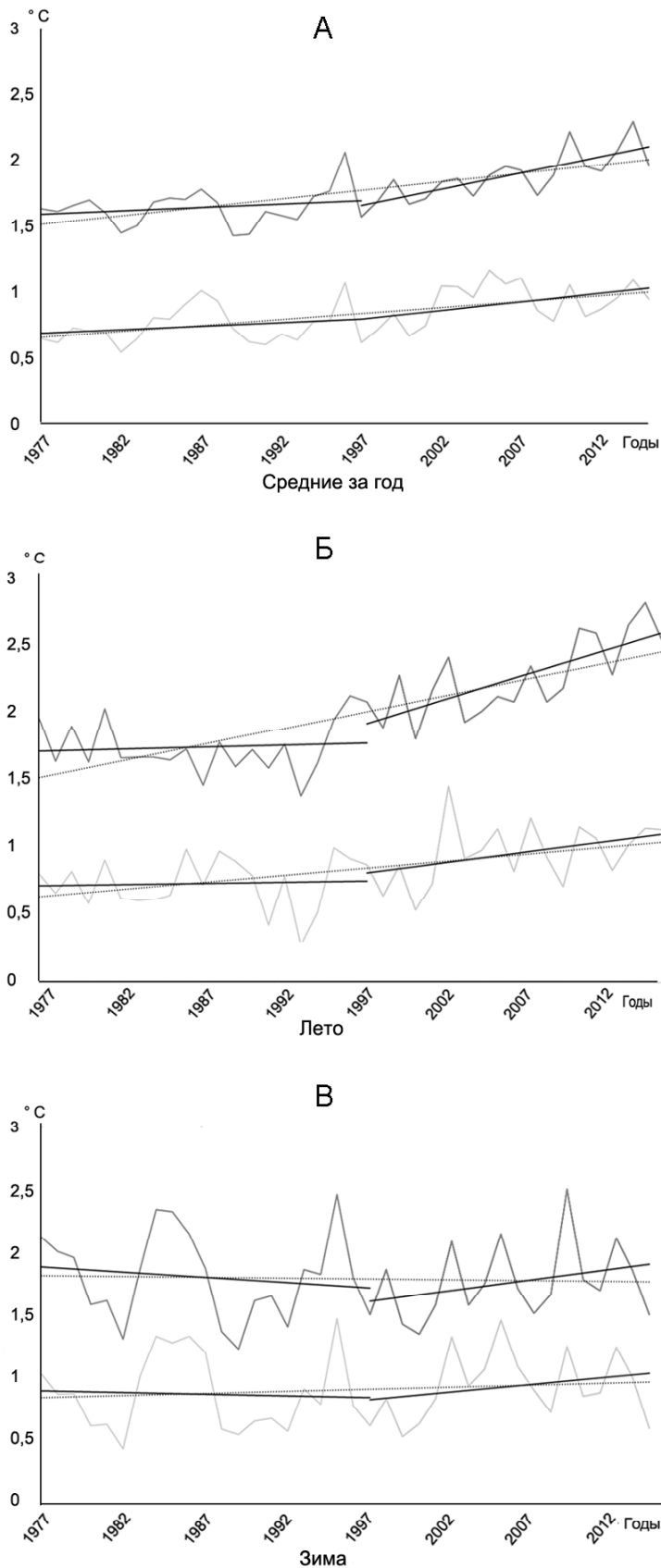


Рис. 4. Динамика «острова тепла» для среднегодовых (А), летних (Б) и зимних (В) значений температуры, если в качестве реперной московской станции брать станции Балчуг и МГУ

Fig. 4. Dynamics of the UHI for the mean annual (A), summer (B) and winter (B) temperatures, if the reference data are from the Balchug and the MSU stations

сот от 1500 до 2000 м над «островом сухости» простирается область повышенных значений удельной влажности (то есть это «остров влажности»), также статистически значимых. Это подтверждает тот факт, что конвекция играет важную роль в перераспределении влагосодержания в городской атмосфере.

Вечером наблюдаются статистически значимые отрицательные разницы удельной влажности, вплоть до высот 800 м, с максимальными значениями $-0,3$ г/кг на высоте 150 м. Интересно, что упомянутый в предыдущем абзаце «остров влажности» в это время суток выражен значительно отчетливее: он занимает большую толщу воздуха (значимые разницы наблюдаются от ~1200 до 2500 м), а сами разности по абсолютной величине превосходят максимальные значения на высоте 150 м. Логично предположить, что это является следствием накопления водяного пара под слоем приподнятых инверсий, характерных для городской атмосферы, в отличие от сельской местности, где преобладают приземные инверсии.

В зимнее время над городом формируется «остров влажности», выраженный только днем и захватывающий нижние 300 м.

Рассмотрим динамику ОТ в условиях климатических изменений. Это можно осуществить только по данным наблюдений, организованным у поверхности земли, поскольку только тут имеются ряды достаточной продолжительности для диагностики климатической изменчивости. Сначала проанализируем фоновые, не затронутые локальным влиянием урбанистических воздействий, изменения температуры в Подмоскovie (рис. 3). Несмотря на большие вариации, в данных за 1977–1997 гг. можно обнаружить тренд повышения температуры, который составил $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Он генетически связан с глобальным потеплением, сигнал которого в каждом регионе сложно преломляется под влиянием циркуляционных аномалий. Начиная с середины 90-х годов глобальное потепление, как известно, приостановилось, что нашло отражение и в региональных данных центральной части Восточно-Европейской равнины (рис. 3): последние ~15 лет межгодовые флуктуации происходили практически на неизменном уровне достигнутых высоких температур. Эти результаты хорошо соотносятся с литературными данными [Груза, Ранькова, 2012].

Для характеристики ОТ используем разность температуры между данными московской станции и средним значением по восьми станциям Подмоскovie, выбранным для характеристики фоновых изменений климата. В качестве московской станции будем ис-

пользовать как станцию Балчуг, так и обсерваторию МГУ, а также обсерватории Михельсона и ВВЦ (ВДНХ). Первая находится в Замоскворечье и в гораздо большей степени характеризует именно городские условия, чем данные наблюдений трех остальных станций, расположенных в парковых зонах Москвы.

Межгодовые изменения показывают, что, несмотря на изменение характера фонового тренда, интенсивность ОТ не только не уменьшилась, а наоборот: в последние 20 лет потепление в Москве стало усиливаться по сравнению с тем, что происходит в окружающих ее районах (рис. 4). Так, за период с 1977 по 1997 гг. интенсивность ОТ, вычисленная по среднегодовым значениям, росла с одинаковой скоростью $0,05^{\circ}\text{C}$ за 10 лет при использовании в качестве реперной как станции Балчуг, так и станции МГУ. Однако в последние 15 лет, когда, как уже упоминалось, наблюдалась пауза в глобальном потеплении, темпы роста температуры в Москве увеличились. Регрессионные соотношения (выраженные линиями трендов на рис. 4, А) показывают увеличение температуры на $0,13^{\circ}\text{C}$ за 10 лет по сравнению с Подмосковьем, если в качестве городской рассматривать станцию МГУ, и $0,25^{\circ}\text{C}$ за 10 лет по данным станции Балчуг. Это очень высокие темпы роста, сравнимые с темпами глобального потепления в предыдущие 20 лет. Генетически они связаны с урбанистическим воздействием.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Русским географическим обществом (грант № 12/2014/РГО-РФФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., 2014. 61 с.
- Город, архитектура, человек и климат / Под ред. М.С. Мягкова. М.: Архитектура-С, 2007. 344 с.
- 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.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
- Кадыров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Доклады РАН. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
- Колокутин Г.Э., Фомин Б.А. Новые спектроскопические базы и дистанционное зондирование Земли методами инфракрасной спектроскопии высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 278–287.
- 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., 2010. С. 389–400.
- Курбацкая Л.И., Курбацкий А.Ф. Мезомасштабная численная модель городского острова тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4. № 1. С. 165–169.
- Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 248 с.
- 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 РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
- Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 589–596.
- Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б., Горбаренко Е.В., Еремينا И.Д., Жданова Е.Ю., Корнева И.А., Константинов П.И., Локощенко М.А., Скороход А.И., Шилоцева О.А. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. 2014. С. 49–64.
- Щербатов А.Ю. Метеорологический режим и загрязнение атмосферы городов. Калинин: КГУ. 1987. 97 с.
- Aires F., Rossow W.B., Scott N.A., Chédin A. Remote Sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 2. Simultaneous retrieval of temperature, water vapor and ozone atmospheric profiles // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22. P. 4620–4631.

Если рассматривать отдельные сезоны, то интенсивность ОТ стала резко усиливаться в последние 15 лет летом: темпы роста составили $0,37$ и $0,16^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, если в качестве московской станции использовать Балчуг и МГУ соответственно (рис. 4, Б). В этот же период зимой температура также увеличивалась, но не так быстро, как летом ($0,17$ и $0,12^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, для Балчуга и МГУ соответственно (рис. 4, В)).

Выводы:

– городской ОТ в Москве прослеживается до ~ 2 км. Летом ОТ в нижней половине представляет собой «остров сухости», в то время как верхняя часть ОТ есть «остров влажности». Зимой ОТ в своей нижней части есть «остров влажности» (в течение всех суток), а в верхней части ОТ в вечерние часы отмечается переход к отрицательным аномалиям, то есть «острову сухости»;

– влияние урбанизации на микроклимат Москвы практически не ощущалось до начала XXI века: в 70-80-90-х годах Москва и Подмосковье теплели почти с одинаковой скоростью. Гораздо более выраженное потепление в Москве, отражением которого служит рост интенсивности ОТ, произошло в последние ~ 15 лет. Этот эффект особенно впечатляющ, поскольку в этот период глобальное потепление затормозилось;

– наблюдаемые изменения сказываются на микроклимате московской агломерации, создавая условия дискомфорта для проживающих здесь людей.

Bornstein R.D. Observations of the urban heat island effect in New York City // *J. Appl. Meteorol.* 1968. V. 7. P. 575–582.

Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1954. V. 35. № 2. P. 198–207.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kislov A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T., Gorlach I., Trusilova K. Urban amplification of the global warming

in Moscow megacity // *EGU General Assembly 2015. Geophysical Research Abstracts.* 2015. V. 17. EGU2015-5620.

Kuttler W., Weber S., Schonfeld J., Hesselschwerdt A. Urban/rural atmospheric water vapor pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany // *Int. J. Climatology.* 2007. № 14. V. 27. P. 2005–2015.

Lokoshchenko M.A. Urban 'heat island' in Moscow // *Urban Climate.* 2014. V. 10. P. 550–562.

Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // *Bound.-Layer Meteorol.* 2002. V. 104. P. 261–304.

Oke T.R. *Boundary layer climates.* 1987. Routledge. 435 p.

World Urbanization Prospects. The 2009 Revision Rep., 1–47 pp, United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. 2009. New York.

Поступила в редакцию 18.08.2016

Принята к публикации 31.03.2017

**A.V. Kislov¹, M.I. Varentsov²,
I.A. Gorlach³, L.I. Alekseeva⁴**

**«HEAT ISLAND» OF THE MOSCOW AGGLOMERATION
AND THE URBAN-INDUCED AMPLIFICATION
OF GLOBAL WARMING**

Climate changes are governed by the global changes of the concentrations of greenhouse gases and aerosols, as well as the regional changes of atmospheric circulation. Within a large urban area, the microclimate change (particularly climate warming) is amplified under the influence of sharply modified land surface properties. This is the process of the. Differences in meteorological parameters between the urban and rural areas form the so-called «islands». These are the Urban heat/cool island (UHI or UCI) and the Urban dry/wet island (UDI or UWI) in the case of moisture shortage/excess within the urban area. The focus of this paper is the climate change of the Moscow megacity, including the changes of urban islands. Available meteorological observations within the Moscow urban area and surrounding territory make it possible to assess the urban-induced climate warming component separately from the climate variations typical to the whole central part of the East European Plain. According to the ground observation data during recent 15 years the intensity of the heat island has increased despite a «pause» in the process of global warming. To obtain more precise viewing of the UHI structure the satellite data (METOP-A and METOP-B) were analyzed together with those of ground observations. The former provide temperature and humidity profiles with the spatial resolution of 25×25 km². It was found that the UHI vertical extension could reach ~2 km. During summer, the lower part of UHI is at the same time the UDI, while its upper part is the UWI. In winter, the lower part of UHI is the UWI.

Key words: «heat islands», global warming, urban-induced amplification of global warming, Moscow agglomeration.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Geographical Society (grant № 12/2014/РГО-РФФИ).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* avkislov@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, postgraduate student; *e-mail:* mvar91@gmail.com

³ FGBU Gidromettsentr Rossii, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* ia_gorlach@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* rapira2005@yandex.ru

REFERENCES

- Aires F., Rossow W.B., Scott N.A., Chédin A. Remote Sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 2. Simultaneous retrieval of temperature, water vapor and ozone atmospheric profiles // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D22. P. 4620–4631.
- Bornstein R.D. Observations of the urban heat island effect in New York City // *J. Appl. Meteorol.* 1968. V.7. P. 575–582.
- Chubarova N.E., Nezval' E.I., Belikov I.B., Gorbarenko E.V., Eremina I.D., Zhdanova E.Ju., Korneva I.A., Konstantinov P.I., Lokoshhenko M.A., Skorohod A.I., Shilovceva O.A. Klimaticheskie i ekologicheskie harakteristiki moskovskogo megapolisa za 60 let po dannym Meteorologicheskoy observatorii MGU [Climatic and environmental characteristics of the Moscow megalopolis for 60 years, according to the data of the Meteorological Observatory of the Moscow State University] // *Meteorologiya i gidrologiya.* 2014. C. 49–64 (in Russian).
- Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1954. V. 35. № 2. P. 198–207.
- Gorlach I.A., Kislov A.V., Alekseeva L.I. Opyt issledovaniya vertikal'noy struktury gorodskogo ostrova tepla na osnove sputnikovykh dannykh [Experience of studying the vertical structure of the urban heat island basing on the satellite data] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2017. № 4. S. 37–46 (in Russian).
- Gorod, arhitektura, chelovek i klimat [City, architecture, humans and climate] / Red. M.S. Mjagkova. M.: Arhitektura-S, 2007. 344 s. (in Russian).
- Gruza G.V., Ran'kova Je.Ja. Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperature vozduha [Observed and projected climate changes over Russia: the air temperature]. Obninsk: 2012. FGBU «VNIIGMI-MCD». 194 s. (in Russian).
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kadygrov E.N., Kuznecova I.N., Golicyn G.S. Ostrov tepla v pograničnom sloe atmosfery nad bol'shim gorodom: novye rezul'taty na osnove distancionnykh dannykh [Heat island within the boundary layer over a large town: new results based on the remote sensing data] // *Doklady RAN.* 2002. T. 385. № 4. C. 541–548 (in Russian).
- Kislov A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T., Gorlach I., Trusilova K. Urban amplification of the global warming in Moscow megacity // *EGU General Assembly 2015. Geophysical Research Abstracts.* 2015. V. 17. EGU2015-5620.
- Kolokutin G.Je., Fomin B.A. Novye spektroskopicheskie bazy i distancionnoe zondirovanie Zemli metodami infrakrasnoj spektrometrii vysokogo razreshenija [New spectroscopic databases and the remote sensing of the Earth by high resolution infrared spectrometry] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa.* 2014. T. 11. № 3. S. 278–287 (in Russian).
- Kurbackaya L.I., Kurbackij A.F. Mezomasshtabnaya chislennaya model' gorodskogo ostrova tepla v ustojchivo stratificirovannoj atmosfere [Mesoscale numerical model of urban heat island in the stably stratified atmosphere] // *Interesko Geo-Sibir'.* 2015. T. 4. № 1. S. 165–169 (in Russian).
- Kuttler W., Weber S., Schonfeld J., Hesselschwerdt A. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany // *International J. Climatology.* 2007. № 14. V. 27. P. 2005–2015.
- Kuznecova I.N., Nahaev M.I. Sezonnnye osobennosti termicheskoy struktury nizhnih sloev atmosfery v moskovskom megapolise po dannym mikrovolnovykh izmerenij temperatury [Seasonal features of thermal structure of the lower layers of the atmosphere in the Moscow megalopolis according to the microwave temperature measurements] // *80 let Gidrometcentru Rossii.* M. 2010. S. 389–400. (in Russian).
- Landsberg G.E. *Klimat goroda* [City climate]. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 248 s. (in Russian).
- Lokoshchenko M. A. Urban 'heat island' in Moscow // *Urban Climate.* 2014. V. 10. P. 550–562.
- Lokoshhenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V., Duboveckij A.Z., Novickij M.A., Razin P.E. O vysotnoj protyazhjonnosti gorodskogo ostrova tepla nad Moskvoy [Altitudinal extent of urban heat island over Moscow] // *Doklady RAN.* 2016. T. 466. № 2. C. 213–217 (in Russian).
- Oke T.R. *Boundary layer climates.* 1987. Routledge. 435 p.
- Shherbakov A.Ju. Meteorologicheskij rezhim i zagryaznenie atmosfery gorodov [Meteorological regime and urban atmospheric pollution] // *KGU. Kalinin,* 1987. 97 s. (in Russian).
- Uzhegova N.V., Antohin P.N., Belan B.D., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Fofonov A.V. Vydelenie antropogennogo vklada v izmenenie temperatury, vlazhnosti, gazovogo i ajerozol'nogo sostava gorodskogo vozduha [Separation of human contribution to the changes in temperature, humidity, gas and aerosol composition of urban air] // *Optika atmosfery i okeana.* 2011. T. 24. № 7. S. 589–596 (in Russian).
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshee rezjume. [The 2nd Roshydromet assessment report about climate changes and their consequences over the area of the Russian Federation] M., 2014. 61 s. (in Russian).
- World Urbanization Prospects. The 2009 Revision Rep. 1–47 p., United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. 2009. New York.
- Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // *Bound. Layer Meteorol.* 2002. V. 104. P. 261–304.

Received 18.08.2016

Accepted 31.03.2017