

УДК 551.588.7 551.525.2 551.507.362.2

О СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ “ОСТРОВА ТЕПЛА” МОСКВЫ

© 2023 г. М. А. Локощенко^{1,2,*}, Е. А. Енукова³, Л. И. Алексеева¹

Представлено академиком РАН С.А. Добролюбовым 10.04.2023 г.

Поступило 11.04.2023 г.

После доработки 14.04.2023 г.

Принято к публикации 18.04.2023 г.

По данным метеорологической сети за период 1991–2020 гг., а также радиометрических измерений температуры поверхности $T_{\text{П}}$ Московского региона спутниками Terra и Aqua за период 2000–2020 гг. исследованы суточный ход и многолетние изменения “острова тепла” Москвы в поле как температуры воздуха T на высоте 2 м, так и $T_{\text{П}}$. Для анализа $T_{\text{П}}$ отобраны 1379 спутниковых снимков за 21 год при ясной и малооблачной погоде, при которой возможен анализ “острова тепла”. Среднегодовые значения $T_{\text{П}}$ получены с использованием их нормирования по отдельным сезонам. Суточный ход “острова тепла” Москвы в воздухе выражен слабо, особенно при сравнении с сельской местностью не только центра города, но и всей его площади: достоверно лишь ослабление этого явления осенью и в предзимье (с октября по декабрь). По данным спутников “поверхностный остров тепла” отмечен максимумом в июне–июле при наибольшем развитии вегетации, минимумом осенью при опадении листвы и промежуточными значениями зимой и весной. Быстрый рост T происходил в 1991–2020 гг. как в Москве, так и в сельской местности приблизительно с одинаковой скоростью. Вследствие этого в интенсивности “острова тепла” как в воздухе, так и на поверхности в целом за последние 20–30 лет не произошло статистически значимых направленных изменений. Вероятными причинами общей стабилизации “острова тепла” Москвы служат как природные, так и социально-экономические факторы: приблизительное постоянство повторяемости ясной погоды (способствующей усилению этого явления) и фитомассы в регионе (определяющей затраты тепла на транспирацию), замедление и прекращение роста населения и энергопотребления города, а также его деиндустриализация. Дополнительными причинами являются постепенное переселение жителей на новые окраины Москвы, а также карантинные ограничения из-за пандемии коронавируса в 2020 г.

Ключевые слова: температура воздуха и поверхности, стабилизация городского “острова тепла”, спутники Terra и Aqua, радиометрические измерения, вегетационный индекс, метеорологические условия, энергопотребление, население

DOI: 10.31857/S2686739723600728, **EDN:** WGLFVM

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физико-географического явления городского “острова тепла” имеет большое значение для наук о Земле. Города занимают лишь 2% площади планеты, но в них живет более половины населения мира и выбрасывается более 70% парниковых газов от всего их количества, связанного с деятельностью человека. “Острова тепла” приводят к усилению теплового стресса людей и животных при аномально жаркой погоде, особенно в тропиках и субтропиках, но в то же время

ослабляют сильные морозы в городах средних и высоких широт, уменьшая их вредное воздействие на здоровье. Следствиями повышенной температуры воздуха T в городах служат как экономия средств на отопление зданий зимой, так и дополнительные затраты на их кондиционирование летом. Помимо этого, в городах удлиняется вегетационный период и раньше наступают даты созревания плодовых культур. Таким образом, явление “островов тепла” неоднозначно по своим последствиям с точки зрения пользы или вреда для общества и природы, особенно в средних и высоких широтах. Важнейшим показателем “островов тепла” служит их так называемая интенсивность, т.е. разность температуры воздуха ΔT в центре города (или внутри города в целом) и окружающей город сельской местности [2, 15]. Большинству современных крупных городов мира присущ их быстрый рост. Вследствие этого в ряде работ отмечено устойчивое усиление созда-

¹Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

³Государственный университет “Дубна”, Дубна, Московская область, Россия

*E-mail: loko@geogr.msu.ru

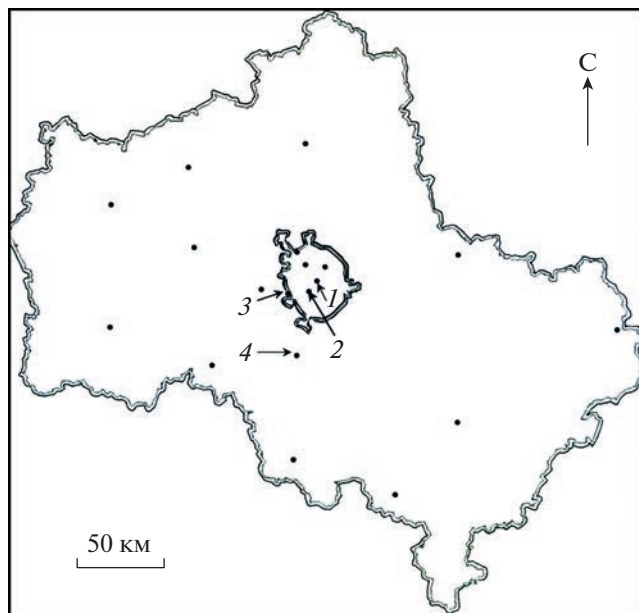


Рис. 1. Карта Московского региона. Точками показаны метеорологические станции, оснащенные персоналом. Двойные линии — традиционные (до 2012 г.) границы Москвы и границы Московской области. Прямоугольник — область сравнения при анализе спутниковых снимков. 1 — Балчуг; 2 — МО МГУ; 3 — Немчиновка; 4 — Михайловское.

ваемых ими “островов тепла”, т.е. рост ΔT в последние десятилетия: в Осаке и Токио, Япония, за период 1901–2002 гг., особенно за последние 50 лет [10, 15]; в Шанхае, КНР, за период 1979–2013 гг. [16]; в Ибадане, Нигерия, за период 1999–2018 гг. [8]; в Стамбуле, Турция, за период 1960–2012 гг. [17]; в Манчестере, Соединенное Королевство, за период 1996–2011 гг. [12]; в Лиссабоне и Порту, Португалия, за период 2008–2017 гг. [7]. Многолетние изменения интенсивности “острова тепла” Москвы в приземном слое воздуха, начиная с конца XIX века, исследованы в [13]. Задачей нашей работы явился более подробный анализ изменений за последние 20–30 лет с привлечением данных долгоживущих спутников, а также вызвавших эти изменения причин.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Явление городского “острова тепла” исследовано нами в двух аспектах: в поле как температуры воздуха T на высоте 2 м по данным метеорологической сети за период 1991–2020 гг., так и температуры поверхности T_p по данным радиометрических измерений с борта спутников Terra и Aqua за период 2000–2020 гг.

В Московском регионе ныне работают 46 метеостанций, включая 5 московских станций с персоналом в пределах традиционных границ го-

рода до 2012 г., 1 станцию с персоналом в так называемой “Новой Москве”, 14 станций с персоналом в Московской области, 3 специализированные авиационные (АМСГ) станции в аэропортах, одну в заповеднике, а также 23 автоматические станции. Однако данные последних недостаточно надежны из-за отсутствия на них регулярного контроля за приборами. Поэтому мы использовали только данные станций, оснащенных персоналом (рис. 1). Вплоть до 2010 г. отсчеты T на всех метеостанциях брались вручную по жидкостным термометрам 8 раз в сутки. Затем, с внедрением на сети автоматических метеорологических комплексов (АМК), был осуществлен переход на автоматические измерения либо термометрами сопротивления, либо емкостными термометрами в зависимости от версии АМК. Традиционные восьмисрочные измерения в ручном режиме остались теперь в столице только на двух ведомственных станциях: старейшей в регионе Обсерватории им. Михельсона и Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ). Однако на всех станциях Росгидромета производится каждодневный контроль показаний автоматических датчиков T путем их сравнения с отсчетами наблюдателя по классическим термометрам. Это позволяет считать накопленные ряды данных приблизительно однородными. К анализу столичного “острова тепла” привлечены данные всех пяти московских и 12 подмосковных станций, имеющих ряды не короче 30 лет, кроме Немчиновки. Последняя находится всего в 1 км от границы города (линии МКАД) и потому непоказательна для сельской местности: ее данные отражают промежуточные условия между городом и окружающей территорией [6]. Еще одна станция, Михайловское, также не рассматривалась нами в силу как короткого ряда данных, так и ее промежуточного положения в Новой Москве. Реальной фактической Москвой мы считаем город в его традиционных границах вдоль МКАД. Новая территория столицы пока остается слабо урбанизированной — так, плотность населения в самом южном Троицком округе “Новой Москвы” (132 чел/км²) в 87 раз меньше, чем в традиционных границах города (11 440 чел/км²).

В рядах среднемесячных значений T за 30 лет имеется один пропуск в данных ст. Балчуг за 2001 г. и несколько пропусков в данных ст. Ново-Иерусалим за 1996–2002 гг. Заметим, что данные Балчуга особенно важны в исследованиях столичного “острова тепла”, поскольку эта станция находится всего в 600 м южнее центра Кремля. Пропущенные значения восстановлены нами приведением по ближайшим станциям (ВДНХ и МО МГУ для Балчуга; Клин или Подмосковная для Ново-Иерусалима) методом разностей. Станция приведения выбиралась с учетом как наименьшей абсолютной величины средней разно-

сти значений, так и наименьшего среднеквадратического отклонения разностей для данного месяца по многолетним выборкам значений для каждой из пар станций.

Долгоживущие американские спутники Terra и Aqua, оснащенные идентичными радиометрами MODIS, находятся на орбите, начиная, соответственно, с 1999 и 2002 г. Таким образом, ряд их данных о T_{Π} является однородным и открывает возможность изучения многолетних изменений “островов тепла” на уровне поверхности любых городов, включая Москву, в продолжение двух последних десятилетий. Точность радиометрических измерений T_{Π} с борта этих спутников составляет над сушей $\pm 1^\circ$, пространственное разрешение данных — 1 км [9]. Общая характеристика “поверхностного острова тепла” Москвы и предварительная оценка его интенсивности в среднем за 8 лет приведены в [3]. Для анализа данных спутников о T_{Π} в Москве был создан векторный слой традиционных границ города вдоль линии МКАД; в качестве зоны сравнения с городом выбран прямоугольник, описанный вокруг границ Московской области и, таким образом, включающий также прилегающие районы соседних областей. Площадь Москвы в пределах созданного шаблона границ составляет 1081 км², а прямоугольной зоны сравнения — 94 851 км².

Частая облачность в средних широтах, непроницаемая для установленных на спутниках радиометров, затрудняет оценки среднегодовых значений T_{Π} и ее многолетних изменений. Так, по данным МО МГУ, средний балл общей облачности в светлую часть суток в Москве за период 1981–2010 гг. составляет 8,0, а нижней — 6,0 [6].

Спутниковые снимки в условиях ясного неба — большая редкость, их доля не превышает в общей выборке для условий Москвы 3%, что недостаточно для расчетов средних оценок. Требуется объективный критерий наибольшей допустимой доли снимка, занятой облаками, при которой достоверный анализ “поверхностного острова тепла” еще возможен. Для этого были проведены численные эксперименты по имитации облачности путем последовательного исключения на взятых для примера снимках при ясном небе и полностью открытой поверхности разного числа ячеек со всех сторон и расчетах ΔT_{Π} на каждом шаге. Оказалось, что даже при исключении 20% площади города и половины площади зоны сравнения смещение в оценках интенсивности “острова тепла” $\Delta T_{\Pi} \leq 0.2$ ее величины, что можно считать допустимой погрешностью [3]. Исходя из полученного результата, был тщательно исследован весь архив ежедневных дневных снимков Terra и Aqua за 2000–2020 гг. (всего — 15 342) и оказалось, что 1379 снимков (~9%) отвечают данному критерию.

Интенсивность “острова тепла” ΔT или ΔT_{Π} определяется нами двояко: как максимальная ΔT_{MAX} , так и средняя ΔT_{CP} в пространстве. В первом случае с окружающей город сельской местностью сравнивается наиболее теплая его часть, обычно центральная, а во втором — вся площадь города, включая городскую периферию:

$$\Delta T_{\text{MAX}} = T_C - \frac{\sum_{j=1}^m T_{R_j}}{m}; \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{CP}} = \frac{T_C + \sum_{i=1}^n T_{U_i}}{n+1} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{R_j}}{m}, \quad (2)$$

где T_C — температура воздуха на станции в центре города; T_U — на остальных городских станциях; T_R — на загородных станциях; n — число станций на периферии города; m — число станций в сельской местности в окрестности города. Применительно к анализу данных спутников речь идет не о станциях, а об отдельных расчетных ячейках снимка площадью 1 км². В нашем случае при анализе данных метеорологической сети $n = 4$; $m = 12$, а при анализе радиометрических измерений спутников $n = 1080$; $m = 94\,851$. Наибольшая интенсивность более показательна с точки зрения различий города и фоновой местности, однако средняя интенсивность статистически более надежна. При анализе спутниковых данных о “поверхностных островах тепла” в поле T_{Π} обычно рассматривается только их средняя интенсивность.

ГОДОВОЙ ХОД “ОСТРОВА ТЕПЛА” МОСКВЫ

Годовой ход интенсивности “острова тепла” Москвы в поле как T по данным метеорологической сети, так и T_{Π} по данным спутников Terra и Aqua, приведен на рис. 2 в среднем за 21 год (с 2000 по 2020 г.). Как известно, в приповерхностном слое воздуха он обычно слабо выражен, и ранее при осреднении за разные промежутки времени о нем были сделаны противоположные выводы [4]. Действительно, как видим, годовой ход значений среднего по площади города “острова тепла” ΔT_{CP} сглаженный. Очевидно лишь небольшое ослабление осенью: значимые различия с доверительной вероятностью 0.95 прослеживаются лишь между октябрём и ноябрём, с одной стороны, и всеми месяцами с января по август, с другой, тогда как между летними и зимними месяцами достоверных различий нет. Годовой ход ΔT_{MAX} выражен отчетливее, но основная его особенность та же: наименьшие значения осенью и в предзимье, с октября по декабрь — вероятно, вследствие почти постоянной в это время

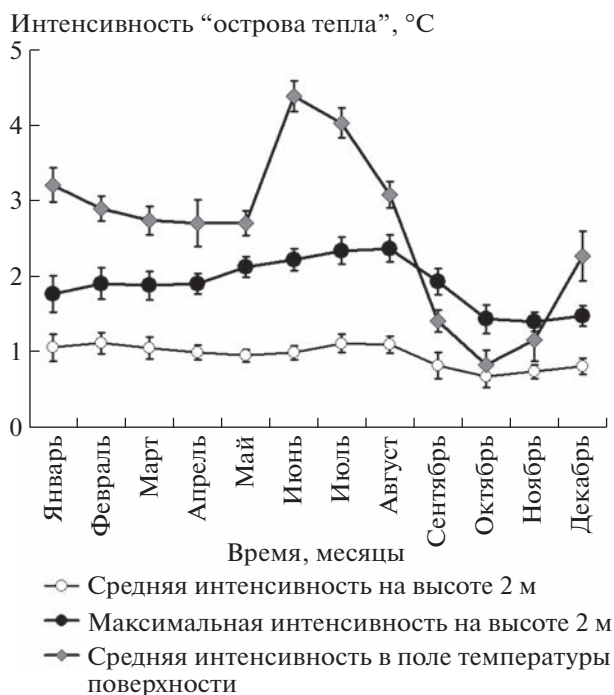


Рис. 2. Годовой ход «острова тепла» Москвы в приземном слое воздуха и на поверхности в среднем за 2000–2020 гг.

плотной нижней облачности, ослабляющей «остров тепла». Наибольшие значения ΔT_{MAX} на высоте 2 м проявляются в июле и августе. Зимой и весной они промежуточные, причем статистическая достоверность сезонных различий между летом и зимой с доверительной вероятностью 0.95 неоднозначна: как видно на рис. 2, доверительные интервалы средних значений для февраля и июня пересекаются. С доверительной вероятностью 0.99 значимых различий между летом и зимой нет вовсе; при этом они прослеживаются лишь между месяцами с октября по декабрь и с апреля по сентябрь.

В отличие от классического «острова тепла» на высоте 2 м, годовой ход «поверхностного острова тепла» в поле $T_{\text{П}}$ выражен гораздо сильнее вследствие большей роли затрат тепла на транспирацию растениями в тепловом балансе поверхности. Он отличается резко выраженным максимумом в июне–июле при наибольшем развитии вегетации, приводящей к дополнительному охлаждению более озелененной поверхности за городом. Наименьшие значения $\Delta T_{\text{П}}$ наблюдаются осенью, когда термические различия между поверхностью города и окружающей территории после опадения листьев минимальны (только осенью $\Delta T_{\text{П}} < \Delta T_{\text{MAX}}$). Зимой и весной интенсивность «поверхностного острова тепла» промежуточная, поскольку снежный покров в черте города частично убирается с дорожных покрытий, а на

остальной городской территории загрязнен, и его альbedo меньше, чем в сельской местности. Различия между средними значениями $\Delta T_{\text{П}}$ в июне–июле, осенью и в остальные месяцы достоверны практически с любой доверительной вероятностью, сколь угодно близкой к 1.

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ «ОСТРОВА ТЕПЛА» МОСКВЫ

Многолетние изменения среднегодовых значений T и интенсивности «острова тепла» показаны на рис. 3. Как видим, температура воздуха и в Москве, и в Подмосковье в течение 30 лет росла быстро и даже с ускорением, о чем свидетельствуют оба параболических тренда на рис. 3 а. Однако рост ее в городе и в сельской местности происходил почти с одинаковой скоростью, что подтверждается близостью значений коэффициентов линейной регрессии K . Как следствие, интенсивность «острова тепла» Москвы на высоте 2 м — как средняя, так и максимальная в пространстве — не показывает на рис. 3 б устойчивого роста. Напротив, на данном временном промежутке очевидна ее стабилизация, а в последние годы даже наметилась тенденция к ослаблению этого явления, что подтверждают параболические тренды. Отмеченный в [13] рост $\Delta T_{\text{ср.}}$ и ΔT_{MAX} в период 2010–2014 гг. оказался кульминацией значений за весь исследуемый период; в последующие годы оба показателя заметно уменьшились. В целом за 30 лет их линейные тренды положительные, но очевидно незначимые, поскольку значения K малы: лишь $0.01^\circ\text{C}/\text{год}$. Заметим, что с точки зрения значимости трендов более показательны коэффициенты линейной регрессии, нормированные на средние значения X исследуемых характеристик за рассматриваемый период: $K_{\text{H}} = K/X$. В среднем за 1991–2020 гг. $\Delta T_{\text{ср.}}$ и ΔT_{MAX} для Москвы равны соответственно 0.92 и 1.85°C . Таким образом, оба нормированных коэффициента K_{H} (соответственно 0.011 и 0.005 год^{-1}) крайне незначительны. Для оценки значимости трендов был использован непараметрический критерий Вилкоксона, основанный на подсчете числа инверсий n (обратных по отношению к обычному знаку разности) при сравнении шести первых и шести последних значений ряда. Оказалось, что и для $\Delta T_{\text{ср.}}$, и для ΔT_{MAX} $n = 8$, что означает отвержение нулевой гипотезы о значимости различий в начале и конце 30-летнего периода с доверительной вероятностью 0.95. Полученный результат позволяет считать оба линейных тренда статистически незначимыми.

Анализ изменений среднегодовых значений $\Delta T_{\text{П}}$ по данным спутников затруднен из-за неполной выборки данных. В разные годы число принятых к анализу снимков при ясной или малооблач-

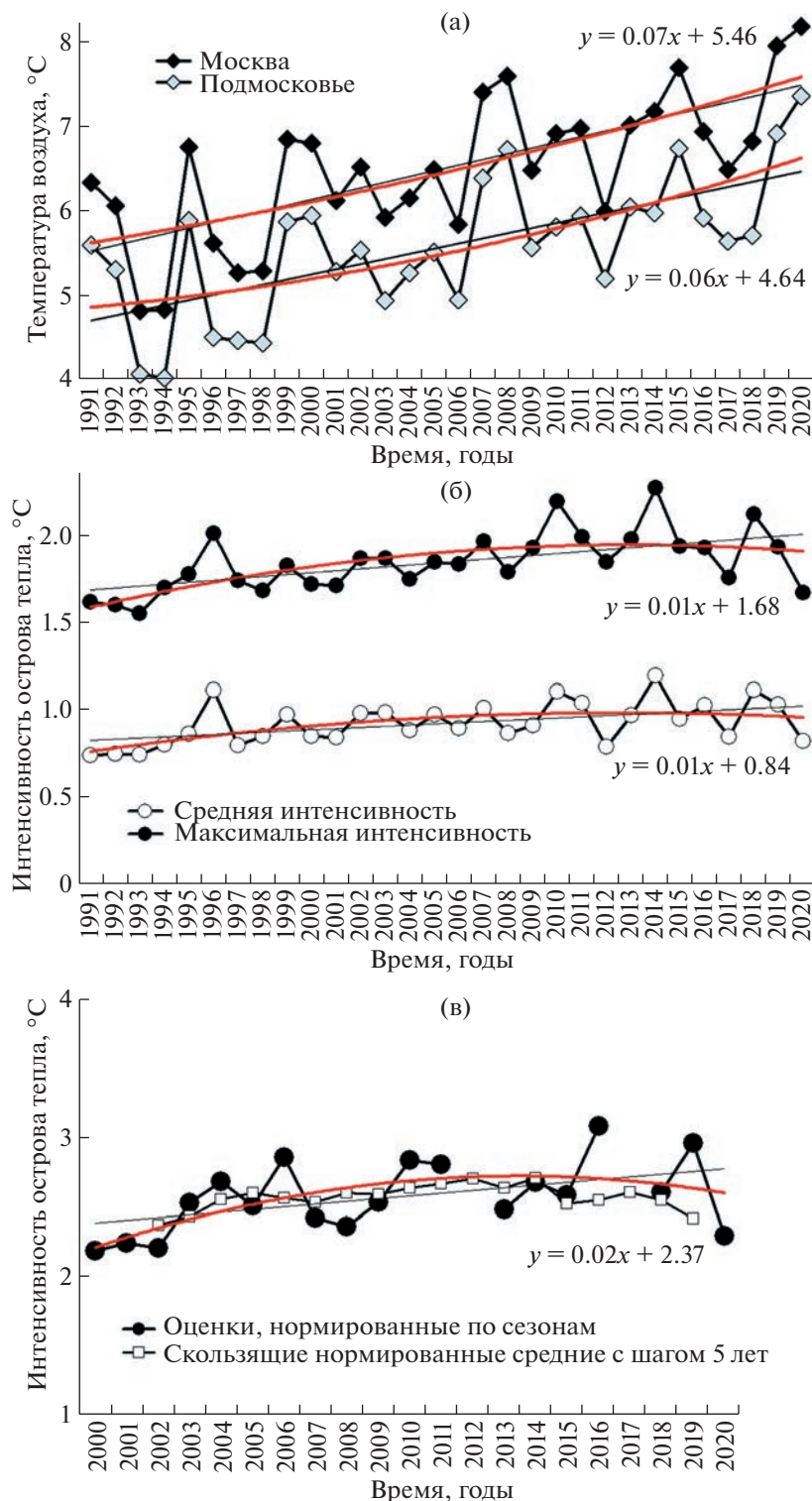


Рис. 3. Многолетние изменения температуры воздуха Москвы и Подмосковья, интенсивности “острова тепла” Москвы и влияющих на него факторов. Черные линии — линейные тренды; красные линии — параболические тренды. (а) Температура воздуха; (б) Интенсивность “острова тепла” на высоте 2 м; (в) Интенсивность “острова тепла” в поле T поверхности; (г) Число случаев ясного неба, штилей и слабого ветра; (д) Вегетационный индекс; (е) Энергопотребление в Московском регионе: 1 — советская эпоха; 2 — экономическая катастрофа и коллапс промышленности; 3 — устойчивый рост; 4 — кризис 2008—2009 гг.; 5 — замедление роста и остановка; (ж) население Москвы (все значения относятся к началу каждого года).

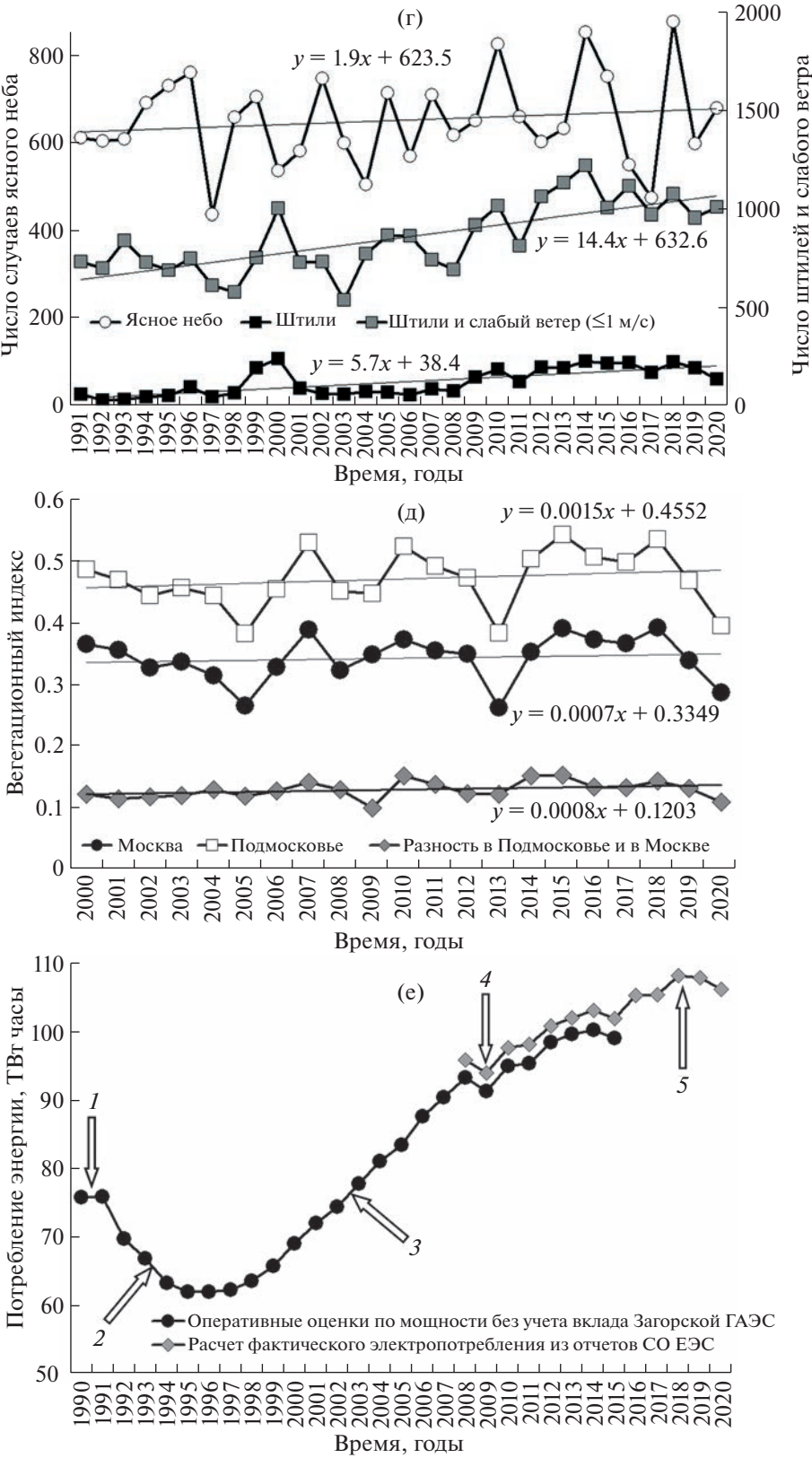


Рис. 3. Окончание

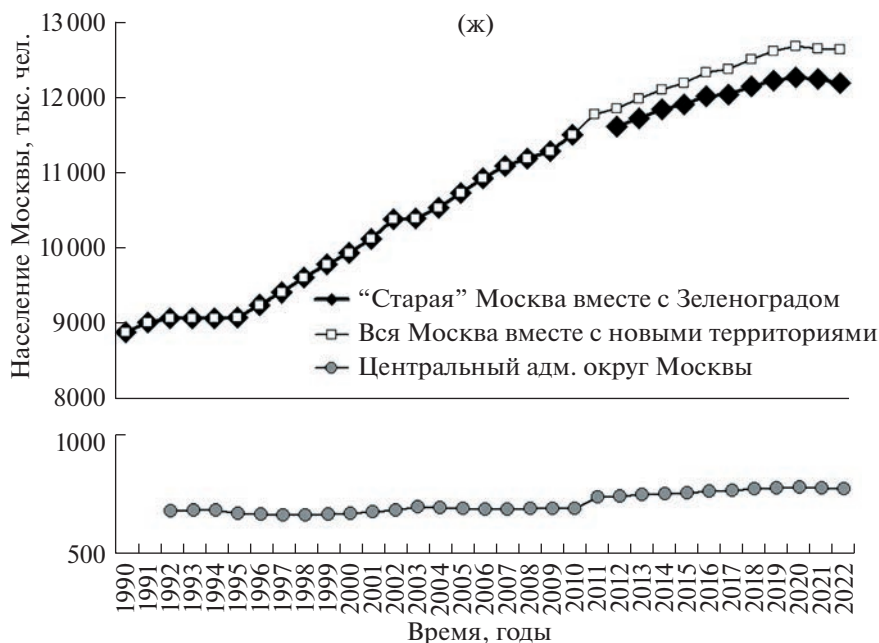


Рис. 3. Окончание

ной погоде менялось от 25 в 2017 г. до 119 в 2018 г., однако в годовом ходе они распределены неравномерно. Это ведет к смещениям оценок среднегодовых значений при простом осреднении по всей выборке снимков за год, поскольку, как мы уже видели, годовой ход ΔT_{Π} выражен очень сильно: оценки будут сильно завышены, если большинство пригодных к рассмотрению снимков оказались летними, и сильно занижены, если они получены осенью. Произвести нормирование с учетом среднемесячных значений невозможно, поскольку в течение многих месяцев часто нет ни одного снимка, отвечающего нашим критериям их отбора. Поэтому нормирование среднегодовых оценок проведено нами по сезонам, т.е. средним за год значением ΔT_{Π} считалось среднее из четырех его среднесезонных значений. При этом возможная погрешность, связанная с изменениями “поверхностного острова тепла” в годовом ходе, сведена к минимуму. Однако даже при таком подходе получить среднегодовые значения для двух лет не удалось, поскольку осенью 2012 г. не было ни одного малооблачного снимка, а единственное зимнее значение ΔT_{Π} в 2017 г. оказалось непоказательным. Полученные нормированные оценки ΔT_{Π} в среднем за отдельные годы приведены на рис. 3 в. Как видим, усиления со временем “острова тепла” Москвы на уровне поверхности в целом за весь период не происходит: после явного роста вплоть до 2006 г. значения стабилизировались, а в последние годы, как и на высоте 2 м, наметилась тенденция к ослаблению этого явления. Это подтверждают и параболиче-

ские тренды, и скользящие средние значения с шагом осреднения 5 лет. Коэффициент K для линейного тренда составляет $0.02^{\circ}\text{C}/\text{год}$; среднее по всей выборке нормированных среднегодовых оценок значение $\Delta T_{\Pi} = 2.57^{\circ}\text{C}$; коэффициент $K_H = 0.008 \text{ год}^{-1}$. При сравнении первых и последних 5 значений ряда число инверсий $n = 4$, что, как и для “острова тепла” на высоте 2 м, означает отсутствие по критерию Вилкоксона статистически достоверных изменений с доверительной вероятностью 0.95.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ИЗМЕНЕНИЙ “ОСТРОВА ТЕПЛА”

Таким образом, многолетние изменения “острова тепла” Москвы за последние 20–30 лет и на высоте 2 м, и на поверхности были нелинейными и немонокотонными: рост в 1990-х и 2000-х гг. сменился стабилизацией последующих значений и даже их уменьшением в последние несколько лет. Говорить с уверенностью о достоверном ослаблении этого явления пока рано, однако его стабилизация в целом за последние 20–30 лет очевидна. В связи с этим рассмотрим, какие причины могут вызвать подобные изменения. Стабилизация “острова тепла” возможна либо при постоянстве влияющих на него природных и антропогенных условий, либо при разнонаправленных изменениях противоположных по действию факторов, приблизительно уравнивающих друг друга.

Ослабление “острова тепла” в том или ином городе возможно в силу как природных причин,

так и человеческой деятельности. К числу первых относятся, прежде всего, менее частые и менее долгие антициклональные условия, сопровождаемые ясной погодой и затишьем: усиление ветра и рост облаков ослабляют “остров тепла”. Помимо погодных условий, на это явление могут влиять и изменения в площади, и степени фитопродуктивности растительного покрова, с которыми связаны затраты тепла на транспирацию. Ослаблению “острова тепла” способствуют как сведение лесов и сокращение площади природных ландшафтов в сельской местности вокруг города, так и дополнительное озеленение и гипотетически возможное залесение городской территории.

Их числа социально-экономических факторов к ослаблению “островов тепла” могут приводить сокращение численности населения города и связанного с этим антропогенного потока тепла; уменьшение плотности населения вследствие расширения площади города; деиндустриализация и вывод из города промышленных предприятий — источников антропогенного тепла; сокращение городской застройки. Дополнительной причиной могут стать карантинные ограничения, также приводящие к ослаблению источников тепла, включая промышленность и автомобильный транспорт. К ослаблению “острова тепла” ведут и противоположные изменения в зоне сравнения вокруг города: рост численности и плотности населения, уплотнение жилой застройки и усиление антропогенных выбросов тепла в пригородах и малых населенных пунктах. Рассмотрим последовательно изменения перечисленных факторов применительно к Москве.

Что касается метеорологических условий, сильнее всего на “остров тепла” Москвы влияет облачность, особенно нижняя, и в меньшей степени — скорость ветра V [14]. Для усиления этого явления наиболее благоприятны ясная погода и штиль. На рис. 3 г приведено число сроков наблюдений (производимых каждые 3 ч) в разные годы в МО МГУ как с полным отсутствием облаков, так и со средней за 10 мин $V = 0$ и $V \leq 1$ м/с. Случаев отмеченного наблюдателями ясного неба оказалось за 30 лет 19 570 (22% всех сроков), штилей — лишь 3786 (4% всех сроков), а крайне слабого ветра со скоростью 1 м/с — 21 914 (25% всех сроков). Как видно, несмотря на значительную межгодовую изменчивость безоблачных условий, частота их почти не меняется со временем: отношение коэффициента линейной регрессии к среднегодовому числу случаев ясного неба крайне мало: 0.003. Число как штилей, так и слабого ветра вместе с ними, напротив, заметно возросло за 30 лет — тем не менее, усиления “острова тепла” не произошло. Таким образом, ни один из двух природных факторов не может объяснить наметившуюся тенденцию к ослаблению этого явления. Сходный анализ изменений метеорологических усло-

вий, способствующих усилению “острова тепла”, включая количество осадков, проведен для Дебрецена, Венгрия за 50 лет в [11].

Среди показателей, характеризующих развитие растительности на основе спутниковых данных, наиболее известен безразмерный “нормализованный разностный вегетационный индекс” НРВИ (NDVI в англоязычной литературе):

$$\text{НРВИ} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \quad (3)$$

где ρ_1 и ρ_2 — отражательные способности соответственно в ближнем инфракрасном и в красной части видимого диапазонов спектра [1, 9]. Как известно, хлоропласты здоровых растений сильно поглощают солнечную радиацию в красной части спектра, что способствует уменьшению значений ρ_2 . При расчетах НРВИ по данным радиометров MODIS используются длины волн 841–876 и 620–670 нм соответственно для ρ_1 и ρ_2 . Для каждого принятого к анализу снимка обоих спутников в период активного развития растительности с 1 апреля до 31 октября (всего — 780) значения НРВИ были рассчитаны отдельно и для Москвы, и для зоны сравнения. Результаты приведены на рис. 3 д. В зоне сравнения значение НРВИ в среднем по всей выборке составляет 0.48, что вполне обычно для средних широт [1] с учетом незначительной площади лесов (занимающих ~40% территории Московского региона), а в условиях городской поверхности с еще меньшей долей зеленых насаждений — ожидаемо меньше (0.35). Как видим, никаких сколько-нибудь заметных изменений в целом за 21 год не произошло ни в самих этих значениях в зоне сравнения и в Москве, ни в их разности: все три коэффициента линейной регрессии ничтожно малы, порядка 0.001/год.

Прямых оценок суммарной мощности антропогенных источников тепла в городе нет, однако известные значения тесно связанного с ними показателя — затрат электроэнергии. Имеется ряд ежечасных оперативных оценок по мощности потребленной электроэнергии E во всем Московском регионе (в Москве и Подмосковье), без учета только вклада Загорской гидроаккумулирующей станции, с 1990 по 2015 г. по данным ОАО СО ЕЭС (Системного оператора Единой энергетической системы). По этим данным были рассчитаны суммарные величины E за отдельные годы. Доля собственно Москвы в ее прежних (до 2012 г.) традиционных границах составляет в приведенных значениях приблизительно половину, хотя “старая Москва” занимает лишь 2% площади региона. Помимо этих оценок, фактическое электропотребление в регионе за отдельные годы, начиная с 2008 г. и уже с учетом Загорской ГАЭС, приведено на сайте СО ЕЭС: <https://www.sops.ru/>. Как видно на рис. 3 е, оба ряда значений

тесно связаны между собой в течение 8 лет их пересечения; различия между ними составляют 2–3%.

В последние годы существования СССР энергопотребление в Московском регионе было стабильно высоким. В 1992 г. начался его резкий спад, связанный с развалом страны и массовым закрытием промышленных предприятий. После достижения минимума в 1995–1997 гг. в энергопотреблении наметился рост, остававшийся устойчивым и монотонным вплоть до 2014 г., за исключением лишь экономического кризиса 2008–2009 гг., проявившегося в локальном минимуме значений E за 2009 г. Наконец, последние годы отмечены замедлением роста E и его остановкой, в 2019 и 2020 г. энергопотребление сократилось. Косвенно это свидетельствует об ослаблении антропогенных источников тепла в населенных пунктах региона — прежде всего, в Москве.

Наиболее вероятными причинами замедления роста энергопотребления и его остановки в последние годы служат прекращение роста населения города, а также его деиндустриализация. Как видно на рис. 3 ж, в 2010-е гг. рост населения замедлился, а в 2020 и 2021 гг. наметилась его убыль (оценки численности жителей Москвы в ее старых и новых границах приведены здесь из открытых источников на начало каждого года). Население Центрального административного округа столицы, в котором находится ст. Балчуг, определяющая значения $\Delta T_{\text{МАХ}}$, росло очень медленно, а в последние годы остается почти неизменным: ~780 тыс. чел. С другой стороны, как известно, в последние десятилетия многие крупные промышленные предприятия Москвы, создававшие значительные выбросы антропогенного тепла (заводы ЗИЛ, АЗЛК, “Серп и Молот” и др.), были либо закрыты, либо выведены за пределы столицы. Точных оценок связанного с этим сокращения выбросов тепла нет, однако примечательны приведенные в [5] изменения в структуре энергопотребления Москвы: резкое сокращение доли промышленности и рост доли непромышленных потребителей. Если в 1985 г. доля промышленности в общем энергопотреблении столицы составляла 67%, а непромышленных потребителей 21%, то в 2004 г. их соотношение стало обратным: соответственно 30 и 56%. Таким образом, деиндустриализация Москвы, очевидно, явилась одной из причин стабилизации столичного “острова тепла”.

Дополнительной причиной, ведущей к ослаблению “острова тепла”, служит постепенное, хоть и медленное, переселение москвичей в “Новую Москву” и уменьшение плотности населения в старой части города, о чем говорят постепенно нарастающие различия между числом жителей столицы в ее прежних и новых границах на рис. 3 ж. Если в 2013 г. жители “Новой Москвы” составля-

ли лишь 2.0% населения города, то к 2020 г. их доля возросла до 3.2%. Еще одной причиной, обусловившей ослабление “острова тепла” Москвы в 2020 г., явились карантинные ограничения из-за пандемии коронавирусной инфекции, приведшие к резкому сокращению выбросов тепла оставшейся в городе промышленностью и автомобильным транспортом [4].

Таким образом, в отличие от многих других крупных городов мира, в Москве за последние 20–30 лет не произошло усиления “острова тепла”. Причинами стабилизации этого явления служат как природные, так и социально-экономические факторы: постоянство безоблачных условий и состояния растительного покрова, замедление и остановка энергопотребления вследствие прекращения роста населения города и его деиндустриализации, а также постепенное переселение жителей из старой территории столицы в ее новые районы. Дополнительной причиной ослабления “острова тепла” в 2020 г. явилось резкое сокращение антропогенных источников тепла из-за карантинных ограничений.

ВЫВОДЫ

1. Рост температуры воздуха в Московском регионе за последние 30 лет происходил быстро и с ускорением, однако его скорость как в традиционных границах Москвы, так и в окружающей сельской местности была приблизительно одинаковой: 0.06–0.07°C/год.

2. Максимальная в пространстве и средняя по площади города интенсивности “острова тепла” Москвы в среднем за период 1991–2020 гг. составляют соответственно 1.8 и 0.9°C на высоте 2 м. Интенсивность “острова тепла” Москвы в поле температуры поверхности по радиометрическим измерениям с борта спутников Terra и Aqua в среднем за период 2000–2020 гг. значительно больше: 2.6°C.

3. Годовой ход интенсивности “острова тепла” на высоте 2 м в целом сглаженный; статистически достоверно лишь ослабление этого явления осенью и в начале зимы. Напротив, на уровне поверхности годовой ход температурных различий в городе и окружающей сельской местности выражен ярко и отмечен резким максимумом в июне–июле, минимумом осенью и промежуточными значениями зимой и весной. Вероятные причины сезонных различий — затраты тепла на транспирацию растениями за городом при активной вегетации летом, близость термических условий после опадения листвы и до установления снежного покрова, альбедо которого в городе меньше.

4. Многолетние изменения интенсивности “острова тепла” Москвы немонотонны: рост интенсивности в 1990-х и в начале 2000-х гг. сменился

стабилизацией значений, а в последние годы наметилась тенденция к ослаблению этого явления. Как следствие, в целом за последние 20–30 лет изменения “острова тепла” в поле температуры как воздуха, так и поверхности статистически незначимы.

5. Состояние растительного покрова как в Москве, так и в окружающей сельской местности Московского региона на протяжении периода 2000–2020 гг. оставалось стабильным. Средние многолетние значения вегетационного индекса НРВИ с апреля по октябрь составляют в Москве и окружающей сельской местности соответственно 0.3–0.4 и ~0.5.

6. Повторяемость безоблачных условий в Москве с 1991 по 2020 г. была почти постоянной, тогда как число случаев штилей и крайне слабого ветра (1 м/с) в среднем за тот же период существенно возросло. Однако само по себе влияние ветра, взятое в отрыве от прочих факторов, не привело к усилению “острова тепла”.

7. Наиболее вероятными причинами общей стабилизации “острова тепла” Москвы и его частичного ослабления в последние годы служат изменения социально-экономических условий: замедление и прекращение роста населения города, деиндустриализация и, как следствие, замедление и остановка роста энергопотребления, а также частичный отток населения из “старой Москвы” на новые окраины. Дополнительной причиной ослабления столичного “острова тепла” в 2020 г. явились карантинные ограничения из-за пандемии коронавирусной инфекции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М.В. Зимина и других сотрудников ИТЦ СканЭкс за предоставление программного обеспечения, Н.А. Терешонка за предоставленные данные метеорологической сети, а также И.В. Городкову и других сотрудников ОАО “Системный оператор ЕЭС” за предоставленные данные об энергопотреблении.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ, проекты № 21-17-00210 (в части анализа данных метеостанций) и № 23-27-00279 (в части анализа данных спутников и влияющих на “остров тепла” показателей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барталев С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 208.
2. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 248.

3. Локощенко М.А., Енукова Е.А. Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным. // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 53–64.
4. Локощенко М.А., Алексеева Л.И. О годовом ходе “острова тепла” Москвы и влиянии на него карантинных мероприятий при пандемии коронавируса в 2020 г. // Известия РАН серия ФАО. 2022, Т. 58. № 2. С. 194–204.
5. Макоклюев Б.И. Анализ и планирование энергопотребления. М.: Энергоатомиздат, 2008, С. 296.
6. Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова / Под ред. М. А. Локощенко. М.: МАКС Пресс, 2019. 277 с. ISBN: 978-5-317-06312-2.
7. Andrade C., Fonseca A., Santos J.A. Climate Change Trends for the Urban Heat Island Intensities in Two Major Portuguese Cities. // Sustainability. 2023. 15. 3970.
8. Durowoju O.S., Samuel K.J., Anibaba B.W. Temporal analysis of Urban Heat Island in Ibadan metropolis // Osun Geographical Review. 2021. 4. P. 170–180.
9. EOS Data Products Handbook. Ed. by Parkinson C.L. & Greenstone R. // NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt. Maryland, USA. 2000. 2. 253 P.
10. Kataoka K., Matsumoto F., Ichinose T., Taniguchi M. Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years // Science of the Total Environment. 2009. 407. P. 3112–3119.
11. László E., Botlyán Z., Szegedi S. Long-term changes of meteorological conditions of urban heat island development in the region of Debrecen, Hungary // Theoretical and Applied Climatology. 2015.
12. Levermore G.J., Parkinson J.B., Laycock P.J., Lindley S. The Urban Heat Island in Manchester 1996–2011 // Building Services Engineering Research and Technology. 2014. 36 (3).
13. Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes // J. Appl. Meteorol. and Climatology. 2017. 56 (10). P. 2729–2745.
14. Lokoshchenko M.A., Alekseeva L.I. Influence of Meteorological Parameters on the Urban Heat Island in Moscow // Atmosphere. 2023. 14. 3. 507.
15. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban Climates. Cambridge, UK: University Press, 2017. 525 P.
16. Qunfang Huang, Lin Li, Yuqi Lu, Yanjuan Yang and Mingcai Li. The roles of meteorological parameters in Shanghai’s nocturnal urban heat island from 1979 to 2013 // Theoretical and Applied Climatology. 2020. 141. P. 285–297.
17. Ünal Y.S., Sonuç C.Y., Incecik S., Topcu H.S., Diren-Üstün D.H., Temizöz H.P. Investigating urban heat island intensity in Istanbul // Theoretical and Applied Climatology. 2020. 139. P. 175–190.

MODERN CHANGES OF THE URBAN HEAT ISLAND IN MOSCOW

M. A. Lokoshchenko^{a,b,#}, E. A. Erukova^c, and L. I. Alekseeva^a^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation*^b*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*^c*Dubna State University, Dubna, Moscow Region, Russian Federation*[#]*E-mail: loko@geogr.msu.ru*

Presented by Academician of the RAS S.A. Dobrolyubov April 10, 2023

According to the data of weather stations for the period 1991–2020, as well as radiometric measurements of the surface temperature T_s of Moscow region by Terra and Aqua satellites for the period 2000–2020, the daily course and long-term changes of the urban ‘heat island’ (UHI) of Moscow in the field of both the air temperature T at a height of 2 m and the T_s were studied. For the analysis of T_s 1379 satellite images were selected for 21 years in clear and slightly cloudy sky, when the UHI analysis is possible. The average annual values of T_s were obtained using their normalization for separate seasons. The daily course of Moscow UHI in the air is weakly expressed, especially when compared with the countryside not only of the city center, but also of its entire area: only the weakening of this phenomenon in autumn and in the pre-winter season (from October to December) is reliable. According to satellite data, the ‘surface UHI’ is marked by a maximum in June–July with the strongest vegetation development, a minimum in autumn when leaves fall, and intermediate values in winter and spring. The rapid growth of T took place in 1991–2020 both in Moscow and in rural areas with approximately the same speed. As a result, there have been no statistically significant directional changes in the UHI intensity both in the air and on the surface as a whole over the past 20–30 years. The probable reasons for the general stabilization of the UHI in Moscow are both natural and socio-economic factors: the approximate constancy of the probability of clear weather (which promotes the strengthening of this phenomenon) and the vegetative activity in the region (which determines heat losses due to transpiration by plants), slowing down and stopping the growth of the population and energy consumption of the city, as well as its deindustrialization. Additional reasons are the gradual relocation of residents to the new outskirts of Moscow, as well as quarantine restrictions due to the COVID-19 pandemic in 2020.

Keywords: air and surface temperature, urban ‘heat island’ stabilization, Terra and Aqua satellites, radiometric measurements, NDVI, meteorological conditions, energy consumption, population