

УДК 551.588.7 551.525

ОСТРОВ ТЕПЛА МОСКВЫ И ЕГО КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

М. А. Локощенко¹), Л. И. Алексеева¹), Е. А. Енукова²), И. А. Корнева³)

¹Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация, loko@geogr.msu.su; ²Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Московская область, Российская Федерация; ³Институт географии РАН, г. Москва, Российская Федерация

По данным метеорологической сети и спутников системы MODIS исследован городской «остров тепла» Москвы: получены оценки его интенсивности в поле температуры воздуха, поверхности и верхних горизонтов почвы, рассмотрен ее годовой ход, а также многолетние изменения. Показано, что за последние 30 лет рост интенсивности «острова тепла» замедлился и, видимо, сошел на нет как на высоте 2 м, так и на поверхности, тогда как на глубине 160 см отмечено даже заметное ослабление этого явления.

Ключевые слова: городской «остров тепла»; температура воздуха, поверхности и почвы; спутники; радиометры MODIS.

URBAN HEAT ISLAND IN MOSCOW AND ITS CLIMATIC PARAMETERS

М. А. Lokoshchenko¹), L. I. Alekseeva¹), Ye. A. Enuкова²), I. A. Korneva³)

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation, loko@geogr.msu.su; ²Dubna' State University, Dubna, Moscow region, Russian Federation ³Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

According to the data of the meteorological network and satellites of the MODIS system, the 'urban heat island' of Moscow has been investigated: estimates of its intensity in the field of the air temperature, surface and in the upper soil, its annual course, as well as long-term changes have been obtained. It is shown that over the past 30 years, the growth of the 'urban heat island' intensity has slowed down and, apparently, has gone to nothing both at a height of 2 m and in the surface temperature field, whereas at a depth of 160 cm, even a noticeable weakening of this phenomenon has been noted.

Keywords: urban heat island; air, surface and soil temperature; satellites; MODIS radiometers.

Общая характеристика «острова тепла» Москвы. Физико-географическое явление «острова тепла» — результат изменений в радиационном, тепловом и водном балансах поверхности и приземного воздуха в городах.

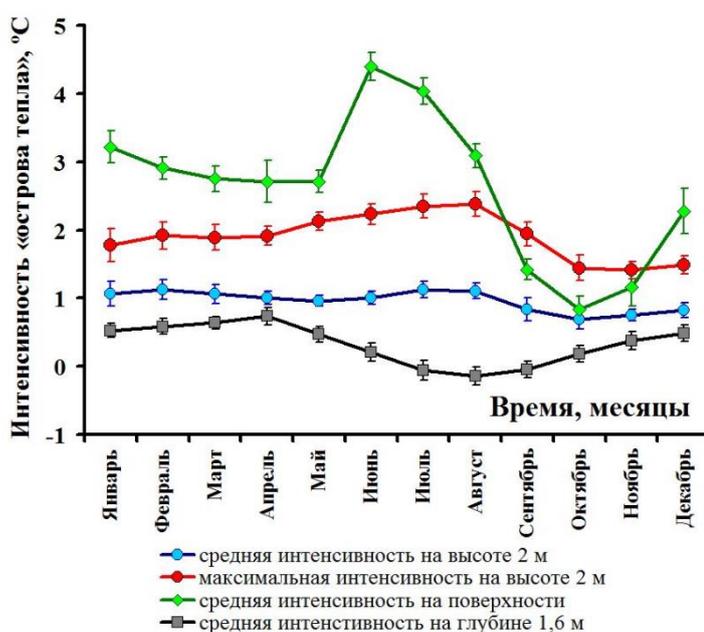
Он создается как прямыми антропогенными выбросами тепла, так и опосредованным влиянием человеческой деятельности: городской индустриальной дымкой, создающей дополнительное противоизлучение, уменьшением в городах затрат тепла на испарение осадков и транспирацию растениями и др. [1].

Москва служит удачным объектом исследований этого явления благодаря своей простой геометрической форме (близкой к эллипсу в ее традиционных границах), общему последовательному уменьшению плотности городской застройки от центра к периферии, а также ровному рельефу и отсутствию обширных водоемов. Исследованы данные метеорологической сети, а также радиометрических измерений с борта долгоживущих космических спутников системы MODIS (Terra и Aqua), находящихся на орбите с 1999 г. В Москве и Подмосковье работают соответственно 5 и 14 метеорологических станций, на которых регулярно измеряется температура воздуха T . Помимо этого, на двух московских и трех подмосковных станциях измеряется также температура почвы и грунта T_{Γ} на различных глубинах вплоть до 3,2 м. Измерения температуры поверхности T_{Π} производятся радиометрами MODIS ежедневно при пролете обоих спутников над Московским регионом с точностью ± 1 °С и пространственным разрешением 1 км [2].

Основной характеристикой «островов тепла» служит их интенсивность, то есть разность температуры в городе (или в центре города) и в окружающей сельской местности [1]. Соответственно, возможны два подхода к оценке этого показателя: расчет средней или максимальной по пространству интенсивности «острова тепла» при сравнении либо всей городской площади, либо только городского центра (точнее, наиболее теплой его части) с загородной местностью [3]. В первом случае интенсивность равна разности средних значений T по выборкам всех городских m и всех загородных метеорологических станций n . Как показано в [3,4], средняя интенсивность «острова тепла» Москвы в среднем за несколько последних лет при $m = 5$ и $n = 13$ составляет $\sim 1,0$ °С, а максимальная в пространстве интенсивность $\sim 2,0$ °С. Иначе говоря, на высоте 2 м весь город в среднем на один градус, а его центр на два градуса теплее сельской местности Подмосковья. Максимальная и в пространстве, и во времени интенсивность достигает в ярко выраженных антициклональных условиях при ясном небе и штиле 11-12 °С [4]. Оценка средней интенсивности «острова тепла» в поле температуры поверхности при анализе 1379 безоблачных или малооблачных дневных спутниковых снимков за 21 год составляет в среднем 2,6 °С с использованием $m = 1081$ и $n = 94\ 851$ расчетных ячеек площадью 1 км² соответственно внутри традиционных границ столицы и

в описанном вокруг границ Московской области прямоугольнике, принятом в качестве зоны сравнения [2,5]. Средняя интенсивность «острова тепла» на глубине 160 см с использованием данных $m = 5$ и $n = 8$ городских и загородных станций составляла в 1960 г. $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальная $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. К сожалению, позднее на многих из этих станций измерения температуры почвы и грунта прекратились, так что современные оценки интенсивности «подземного острова тепла» Москвы менее надежны. В среднем за период 1977-2021 гг. по данным двух городских и трех загородных станций ($m = 2, n = 3$) средняя интенсивность этого явления на глубине 160 см составляет $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в среднем за 2000-2020 гг. — лишь $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оценки максимальной интенсивности «острова тепла» на глубинах теперь недоступны, поскольку на станции Балчуг в центре Москвы измерений T_{Γ} больше нет.

Годовой ход «острова тепла» Москвы. На рисунке 1 представлен годовой ход интенсивности «острова тепла» Москвы в приземном слое воздуха, в поле температуры поверхности и на глубине 160 см.



Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5 %.

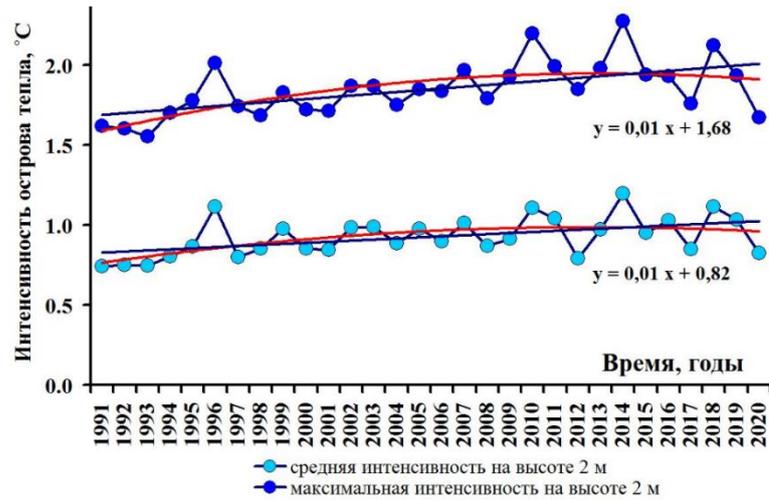
Рис. 1. Годовой ход интенсивности «острова тепла» Москвы в среднем за 2000-2020 гг.

Как видно, во всех трех случаях он различен. На стандартной стационарной высоте измерений 2 м годовой ход сглаженный, очевидно лишь ослабление «острова тепла» осенью и в предзимье (в октябре-декабре). Видимо, это связано с преобладанием в эти месяцы сплошной облачности нижнего яруса, в условиях которой различия между городом и загородной местностью наименьшие [4].

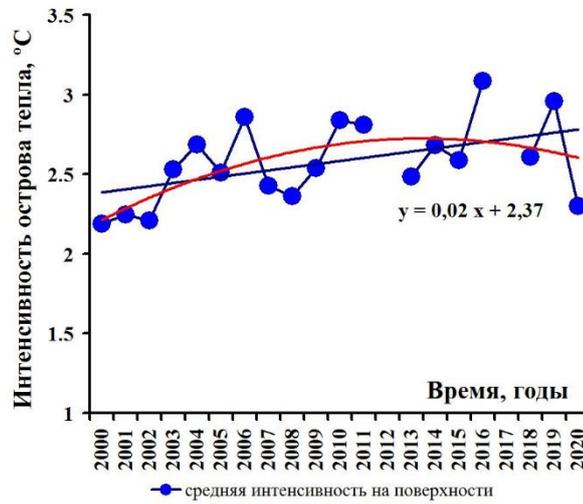
Наибольшая максимальная интенсивность «острова тепла» на 2 м отмечается летом, в июле и августе, вероятно, вследствие частых ясных и малооблачных ночей. На уровне поверхности по данным спутников годовой ход «острова тепла», напротив, выражен ярко: он отмечен максимумом в июне-июле, минимумом осенью и промежуточными значениями зимой и весной. Здесь большую роль играют затраты тепла на транспирацию растениями, которых в городе меньше. Поэтому и различия в температуре поверхности между Москвой и сельской местностью Подмосковья наибольшие летом при активной вегетации и наименьшие осенью после опадения листвы. Наконец, в термическом режиме деятельного слоя почвы велика роль наличия или отсутствия снежного покрова, а также влажности почвы. Видимо, более ранний в городе сход снежного покрова и начало прогрева открытой почвы весной служит причиной того, что «подземный остров тепла» сильнее всего выражен в апреле. Напротив, наименьшие различия между городом и фоновой местностью на глубине 160 см отмечаются в конце лета.

Многолетние изменения «острова тепла» Москвы. На рисунке 2 представлен ход среднегодовых значений интенсивности «острова тепла» с 1991 по 2020 гг. Как видно, в целом за 20-30 лет и в приземном воздухе, и на поверхности произошло небольшое усиление этого явления, что подтверждают положительные коэффициенты линейной регрессии. Впрочем, крайне малые по абсолютной величине: лишь 0,01 или 0,02 °C/год. Однако в последнее десятилетие рост интенсивности «острова тепла» и на высоте 2 м, и на поверхности замедлился и даже прекратился, что видно из параболических трендов. Вероятными причинами этого являются деиндустриализация Москвы (закрытие или вывод из города крупных предприятий), замедление и прекращение роста населения и энергопотребления города вследствие общей стагнации российской экономики, а также экстенсивное развитие города — постепенное переселение жителей в новые районы Москвы [5].

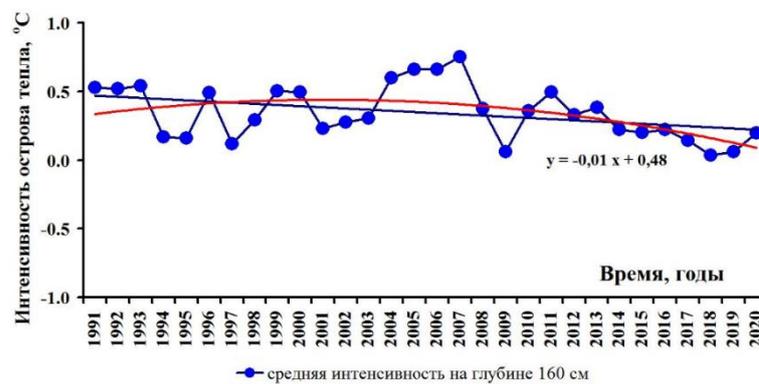
Вместе с тем на глубине 160 см по данным измерений на пяти метеостанциях отмечено, напротив, ослабление «подземного острова тепла», причем усиливающееся со временем, что подтверждается и линейным, и параболическим трендами (рис.2 в). К возможным причинам этого можно отнести как изменения в режиме увлажнения почвы в городе и за городом, так и неполную показательность условий измерений и неполную однородность рядов данных на этих станциях.



а) в приземном слое воздуха;



б) в поле температуры поверхности;



в) на глубине 160 см.

Примечание. Черные линии – линейные тренды; красные линии – параболические тренды

Рис. 2. Многолетние изменения интенсивности «острова тепла» Москвы

Выводы. 1. Интенсивность «острова тепла» Москвы составляет ныне ~1 и 2 °С при сравнении соответственно всей площади города и его центра с сельской местностью на высоте 2 м; 2,6 °С в поле температуры поверхности и 0,3 °С на глубине 1,6 м.

2. Годовой ход «острова тепла» сильнее выражен на поверхности по данным спутников, где он отмечен максимумом летом и минимумом поздней осенью.

3. За последние 30 лет усиление «острова тепла» и в приземном воздухе, и на поверхности замедлилось вследствие социально-экономических причин; в верхних горизонтах почвы отмечено ослабление явления.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 23-27-00279.

Библиографические ссылки

1. *Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A.* Urban Climates. Cambridge, UK: University Press, 2017. 525 P.

2. *Локощенко М. А., Енукова Е. А.* Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным. Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 50-63.

3. *Lokoshchenko M. A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2017. Vol. 56. № 10. P. 2729-2745.

4. *Lokoshchenko M. A.; Alekseeva, L. I.* Influence of Meteorological Parameters on the Urban Heat Island in Moscow. Atmosphere. 2023. Vol. 14. Issue 3. 507.

5. *Локощенко М. А., Енукова Е. А., Алексеева Л. И.* О современных изменениях «острова тепла» Москвы. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2023, том 511, № 2. С. 243-253.

6. *Lokoshchenko M. A., Korneva I. A.* Underground urban heat island below Moscow city. Urban Climate. 2015. Vol. 13. P. 1-13.