

УДК 551.584.5 551.584.41

Е. А. Сорокина, М. А. Локощенко

Поверхностный «остров тепла» в Москве по данным спутников

Представлены результаты анализа снимков московского региона, полученных полярно-орбитальными спутниками “Aqua” и “Terra” за период с 2009 по 2013 гг. Приведены средние оценки интенсивности как поверхностного «острова тепла» г. Москвы в целом (2,6 °С), так и локальных «островов холода», связанных с отдельными лесопарковыми зонами внутри столицы (в среднем по выборке из 22 городских лесов и парков площадью более 0,5 кв. км составило –1,3 °С).

Ключевые слова: остров тепла, космические снимки, городские парки, AQUA, TERRA.

Об авторах

Сорокина Евгения Александровна – аспирант кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна». 171502, Тверская область, г. Кимры, ул. Ильинское шоссе, дом 41, кв. 51. *E-mail: black_cat_05.05@mail.ru.*

Локощенко Михаил Александрович – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ.

Городские «острова тепла», т.е. более высокая температура воздуха (T_B) и поверхности ($T_{П}$) внутри города по сравнению с окружающей его сельской местностью, присущи большинству городов и даже малых населённых пунктов (посёлков и деревень) – во всяком случае, в средних и высоких широтах [4; 5]. Это явление известно с первой половины XIX в., впервые оно было открыто знаменитым английским метеорологом-любителем Л. Говардом на примере г. Лондона. Повышению температуры воздуха в городах способствуют более высокая теплоёмкость искусственных покрытий (асфальта, бетона и пр.), меньшие затраты тепла на испарение осадков и транспирацию растениями, особенности радиационного баланса (городская индустриальная дымка, препятствующая ночному выхолаживанию), а также прямые выбросы тепла, связанные с человеческой деятельностью.

Обычно «острова тепла» изучаются по данным наземной сети метеорологических станций. Эти данные отличаются высокой надёжностью, многие станции имеют вековые ряды наблюдений, однако плотность наземной сети сравнительно мала (в России одна станция при-

ходит в среднем на 10,5 тыс. км²), поэтому выявить пространственные закономерности в среднем и местном масштабе зачастую не удаётся. Гораздо более подробные сведения о пространственном поле температуры можно получить либо посредством специальных маршрутных съёмок с помощью передвижных измерительных платформ (автомобилей или велосипедов, оснащённых датчиками), либо с использованием космических снимков в инфракрасном тепловом диапазоне. Однако маршрутные съёмки проводятся редко, тогда как спутниковые измерения постоянны и регулярны.

Анализ интенсивности городского «острова тепла» (т.е. разности температуры в городе и за его пределами) для условий Москвы по данным метеостанций о температуре воздуха приведён, например, в [9]. Нашей задачей явилось исследование «острова тепла» применительно к температуре поверхности с высоким пространственным разрешением по многолетним данным двух полярно-орбитальных спутников. Спутниковые данные широко используются для изучения особенностей поля температуры поверхности в разных городах, например в Будапеште (Венгрия) [11], в Эрбиле (Ирак) [12] и пр. Однако применительно к Москве до сих пор рассматривались лишь отдельные примеры спутни-

ковых снимков [3]. Новизна данной работы заключается в оценке интенсивности поверхностного «острова тепла» на основе большой выборки данных; предварительные результаты авторов опубликованы в [7; 8; 10].

Методика анализа спутниковых данных

На сегодняшний день накоплены многолетние архивы спутниковых данных, представляющие собой ценный источник сведений о термической структуре земной поверхности. В отличие от наземных станций, где температура поверхности измеряется лишь на специальных вскопанных площадках размером 4×6 м, установленные на спутниках радиометры позволяют регулярно и с высоким пространственным разрешением измерять температуру реальной поверхности T_p . В большинстве случаев речь идёт о подстилающей поверхности открытых пространств, однако при зондировании лесных массивов с высокой сомкнутостью крон деревьев или плотной жилой застройки измеряется соответственно температура поверхности этих крон или крыш отдельных зданий.

Наиболее доступным и многолетним источником данных для московского региона служат космические снимки полярно-орбитальных спутников “Aqua” и “Terra” серии Earth Observing System, на которых установлен спектральный радиометр MODIS. Пространственное разрешение этих снимков составляет 1 км, а точность измерения температуры поверхности $\pm 0,1$ °C [13]. Пролёт обоих спутников над центром европейской России осуществляется ежедневно поздним утром и в начале дня: как правило, с 11 до 12 ч – “Terra”, с 13 до 14 ч – “Aqua” по зимнему московскому времени. Спутник

“Aqua” обычно пролетает на 1 час 50 мин позднее “Terra”. Мы исследовали все снимки московского региона обоих спутников за пять лет: с 2009 по 2013 гг. (всего – 3652). Однако, к сожалению, в условиях нашего климата лишь малая часть снимков пригодна для анализа.

Во-первых, облачный покров непроницаем для электромагнитных волн в оптическом диапазоне, включая инфракрасное излучение. Это приводит к тому, что радиометр при наличии облаков измеряет температуру их верхней границы, а не подстилающей поверхности. Средний балл покрытия облаками в Москве по данным многолетних наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ составляет 7,7 (т.е. 77%) за период с 1954 по 2007 гг. [1]. В наших климатических условиях облака зачастую занимают большую часть космического снимка региона (рис. 1а). Однако для корректного анализа пространственного поля температуры поверхности требуются совершенно безоблачные условия во всём Подмоскovie. Нами были отобраны все случаи, когда доля покрытия облаками, дымкой или шлейфами лесных и торфяных пожаров (например, аномально жарким летом 2010 г.) составляла не более 5% всей площади региона на снимке.

Во-вторых, помимо влияния облачного покрова анализ затруднён нахождением Москвы на краю полосы съёмки, что приводит к сильным геометрическим искажениям и радиометрическим помехам. Пример таких ошибок съёмки приведён на рис. 1б – видно, что конфигурация города искажена, некоторые изображения дублированы (например, центр столицы, лесопарки Сокольники и Кузьминки и пр.). Кроме того, на снимке имеется множество точечных и линейных помех измерений.

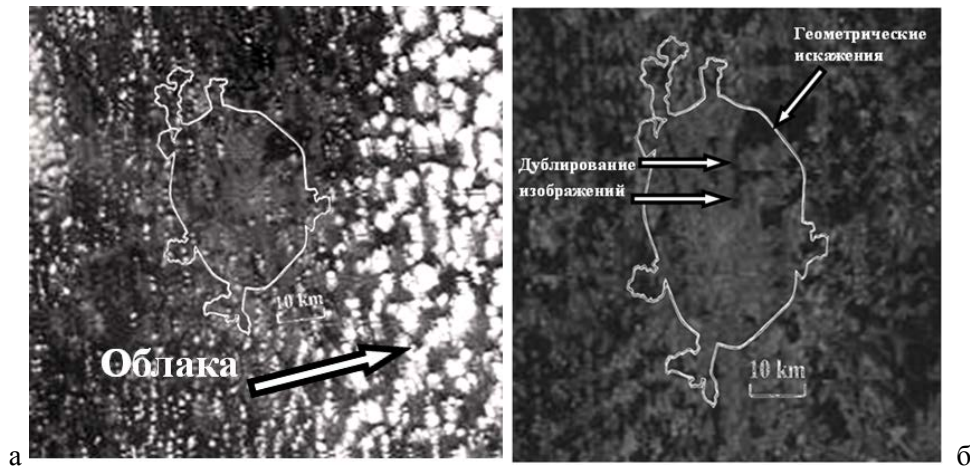


Рис. 1. Примеры снимков спутников *Aqua* и *Terra* Московского региона, непригодных для анализа

Потребовался тщательный визуальный критический контроль для отбора снимков, пригодных для анализа. Оказалось, что за пять лет с 2009 по 2013 гг. Москва находилась в центре полосы съёмки при ясном небе лишь в 108 из 3652 случаев (т.е. их доля составила около 3% от общей выборки снимков). Для обработки данных использовалось программное обеспечение ScanEx Image Processor 4.1, разработанное в ИТЦ СканЭкс.

Заметим важную методическую особенность нашего анализа. Поскольку безоблачные условия обычно связаны с господством антициклонов или гребней, когда «остров тепла» выражен сильнее, то результаты радиометрических измерений, скорее всего, показывают оценки его интенсивности, смещённые в сторону завышения.

Обсуждение результатов

В ходе работы составлены векторные слои, представляющие собой шаблоны границ как Москвы в целом (991 км² вплоть до 2011 г.), так и отдельных лесопарковых территорий площадью $\geq 0,5$ км² (рис. 2). Всего таких лесов и парков в черте города оказалось 22; самый большой из них – природный лес Лосиный остров вместе с парком Сокольники (38,8 км² в пределах МКАД), самый маленький – Ваганьковское кладбище (фактически – озеленённая территория площадью 0,51 км²) [7]. Общая площадь всех 22 лесопарковых зон составила 126 км², т.е. 13% площади столицы в её традиционных границах. К сожалению, для анализа лесопарковых зон нам

пока доступны лишь 85 из 108 имеющихся спутниковых снимков. Полученные в целом для города оценки $T_{\text{п}}$ сопоставлялись с результатами измерений этого показателя в Подмосковье в условных границах, заданных в виде прямоугольника площадью 105 599 км², в который вписаны административные границы Московской области.

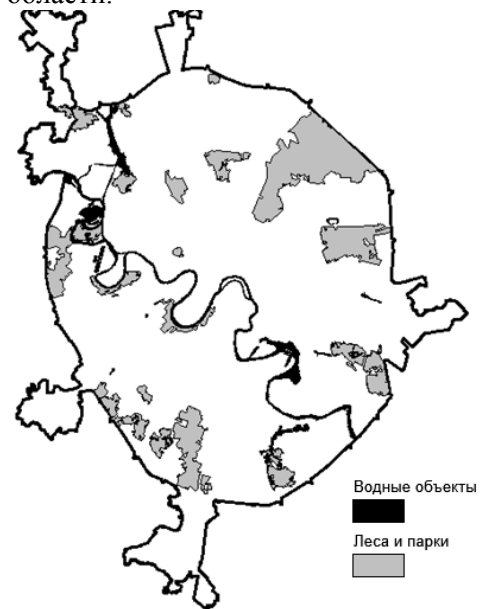


Рис. 2. Шаблоны границ лесопарков и поверхности открытой воды в Москве, созданные авторами для анализа спутниковых снимков (сплошной тёмной линией показаны традиционные (до 2011 г.) границы Москвы)

Сводные результаты работы представлены в таблице. Заметим, что значения температуры поверхности отличаются от используемой обычно температуры воздуха, измеряемой на высоте 2 м на метеорологических станциях. Поэтому предметом нашего изучения служит именно поверхностный городской «остров тепла». С другой стороны, приведённые ниже оценки – смещённые по сравнению со средними значениями, поскольку нам доступна лишь частная выборка безоблачных дней. Очевидно, такие дни наблюдаются в антициклональных условиях, т.е. обычно связаны с жаркой погодой летом и морозами зимой.

Как видим, интенсивность поверхностного «острова тепла», т.е. разность значений T_{Π}

в городе и в сельской местности, в среднем за год составляет $2,6^{\circ}\text{C}$. Данная оценка – более надёжная по сравнению с приведённой нами ранее в [10] $-2,8^{\circ}\text{C}$, – поскольку прежнее значение было получено как простое среднее по всей выборке. Уточнённая же оценка рассчитана теперь как среднее из 12 среднемесячных значений, т.е. нормирована на изменения интенсивности в годовом ходе (с приданием равного веса данным за каждый месяц).

Наибольшая интенсивность в годовом ходе наблюдается летом ($3,6^{\circ}\text{C}$), а наименьшая – осенью ($1,1^{\circ}\text{C}$). Отметим также ярко выраженную асимметрию условий переходных сезонов: весной в городе T_{Π} заметно больше, нежели осенью.

Средние значения температуры поверхности по спутниковым данным в московском регионе за период 2009–2013 гг., $^{\circ}\text{C}$

Локация	Время года				Среднее за год
	Зима	Весна	Лето	Осень	
Выборка 108 снимков					
Город	-13,6	11,0	30,3	8,2	9,0
Сельская местность	-16,2	7,9	26,7	7,1	6,4
Выборка 85 снимков					
Городские парки	-13,6	9,9	28,4	8,2	8,2
Остальная часть города	-13,1	11,5	30,9	8,8	9,5

Интенсивность «островов холода» внутри Москвы, т.е. разность средних значений T_{Π} внутри городских парков площадью не менее $0,5 \text{ км}^2$ и в остальной незалесенной части города, рассчитана нами по выборке из 85 космических снимков. В итоге среднее значение их интенсивности за период наблюдения с 2009 по 2013 гг. составило $-1,3^{\circ}\text{C}$. Отрицательный знак отображает охлаждающее влияние парков. Также можно заметить, что интенсивность «островов холода» имеет хорошо выраженный годовой ход: она наибольшая летом ($-2,5^{\circ}\text{C}$) и наименьшая зимой и осенью (лишь $-0,5 \dots -0,6^{\circ}\text{C}$); весной же составляет промежуточное значение. Такой ход связан с изменениями, происходящими в растительном покрове со сменой времен года. На территории Москвы преобладают широколиственные породы деревьев, и время их активной вегетации и транспирации, приводящие к дополнительным

затратам тепла, весной длится дольше, нежели осенью после опадания листьев.

Помимо зелёных зон нами создан также векторный слой поверхности открытой воды (рис. 2); все границы берегов тщательно определены с высокой точностью: в большинстве случаев – вплоть до нескольких метров, особенно вдоль края каменных набережных в центральной части столицы. Лишь на отдельных отмелях и на некоторых участках низкой поймы, где линия природного берега чётко не прослеживается, эта точность меньше. Всего выявлено и околонуено 26 водных объектов, включая Москву-реку и отдельные пруды площадью не менее $0,1 \text{ км}^2$. Даже столь малая площадь принималась нами во внимание, если несколько прудов находились рядом, и в своей совокупности их поверхность могла превысить половину единичной километ-

ровой ячейки. Общая площадь всех водных объектов составила таким образом 29,0 км². Методическая сложность этой части анализа заключается в их малом размере: ширина русла Москвы-реки в черте города составляет лишь от 120 до 200 м, и обширных прудов либо озёр в столице также нет. В связи с этим разрешение данных спутников *Terra* и *Aqua* недостаточно для подробного анализа столь малых объектов: в каждую единичную ячейку площадью 1 км², соответствующую водной поверхности, входит также окружающая эту поверхность суша. Тем не менее, отметим полученные результаты. В среднем за год температура открытой воды мало отличается от всей остальной территории города, причём ярко выражен маятниковый характер этих различий: в холодный период года водные объекты в среднем теплее городской суши на 0,3 °С, а в тёплый – холоднее на 0,2 °С. Возможно, обе полученные оценки занижены по абсолютной величине, поскольку расчётные ячейки водных объектов включают также их берега. Изменение же знака разности температур в зависимости от сезона неудивительно с учётом большей тепловой инерции воды по сравнению с сушей. Нужно учесть и то, что ледостав на Москве-реке из-за тёплых промышленных сбросов неустойчив, так что поверхность реки даже зимой зачастую остаётся открытой. Более точные оценки термического влияния открытой воды можно получить с использованием данных спутников с большим пространственным разрешением, например серии Landsat.

Рассмотрим также особенности поля температуры поверхности во всём московском регионе, рассчитанного по данным той же выборки снимков за период 2009–2013 гг. с шагом расчётной сетки 15 км (рис. 3). Как видно, помимо ярко выраженной тепловой аномалии над Москвой прослеживается также заметное увеличение T_{Π} к востоку и юго-востоку от столицы. Наибольшие её значения в среднем за год вплоть до +8 °С и даже более отмечаются в приграничных районах соседней Рязанской области. Самая малая T_{Π} от 1 до 2 °С наблюдается на северо-западе Подмосковья.

Чтобы понять причины подобного распределения поля температуры поверхности в пространстве, рассмотрим физико-географические

особенности московского региона. Так, карта лесистости Подмосковья по отдельным районам показывает, что доля площади земель лесного фонда в общей площади районов наименьшая как раз на юго-востоке Московской области (в среднем от 10 до 30%), а в двух крайних южных районах, Зарайском и Серебрянопрудском – даже менее 10%. Средняя же по всей области лесистость составляет около 40%. Очевидно, что безлесные открытые участки в целом более сухие и более тёплые по сравнению с поверхностью крон деревьев. Кроме того, Мещёрская низменность к востоку от столицы характеризуется преобладанием песчаных и супесчаных почв [2] – в среднем также более сухих и более тёплых по сравнению с суглинками. Примечательно, что очень сходное распределение с наибольшими значениями к юго-востоку от Москвы показывают также карты средней температуры воздуха $T_{\text{В}}$ в июле, а также суммы $T_{\text{В}} > 10$ °С [6]. Мячкова и Сорокина объясняют это повышение увеличением летом повторяемости вхождений тёплых тропических воздушных масс из Казахстана и Средней Азии по направлению к юго-востоку от Москвы. Таким образом, поле средних значений T_{Π} в Московском регионе не сводится только к географической зональности и отражает действие разных факторов.

Что же касается поверхностного «острова тепла» над столицей, он проявляется на рис. 3 в виде одной концентрически замкнутой и ещё одной полукруглой изотерм. В среднем по всем четырём ячейкам расчётной сетки, характеризующим здесь Москву, T_{Π} составляет 5,5 °С; во всех остальных 458 ячейках вне Москвы $T_{\Pi} = 3,2$ °С, и только в ближнем Подмосковье с радиусом 45 км от границ города (в среднем для 60 ячеек вокруг столицы) $T_{\Pi} = 3,5$ °С. Разумеется, приведённая выше в таблице оценка интенсивности поверхностного «острова тепла» более точная, поскольку получена по данным с более высоким разрешением. Очевидно также, что более высокая средняя температура поверхности в ближнем Подмосковье отражает влияние крупных ближних пригородов столицы, каждому из которых присущ свой собственный «остров тепла». С увеличением же радиуса области сравнения сильнее проявляется климатическая зональ-

ность, требующая отдельного учёта. Таким образом, вопрос о наиболее точной оценке интенсивности «острова тепла» в зависимости от ра-

диуса рассматриваемых окрестностей города методически непросто и требует дальнейшего осмысления.

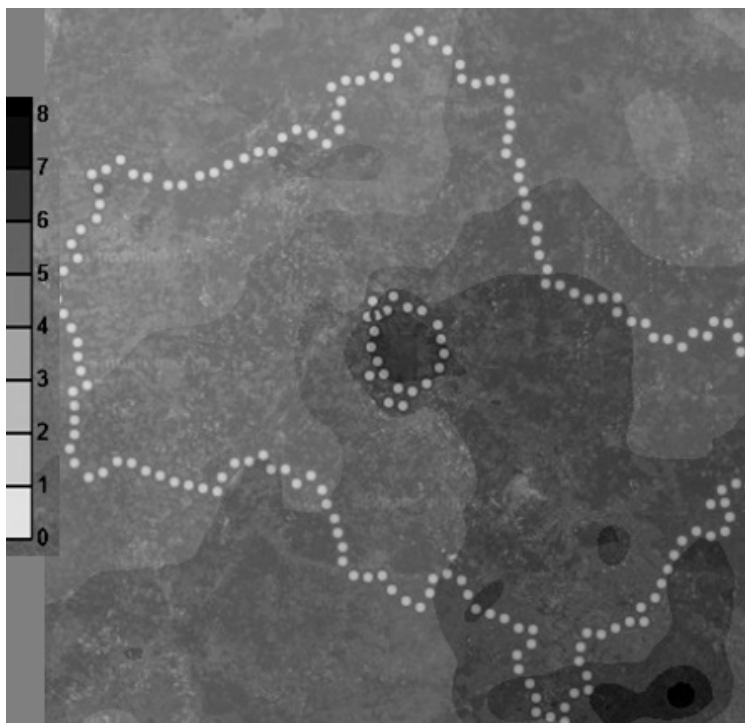


Рис. 3. Карта средней температуры поверхности московского региона по данным спутников *Aqua* и *Terra* за 2009–2013 гг. Тоновая шкала температуры в °С приведена слева; белыми точками показаны границы Москвы и Московской области

Авторы благодарят М.В. Зимина и его коллег из Инженерно-технологического центра СканЭкс за предоставление программы и консультации. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 14-05-00594, а также, в части общих оценок интенсивности острова тепла, при поддержке РФФ, проект № 16-17-10275.

Библиографический список

1. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 312 с.
2. Атлас Московской области. М.: ГУГиК, 1964.

3. Балдина Е.А., Грищенко М.А. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat-4/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 62–69.
4. Кратцер П.А. Климат города. М.: Иностран. лит-ра, 1958. 240 с.
5. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоздат, 1983.
6. Мячкова Н.А., Сорокина В.Н. Климат Московской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 54 с.
7. Сорокина Е.А., Локощенко М.А. Острова холода в Москве // Труды пятого Международного экологического конгресса ELPIT-2015, Самара – Тольятти, 16–20 сентября 2015. Тольятти, СНЦ РАН, 2015. Т. 5. С. 254–261.
8. Сорокина Е.А., Локощенко М.А. «Остров тепла» в Москве по спутниковым данным // Тезисы докладов XX Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное

электричество. Климатические эффекты», с. Безводное, Нижегородская область, 24–26 мая 2016 г. Нижний Новгород, типография Института прикладной физики РАН, 2016. С. 47–48.

9. Lokoshchenko M.A. Urban «heat island» in Moscow // Urban Climate. 2014. Vol. 10, part 3. P. 550–562.

10. Lokoshchenko M.A., Sorokina E.A. Urban “heat island” in Moscow by satellite data // Proceedings of the 9th International Conference of Urban Climate, Toulouse, France, 2015. Paper index: 11-7-3911378.

11. Pongracz R., Bartholy J., Lelovics E., Dezso Z., Dobi I. Satellite- and ground-based urban heat effect

of the Budapest agglomeration area. Proceedings of the 8th International Conference of Urban Climate, Dublin, Ireland, 2008. Paper index 486.

12. Rasul A., Balzter H., Smith C. Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8 // Urban Climate. 2015. Vol. 14, part 2. P. 176–186.

13. Steitz D. et al. Terra: flagship of the Earth Observing System // NASA press kit, release No. 99-120. 1999. 26 p.

*Поступила в редакцию
14.04.2017*