

Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным

М. А. Локощенко*, ***, ***, Е. А. Енукова**

Представлены результаты измерений температуры поверхности в Московском регионе со спутников “Aqua” и “Terra” за 2008—2015 гг. Выявлены тесные связи радиометрических данных с температурой воздуха и поверхности земли по данным Метеорологической обсерватории МГУ, однако летом стационарные оценки температуры поверхности завышены на 15°C из-за сильного нагрева площадки с напочвенными термометрами. Средняя интенсивность поверхностного острова тепла Москвы T составила 2,6 С, она мало зависит от выбора границ области сравнения с городом (на расстоянии >60 км различия не превышают $\pm 0,1$ С). Численные эксперименты показали, что при покрытии облаками не более 20% площади Москвы и 50% площади региона смещение в оценках T мало ($\pm 0,2$ ее значения). Интенсивность острова тепла Москвы в поле температуры воздуха по данным наземной сети в часы пролета спутников меньше, чем в поле температуры поверхности по данным спутников, вследствие невысокой плотности сети и неполной репрезентативности стационарных данных: четыре из пяти столичных станций находятся в парковых зонах. По данным наземной сети интенсивность приземного острова тепла в часы пролета спутников днем приблизительно втрое меньше среднесуточного значения. В то же время оценка T по данным спутников завышена на ~40% из-за влияния усиливающих остров тепла антициклональных условий, при которых возможен анализ снимков. В годовом ходе интенсивность острова тепла T наибольшая в июне и июле (~4,0 С) и наименьшая в ноябре (0,7 С). В поле температуры поверхности Московского региона проявляется также географическая зональность: общее увеличение значений к юго-востоку.

Ключевые слова: радиометрические спутниковые данные, температура воздуха, температура поверхности, остров тепла, Московский регион, географическая зональность распределения температуры.

1. Введение

Городской остров тепла — явление, впервые открытое в начале XIX в. Л. Говардом в Лондоне [19]. Оно присуще подавляющему большинству городов и даже малым населенным пунктам [2, 5, 8, 10, 14] во всех климатических поясах и зонах, кроме городов-оазисов в сухих тропиках, которые, напротив, могут быть островами холода в окружающей пустыне [23]. Как известно, к повышению температуры воздуха в городах приводят более высокая теплоемкость искусственных покрытий (асфальта, бетона и пр.),

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: loko@geogr.msu.ru (Локощенко Михаил Александрович).

** Государственный университет “Дубна”.

*** Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук.

уменьшение затрат тепла на испарение осадков (вследствие их искусственного стока) и на транспирацию растениями, особенности радиационного баланса (городская индустриальная дымка, препятствующая ночному выхолаживанию), а также прямые выбросы тепла, связанные с деятельностью человека. Применительно к Москве закономерности приземного острова тепла исследованы, например, в работах [6, 9, 15, 17, 22—24]. Очевидно, что это явление трехмерно; связанная с островом тепла температурная аномалия на высотах над столицей описана в работе [11], явление подземного острова тепла в поле температуры почвы и грунта на разных глубинах под Москвой исследовано в работе [25].

Обычно острова тепла в поле температуры воздуха T_v изучаются по данным метеорологической сети на стандартной высоте установки термометров — 2 м. Сетевые данные, как правило, надежны и регулярны, но плотность наземной сети сравнительно мала. Более подробные сведения о пространственном поле температуры можно получить с использованием либо специальных маршрутных съемок на передвижных измерительных платформах — автомобилях или велосипедах, оснащенных датчиками (однако маршрутные съемки дороги и проводятся редко), либо с помощью спутниковых снимков в инфракрасном тепловом диапазоне (эти измерения постоянны и регулярны).

Изучение городских островов тепла в поле температуры поверхности T_c на примерах отдельных спутниковых снимков было начато в 1970-х годах применительно к Вашингтону и Балтимору (США) [10]. Использование радиометрических данных открыло возможность исследования тепловых аномалий с пространственным разрешением ~ 1 км, а с помощью некоторых космических систем (например, спутников серии “Landsat”) — даже до десятков метров. В настоящее время анализ многолетних радиометрических спутниковых измерений проведен для Рима (Италия) [18], Бангкока (Таиланд) [21], Будапешта (Венгрия) [29], Эрбила (Ирак) [30], Афин (Греция) [31], 28 городов севера Западной Сибири [27] и для многих других мест. В некоторых случаях изучают лишь примеры отдельных снимков, например для условий Скопье (Македония) [20] и Калькутты (Индия) [28]. Обычно для анализа островов тепла используют данные спутников либо серии “Landsat” [4, 20, 21, 28, 31], либо “Terra” и “Aqua” [29, 31], иногда — данные других, например “ENVISAT” [18]. Достоинством радиометрических данных спутников серии “Landsat” является их высокое разрешение, а спутников “Terra” и “Aqua” — большая выборка снимков, поскольку зондирование Московского региона производится каждым из них 2 раза в сутки. Применительно к Москве в литературе до сих пор были приведены лишь отдельные примеры спутниковых снимков [4]. Задачей авторов явилось исследование острова тепла в Московском регионе на уровне поверхности с высоким пространственным разрешением по многолетним данным двух спутников — за 2008—2015 гг. Предварительные результаты анализа за период 2009—2013 гг. опубликованы в работах [16, 26].

2. Спутниковые данные и методические особенности их анализа

Наиболее надежным многолетним источником данных о температуре поверхности Московского региона служат снимки полярно-орбитальных

спутников “Aqua” и “Terra” серии NASA EOS (Earth Observing System), на которых установлены спектральные радиометры серии MODIS. Они осуществляют съемку на 36 каналах в диапазоне от 0,45 до 14,36 мкм. Обзорность (ширина полосы съемки) составляет 2330 км, однако на краях этой полосы качество данных ухудшается. Пространственное разрешение измерений температуры поверхности — 1 км при радиометрическом разрешении 12 бит, а их точность для условий суши ± 1 С [32]. Для вычисления температуры поверхности по данным радиометра MODIS использовался стандартный продукт Land Surface Temperature (LST). Температура поверхности в нем рассчитывается исходя из спектральной яркости двух каналов съемки — 31-го и 32-го с длинами волн 10,78—11,28 и 11,77—12,27 мкм соответственно. Калибровка данных осуществляется в зависимости от широты местности, зенитного угла радиометра и влажности воздуха. Помимо наличия облаков или дымовых шлейфов, на точность измерения температуры поверхности влияют также неоднородный рельеф, радиометрические помехи и т. п. Используемая авторами программа ScanEx Image Processor Инженерно-технологического центра “СканЭкс” осуществляет автоматический контроль данных о температуре поверхности и удаляет все ячейки с заведомо нереальными низкими значениями, означающими температуру верхней границы облаков. Следует учитывать методические особенности измерений с этих спутников: в большинстве случаев значения T_c характеризуют температуру подстилающей поверхности открытых пространств, однако при зондировании лесных массивов с высокой сомкнутостью крон деревьев или плотной жилой застройки измеряется температура поверхности этих крон или крыш отдельных зданий.

Для анализа использованы дневные снимки: со спутника “Terra” — в 11—12 ч по московскому времени, со спутника “Aqua” — в 13—14 ч (данные ночного зондирования ненадежны, поскольку Москва находится на краю полосы съемки или за ее пределами). В процессе работы потребовался тщательный критический контроль и визуальный отбор снимков, поскольку при наличии облаков радиометр измеряет температуру их верхней границы, а не подстилающей поверхности. Исключались также случаи, когда Москва находилась на краю полосы съемки (это приводит к сильным искажениям и радиометрическим помехам).

При работе с данными спутников требуется решить ряд методических вопросов:

- сравнить их с данными метеорологической сети;
- оценить влияние размера области осреднения данных на интенсивность поверхностного острова тепла;
- выявить наибольший балл покрытия снимка облаками, при котором анализ этого острова еще возможен;
- оценить смещение оценок среднесуточной интенсивности поверхностного острова тепла из-за использования данных спутников при их пролете в дневное время;
- оценить смещение оценок среднемесячной и средней за год интенсивности острова тепла из-за влияния выборки только антициклональных условий, при которых облака бывают редко и данные о температуре поверхности доступны.

Важно учитывать принципиальное различие между точечными станционными оценками температуры поверхности T_n и данными радиометрических измерений T_c с борта спутников, осредненными по большой площади. Оно создает неизбежный разброс при сравнении спутниковых и станционных данных.

Такое сравнение проведено с использованием выборки 163 снимков Москвы с обоих спутников при безоблачной погоде в 2011—2013 гг., причем радиометрические данные о T_c в ближайшей к положению станции единичной ячейке площадью 1 км^2 были сопоставлены с результатами измерений в Метеорологической обсерватории Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МО МГУ) как температуры поверхности T_n , так и температуры воздуха T_v на высоте 2 м. Температура воздуха определялась по данным станционного термографа в час, ближайший к времени пролета спутника (пролет над Московским регионом длится $\sim 5 \text{ мин}$). Температура поверхности измеряется на станциях раз в 3 ч, для сравнения с данными спутников также использовался ближайший по времени отсчет. Если пролет спутника приходился точно на середину промежутка между отсчетами, то для сравнения с его данными рассчитывалась средняя величина между соседними часовыми значениями T_v или соседними трехчасовыми значениями T_n . Результаты представлены на рис. 1. Ниже приведены средние значения и среднеквадратические отклонения разностей температуры поверхности по данным спутников T_c и температуры воздуха T_v и поверхности T_n по станционным данным МО МГУ в 2011—2013 гг.:

Период	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
$T_c - T_v$	$-0,8 \pm 2,1$	$0,8 \pm 3,5$	$2,8 \pm 2,1$	$-0,3 \pm 2,2$	$0,9 \pm 3,0$
$T_c - T_n$	$2,1 \pm 3,4$	$-6,2 \pm 7,6$	$-15,0 \pm 5,4$	$-3,4 \pm 3,8$	$-6,5 \pm 8,6$

Как видно на рис. 1, связь в обоих случаях близка к линейной и весьма тесная: коэффициент корреляции R составил 0,98 при сравнении T_n и T_c и даже 0,99 при сравнении T_v и T_c . Однако коэффициент линейной регрессии k в уравнениях различен: если при сравнении T_v и T_c он близок к 1 (1,09), то при сравнении T_n и T_c велико смещение оценок ($k = 0,68$).

Очевидной причиной этого являются повышенные значения станционных измерений температуры поверхности почвы в теплое время года вследствие сильного нагрева в околополуденные часы лишенной травяного покрова вскопанной площадки размером $4 \times 6 \text{ м}$, на которой устанавливаются напочвенные термометры [13]. Наибольший нагрев наблюдается летом — площадка в это время года в среднем на 15 С теплее близлежащей естественной поверхности (травы и крон деревьев). Влияние иных возможных причин различий в оценках T_c и T_n (небольшого занижения T_c на уровне крон деревьев и пр.) мало.

Лишь зимой, когда термометры ТМ-3 установлены на поверхности снежного покрова, их отсчеты показательны для окружающей местности и различия между T_c и T_n наименьшие. Заметим, что район МГУ характеризуется парковыми зонами (Ботанический сад и пр.). Городская застройка в радиусе 1 км здесь разрежена, и оголенного грунта в окрестностях МО МГУ также почти нет. В результате, вопреки ожиданиям, с температурой

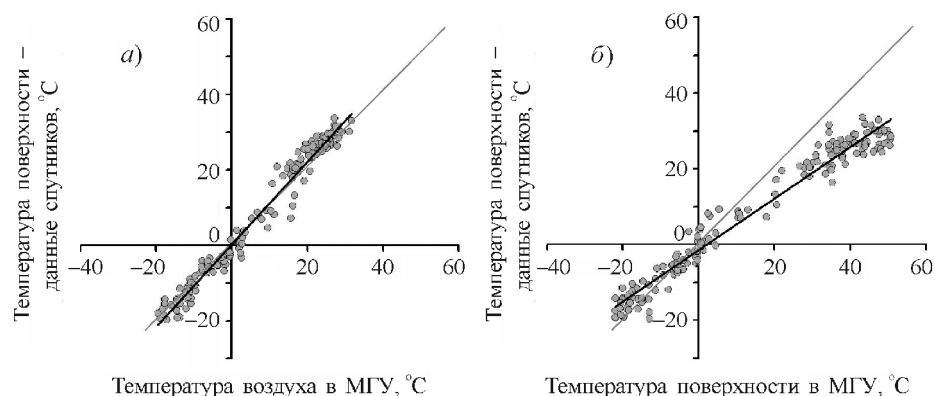


Рис. 1. Сравнение спутниковых данных о температуре поверхности со стационарными данными о температуре воздуха (а) и поверхности (б) в Метеорологической обсерватории МГУ.

Жирные линии — линейные тренды; тонкие линии — соответствие “один к одному”; уравнения линейной регрессии и значения стандартного показателя R^2 достоверности тренда: а) $y = 1,09x + 0,16$; $R^2 = 0,98$; б) $y = 0,68x - 1,45$; $R^2 = 0,96$.

поверхности по данным спутников гораздо лучше соотносятся стационарные данные о температуре воздуха, чем о температуре поверхности: средняя по всей выборке разность T_c и T_b составляет менее 1 °C, тогда как значение T_n в среднем за год больше T_c на 6,5 °C. Полученный результат подтверждает, что температура поверхности вскопанных площадок не отражает фоновые условия окружающей станцию местности, особенно в теплый сезон. Заметим, что сравнение значений T_c и T_b в Будапеште показало их разность от 1,1 до 6,6 °C днем и от –1,1 до –1,8 °C ночью в зависимости от времени года [29].

Под интенсивностью поверхностного острова тепла, т. е. связанной с влиянием города тепловой аномалии в поле температуры поверхности, будем понимать среднюю разность значений T_c по выборкам всех городских и всех загородных единичных ячеек площадью 1 км²:

$$T_c = \frac{\sum_{j=1}^n T_{Г,j}}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{З,j}}{m},$$

где n и m — число ячеек в Москве и в Подмоскowie соответственно; $T_Г$ и $T_З$ — температура поверхности в каждой из ячеек соответственно в городе и за его пределами.

Подобный подход сравнения с сельской местностью не только городского центра, но и всей площади города в целом использован также в работах [22, 23]. Разумеется, на территории Москвы имеются обширные леса и парки, создающие местные острова холода; их отдельный анализ приведен в работах [16, 26]. С другой стороны, в окружающей столицу местности много городов и деревень, поверхность которых в большей или меньшей степени урбанизирована. Неучет того и другого влияет на оценку

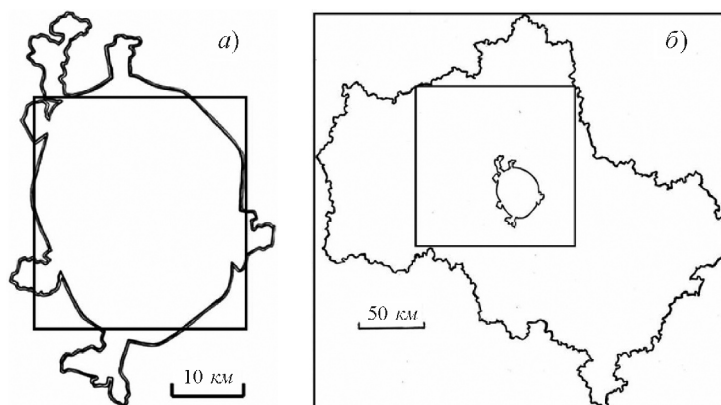


Рис. 2. Границы расчетных областей Москвы (а) и Подмосковья (б).

интенсивности поверхностного острова тепла, однако можно считать, что это влияние невелико.

Важно понимать, насколько устойчивы в пространстве оценки интенсивности поверхностного острова тепла. Для изучения были выбраны разные варианты геометрического представления и Москвы, и Московской области. Здесь рассмотрена Москва в ее традиционных границах с 1992 до 2011 г., имеющих форму черепахи — основного эллипса (МКАД, построенной в 1961 г.) и выходящих за его пределы шести “протуберанцев” в разных направлениях. Территория столицы была представлена в расчетах двояко: в виде площади, ограниченной реальными границами города (на рис. 2а с точностью до 20 м), либо равновеликого этой площади ($\sim 1000 \text{ км}^2$) квадрата. Внешняя область сравнений с городом была представлена в виде либо точного векторного слоя административных границ Московской области, либо вписанного в них, либо описанного вокруг них прямоугольника.

Параллельные расчеты с использованием грубого (в виде квадрата) и точного представления границ Москвы в сравнении с описанным вокруг Московской области прямоугольником по одной и той же частной выборке данных 63 снимков при ясном небе с 2010 по 2013 г. показали средние значения интенсивности острова тепла соответственно 2,7 и 3,1 С. Таким образом, для гипотетической квадратной Москвы интенсивность поверхностного острова тепла в среднем меньше на 0,4 С (разность составила от 0,4 до $-4,2$ С по данным отдельных снимков); она оказалась меньше в 52 из 63 случаев. Ослабление поверхностного острова тепла в условной “квадратной” Москве неудивительно с учетом большей доли в ее общей площади сравнительно холодных парков вблизи углов квадрата, выходящих за пределы МКАД, — в частности, в его северо-восточном углу оказывается загородная часть природного леса “Лосиный остров”.

Напротив, эксперименты с тремя вариантами границ окружающей столицу территории не выявили заметных смещений оценок. Площадь описанного вокруг Московской области в ее крайних точках прямоугольника составляет $94\,851 \text{ км}^2$; он включает в себя также части пограничных областей. Вместе с Москвой Московская область занимает площадь $46\,570 \text{ км}^2$,

а вписанный в нее прямоугольник — $15\,955\text{ км}^2$. Он охватывает лишь ближайшие к столице районы области, причем сама Москва находится не в его центре, а смещена к юго-востоку (рис. 2б). Параллельные расчеты для всех трех вариантов границ внешней области сравнения с городом были проведены для выборки из 99 снимков за период 2009—2013 гг., во всех трех вариантах Москва была представлена в реальных границах. Оказалось, что средняя интенсивность поверхностного острова тепла почти не изменилась: она составила для описанного вокруг области прямоугольника $2,8\text{ С}$, для реальных границ области $2,7\text{ С}$, для вписанного в нее прямоугольника $2,8\text{ С}$. Таким образом, величина интенсивности острова тепла обладает устойчивостью в пространстве и при удалении от столицы на 60 км и более уже в меньшей степени зависит от выбора границ территории сравнения, в отличие от границ самой Москвы, вблизи которых термическая неоднородность выражена сильнее.

Серьезной проблемой анализа спутниковых данных, как отмечено выше, служит частая плотная облачность, непроницаемая для радиометрических измерений. Так, в Москве средний балл покрытия облаками по данным ежечасных наблюдений в МО МГУ за период с 1954 до 2007 г. составляет $7,7\text{ (77\%)}$ [1]. Практически это выражается в том, что обычно облака занимают либо весь спутниковый снимок Московского региона, либо его значительную часть. Ранее [16, 26] авторами были рассмотрены лишь безоблачные условия во всем Подмоскowie, когда общая доля покрытия облаками, дымкой или шлейфами лесных и торфяных пожаров (летом 2010 г.) не превышала 5% всей площади региона на снимке и Москва при этом находилась в центре полосы съемки. Однако выборка столь идеальных снимков очень мала: она составила 108 из 3652 снимков за 2009—2013 гг., т. е. лишь 3% общего их числа. Получить достоверные оценки годового хода интенсивности поверхностного острова тепла на ее основе затруднительно: ясно, например, что в ноябре безоблачное небо над Москвой — редкость. Поэтому потребовалось определить, при какой доле покрытия снимка облаками его анализ еще возможен, т. е. смещение оценок интенсивности поверхностного острова тепла сравнительно мало.

Для этой цели были отобраны отдельные примеры ясного неба в антициклональных условиях в разные сезоны, когда почти во всех единичных ячейках на всей площади снимка имелись достоверные радиометрические данные о температуре поверхности. Был проведен ряд численных экспериментов с имитацией облаков, в ходе которых из массива значений в пределах векторного слоя границ Московской области ($45\,955$ расчетных ячеек площадью 1 км^2 без учета самой Москвы) попеременно удалялись ячейки с четырех направлений (с запада, севера, юга и востока) числом, кратным 5% их общего количества. Исключенные ячейки представляли воображаемые облака, которые могли в это время существовать над регионом. На каждом шаге после очередного “обрезания” карты Подмоскowie (с исключением 5, 10, 15% ячеек и т. д.) интенсивность поверхностного острова тепла T рассчитывалась отдельно. Требовалось выяснить, в какой мере частичное покрытие снимка облаками приводит к смещению оценок интенсивности острова тепла.

Результаты одного из экспериментов приведены на рис. 3. 6 июня 2011 г. в Москве при сложившихся синоптических условиях наблюдалось полное

отсутствие облаков. Интенсивность острова тепла в поле T_n составила 5,6 С. С увеличением доли покрытия площади Московской области условными облаками смещение оценок интенсивности острова тепла происходит вполне ожидаемо с учетом географической зональности. Так, чем больше площадь Подмосковья сокращается в северной части, тем меньше интенсивность острова тепла, поскольку средняя T_n внутри города соотносится с более теплым югом области. Напротив, при исключении южных районов Подмосковья остров тепла усиливается, так как остающиеся северные ячейки в целом холоднее. Примечательно, что западные ячейки оказывают влияние, качественно сходное с северными, а восточные — с южными. Как известно, географическая зональность в Подмосковье и летом [12], и в среднем за год [7] проявляется в общем повышении T_v по направлению с северо-запада на юго-восток. Даже при исключении на рис. 3 с любого направления половины всей площади Московской области изменение интенсивности острова тепла не превышает 1 С, т. е. 0,2 величины самой интенсивности. Сходные результаты показал и другой эксперимент, проведенный на примере безоблачного дня зимой.

Аналогичные эксперименты с исключением части ячеек в пределах традиционных границ Москвы показали то же самое смещение оценок интенсивности (~0,2 ее величины) при покрытии облаками лишь 20% площади столицы. Видимо, термическая неоднородность в городе выражена сильнее, и, как следствие, интенсивность острова тепла более чувствительна к удалению из расчетов части городской поверхности. По результатам экспериментов было решено считать годными для анализа все спутниковые снимки с отсутствием явных радиометрических помех, с нахождением Москвы в центре полосы съемки и с покрытием облаками не более 20% площади Москвы и не более 50% площади Подмосковья. Всего таких снимков за 8 лет (с 2008 по 2015 г.) оказалось 561 из 5844. Без учета повторных снимков в один и тот же день выборка составила 362 дня, для каждого из которых значения принимались либо по данным одного снимка (если второй не отвечал принятым критериям), либо в виде средних значений по двум снимкам, если оба были хорошего качества.

3. Интенсивность поверхностного острова тепла

Рассмотрим результаты анализа острова тепла Москвы в поле температуры поверхности по данным спутников “Aqua” и “Terra” в среднем за 8 лет. Будем понимать под интенсивностью этого явления разность средних значений T_n в традиционных границах столицы и в пределах прямоугольника, в который вписана Московская область. При осреднении всех приня-

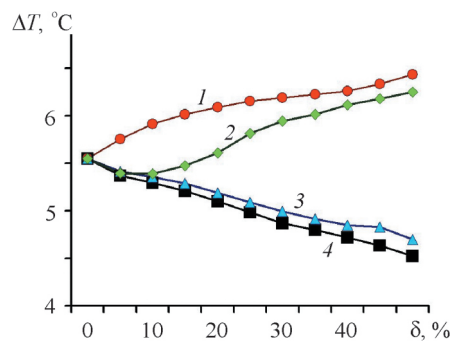


Рис. 3. Результаты численных экспериментов с имитацией облаков в разных частях и в разной доле снимка со спутника: 1 — на юге; 2 — на востоке; 3 — на западе; 4 — на севере.

тых к анализу снимков (561) среднее значение интенсивности поверхностного острова тепла столицы составило $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. В среднем по выборке из 362 значений в отдельные дни с осреднением значений по данным всех парных снимков в один и тот же день величина интенсивности не изменилась: $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако следует учесть возможное смещение средней оценки из-за разной обеспеченности данными отдельных месяцев года: от 11 снимков в ноябре до 48 в марте и мае. При нормировании интенсивности на годовой ход, т. е. при ее расчете как среднего из 12 среднемесячных значений (с одинаковым весом каждого месяца в общей среднегодовой оценке) более точное значение оказалось равным $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заметим, что оно устойчиво во времени: ранее в среднем за меньший период 2009—2013 гг. и по меньшей выборке снимков только в безоблачные дни среднегодовая интенсивность также составила $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ как простое среднее по всей выборке [26] и $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при ее нормировании на годовой ход [16]. Значения T_c в отдельные месяцы изменяются от $0,7$ до $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, явных сезонных закономерностей в их изменении не видно.

В разные дни интенсивность острова тепла изменяется в широких пределах — от $-0,2$ до $7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, по данным отдельных снимков (без осреднения повторных в один и тот же день) ее наименьшее значение достигло $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заметим, что лишь 8 снимков из 561 показали отрицательное значение интенсивности, причем близкое к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В среднем за отдельные дни интенсивность лишь в 3 случаях из 362 была слабоотрицательной. Примечательно, что отрицательные или близкие к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения почти всегда наблюдаются осенью, чаще в ноябре. Так, на ноябрь пришлось все три случая $T_c < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (18 ноября 2013 г., 12 и 8 ноября 2008 г.). Вообще осенние дни составили все первые 16 и 27 из первых 30 самых малых значений интенсивности по выборке из 362 дней. Напротив, наибольшие значения этого показателя наблюдались во все остальные сезоны — так, рекордно большим значением ($7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) было отмечено 16 апреля 2013 г., вторым ($6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) — 12 июня 2011 г., а третьим ($6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) — 19 января 2010 г. и 8 августа 2012 г. Все эти случаи аномально сильного поверхностного острова тепла были связаны с нахождением Москвы в центре антициклона или в малоградиентном барическом поле с высоким фоном атмосферного давления. Наименьшая интенсивность этого явления присуща очень ветреным осенним дням при нахождении столицы в зонах интенсивных градиентных потоков на периферии антициклонов или гребней.

Сравнивать поверхностный остров тепла в поле температуры поверхности с островом тепла в приземном слое воздуха следует с осторожностью и оглядкой, поскольку это разные физико-географические явления. Тем не менее, как известно, интенсивность городских островов тепла на уровне 2 м , часто слабоотрицательная утром, в околополуденные часы так же, как и по данным спутников, обычно близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (примеры приведены, например, в работах [5, 10]). Средняя интенсивность острова тепла в поле T_v в Москве в начале 2010-х годов составляла $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при сравнении данных всех московских и всех подмосковных станций и $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при сравнении данных только центра столицы (станция Балчуг) с данными всех

подмосковных станций [23]. Таким образом, поверхностный остров тепла выражен сильнее, чем остров тепла в приземном слое.

Определить интенсивность поверхностного острова тепла по данным спутников возможно лишь во время их пролета днем. Получить приближительную оценку среднесуточной интенсивности можно с привлечением данных наземной сети. Для этого были использованы результаты ежечасных измерений T_b на четырех московских (МО МГУ, ВДНХ, Балчуг и Тушино) и 13 подмосковных станциях за 2014 и 2015 гг. Интенсивность приземного острова тепла в поле T_b на уровне 2 м, таким образом, рассчитана для $n = 4$ и $m = 13$ по уравнению для расчета T_c . Расчет сделан как для 2 лет (730 дней), так и отдельно за дневной срок 12 ч во все дни.

В среднем за эти 2 года среднесуточная температура воздуха в столице составила 7,49 С, в Подмоскowie 6,46 С; только в полдень — соответственно 9,17 и 8,84 С. Таким образом, среднесуточная интенсивность приземного острова тепла составила по этим данным 1,03 С — как и в среднем за период 2010—2014 гг. [23] с точностью до $\pm 0,1$ С, а интенсивность в 12 ч (среднее время пролета спутников с точностью до часа) — 0,33 С. Можно предположить, что среднесуточная интенсивность поверхностного острова тепла, как и приземного, втрое больше ее полуденного значения и составляет, вероятно, около 7,5—8,0 С.

Следует также учесть неизбежное смещение оценок интенсивности по данным спутников, поскольку ясные и малооблачные дни связаны с антициклональной погодой, при которой остров тепла на любой высоте выражен сильнее. Для оценки этого смещения интенсивность приземного острова тепла по станционным данным была рассчитана отдельно только для часов пролета спутников в безоблачные или малооблачные дни, когда снимки (всего 173 за два года с учетом повторных в один и тот же день) оказались хорошего качества и были приняты к анализу. Разность во времени пролета над регионом спутника и ближайшего отсчета по станционным термографам не превышала 30 мин. Если время пролета приходилось точно на середину часа, то для сравнения с данными спутника использовалось среднее значение между соседними часовыми отсчетами T_b на всех станциях (как и при анализе данных МО МГУ).

Средняя T_b во время пролета спутников за 2 года была 11,45 С в Москве и 10,98 С в Подмоскowie. Таким образом, средняя интенсивность приземного острова тепла по данным наземной сети в часы съемки принятых к анализу снимков составила 0,47 С, т. е. оказалась на 40% больше средней интенсивности в 12 ч за все дни 2014 и 2015 гг. Полученный результат можно считать общей оценкой усиления острова тепла под влиянием антициклональных условий. Можно предположить, что эта оценка близка и для приземного, и для поверхностного островов тепла. Вероятно, средняя интенсивность поверхностного острова тепла в середине дня с учетом облачных дней, для которых радиометрических данных нет, также приблизительно в 1,5 раза меньше по сравнению с полученным выше значением, т. е. составляет немногим менее 2 С.

Заметим также, что интенсивность приземного острова тепла Москвы в поле температуры воздуха по данным наземной сети в часы пролета спут-

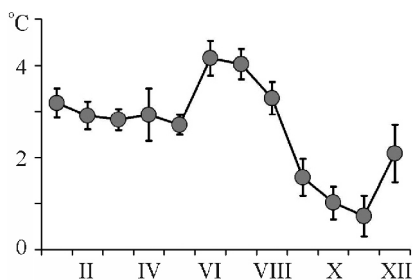


Рис. 4. Годовой ход интенсивности поверхностного острова тепла в Москве.

Доверительные интервалы рассчитаны с вероятностью 0,95.

ников значительно меньше, чем в поле температуры поверхности. Отчасти это следствие недостаточно высокой плотности сети и неполной репрезентативности станционных данных: четыре из пяти столичных метеостанций (МО МГУ, ВДНХ, Тушино и Обсерватория им. Михельсона) находятся в парковых зонах, и лишь станция Балчуг отражает условия плотной городской застройки.

Анализ годового хода интенсивности поверхностного острова тепла столицы (рис. 4) показывает, что ее наибольшие значения (около 4°C) наблюдаются в начале и середине лета — в июне и июле, а наименьшие (0,7°C) — поздней осенью, в ноябре; зимой и весной значения промежуточные. С учетом доверительных интервалов очевидно, что различия с уровнем значимости 5% статистически достоверны как между условиями июня и июля и зимними и весенними месяцами, так и между зимними и весенними (кроме декабря) и осенними месяцами. Заметим, что различия между наибольшими летними и наименьшими осенними значениями интенсивности острова тепла остаются значимыми при сколь угодно большой доверительной вероятности (даже при 0,9999). Различия в интенсивности поверхностного острова тепла создаются контрастом термических и радиационных свойств поверхности в городе и за его пределами. Наибольшая интенсивность в середине лета, вероятно, объясняется наиболее активной в это время фазой вегетации и, следовательно, наибольшими затратами тепла на транспирацию растениями в сельской местности (в городе растений меньше). Неслучайно наибольшая (по абсолютной величине) интенсивность локальных островов холода в московских лесопарках также отмечается летом [16, 26] — вследствие действия тех же факторов. Летний максимум интенсивности острова тепла в годовом ходе по данным тех же спутников “Терра” и “Аква” (тоже около 3—4°C и более) отмечен и в Будапеште [29]. С другой стороны, поздней осенью различия в термических свойствах поверхности сходят на нет по мере отмирания растительного покрова: именно в это время интенсивность острова тепла наименьшая. Зимой и в начале весны условия промежуточные: снежный покров в сельской местности обычно сплошной и чистый, тогда как на значительной площади города он местами отсутствует (дороги очищают от снега, весной в городе раньше образуются проталины) и, кроме того, загрязнен. Различия в альбедо подстилающей поверхности, а также влияние сравнительно теплых городских крыш и антропогенных источников тепла, видимо, определяют более сильный поверхностный остров тепла зимой по сравнению с условиями осени.

Заметим, что годовой ход интенсивности приземного острова тепла в Москве неоднозначен и изменяется со временем, поскольку разные факторы, его обуславливающие, действуют разнонаправленно. Так, влияние городского отопления и связанных с ним выбросов тепла может быть причи-

ной усиления острова тепла зимой. С другой стороны, летом чаще отмечаются ясные ночи и застои воздуха, также приводящие к усилению этого явления. В результате в разных работах при анализе данных за разное время сделаны прямо противоположные выводы о годовом ходе интенсивности острова тепла в Москве: максимум зимой в 1977—1988 гг. [6] и в 1991—2002 гг. [24]; максимум летом в 1959—1987 гг. [15] и с конца 1990-х годов до настоящего времени [6, 9]; равнозначность зимних и летних значений в отдельные периоды [6].

4. Температура поверхности в Московском регионе

Рассмотрим общие закономерности распределения температуры поверхности во всем Московском регионе. На рис. 5 приведена карта средних значений T_c , рассчитанных с помощью стандартной программы интерполяции Surfer10.1 по данным той же выборки снимков за период 2008—2015 гг. с шагом расчетной сетки 15 км. Как видим, помимо ярко выраженной тепловой аномалии над Москвой прослеживается заметное увеличение T_c к востоку и юго-востоку от столицы. Наибольшая температура поверхности в среднем за год до 8 С и выше отмечается в столице и в приграничных районах Рязанской области. Самые низкие значения — от 3 до 4 С — наблюдаются западнее Подмосковья, в восточных районах Смоленской и Тверской областей.

Подобное распределение поля температуры поверхности связано с физико-географическими особенностями Московского региона. Так, 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 самых южных районах, Зарайском и Серебрянопрудском, — даже менее 10% (средняя по области лесистость — около 40%). Очевидно, что безлесные открытые участки в целом более сухие и более теплые по сравнению с поверхностью крон деревьев. Кроме того, Мещерская низменность к востоку от столицы характеризуется преобладанием песчаных и супесчаных почв [3] — в среднем также более сухих и более теплых по сравнению с суглинками. Примечательно, что сходное распределение с наибольшими значениями к юго-востоку от Москвы имеет средняя температура воздуха T_v в июле, а также сумма $T_v > 10$ С [12], что авторы этой работы объясняли увеличением летом по направлению к юго-востоку от Москвы повторяемости вхождений теплых тропических воздушных масс из Казахстана и Средней Азии. Таким образом, поле средних значений T_c в Московском регионе не сводится только к географической зональности и отражает действие разных факторов.



Рис. 5. Карта средней температуры поверхности Московского региона по данным спутников “Aqua” и “Terra” за 2008—2015 гг.

Светлыми точками показаны границы Москвы и Московской области.

Что касается поверхностного острова тепла над столицей, он проявляется на рис. 5 в виде двух замкнутых изотерм и одной полукруглой. В среднем по четырем ячейкам расчетной сетки площадью 225 км^2 каждая, охватывающим большую часть Москвы, T_c составляет $7,3 \text{ }^\circ\text{C}$. В остальных 437 ячейках вокруг Москвы, в которые столица не попадает или занимает менее половины их площади, $T_c = 5,4 \text{ }^\circ\text{C}$, и только в ближнем Подмоскovie в радиусе 30 км от границ города (в среднем для 32 ячеек вокруг столицы) $T_c = 5,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Разумеется, приведенная выше оценка интенсивности поверхностного острова тепла ($2,6 \text{ }^\circ\text{C}$) более точна, поскольку получена по данным с большим разрешением — 1 км . Очевидно также, что более высокая средняя температура поверхности в ближнем Подмоскovie отражает влияние крупных ближайших пригородов столицы, в каждом из которых есть собственный остров тепла. Впрочем, с увеличением радиуса области сравнения это влияние быстро уменьшается: на удалении 60 км от столицы, т. е. в пределах площади, приблизительно равной вписанному прямоугольнику на рис. 2б, среднее значение $T_c = 5,4 \text{ }^\circ\text{C}$, как и во всем регионе, так что дальнейшее расширение области сравнения с городом уже не приводит к изменениям значений. Вопрос о наиболее точной оценке интенсивности острова тепла в зависимости от радиуса рассматриваемых окрестностей города методически непрост: слишком большая область сравнения усложнит задачу, поскольку потребует отдельного учета климатической зональности.

Авторы благодарят М. В. Зимина и его коллег из Инженерно-технологического центра “СканЭкс” за помощь и консультации; Н. А. Терешонка и Н. С. Николаева из Центрального УГМС за данные метеорологической сети, а также Ю. И. Юсупова за предоставленные синоптические карты.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10275) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-55-45012).

Литература

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. Адаменко В. Н. Климат больших городов (обзор). — Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1975, 72 с.
3. Атлас Московской области. — М., ГУГК, 1964.
4. Балдина Е. А., Грищенко М. А. Исследование “теплого острова” Москвы по разносезонным снимкам Landsat-4/ETM+. — Геоинформатика, 2011, № 3, с. 62—69.
5. Беер В. Техническая метеорология. — Л., Гидрометеоиздат, 1966, 292 с.
6. Климат Москвы в условиях глобального потепления. /Под ред. А. В. Кислова. — М., Изд-во МГУ, 2017, 288 с.
7. Климат России. /Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб, Гидрометеоиздат, 2001, 656 с.
8. Кратцер П. А. Климат города. — М., Иностранная литература, 1958, 240 с.
9. Кузнецова И. Н., Брусова Н. Е., Нахаев М. И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость. — Метеорология и гидрология, 2017, № 5, с. 49—61.
10. Ландсберг Г. Е. Климат города. — Л., Гидрометеоиздат, 1983, 248 с.
11. Локощенко М. А., Корнева И. А., Кочин А. В., Дубовецкий А. З., Новицкий М. А., Разин П. Е. О высотной протяженности городского острова тепла над Москвой. — Доклады АН. Серия: Геофизика, 2016, т. 466, № 2, с. 213—217.

12. **Мячкова Н. А., Сорокина В. Н.** Климат Московской области. — М., Изд-во МГУ, 1991, 54 с.
13. **Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, часть 1. — Л., Гидрометеиздат, 1985, 300 с.
14. **Оке Т. Р.** Климаты пограничного слоя. — Л., Гидрометеиздат, 1982, 360 с.
15. **Рубинштейн К. Г., Гинзбург А. С.** Оценки изменений температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка). — Метеорология и гидрология, 2003, № 2, с. 29—38.
16. **Сорокина (Енукова) Е. А., Локощенко М. А.** Поверхностный “остров тепла” в Москве по данным спутников. — Вестник Международного университета природы, общества и человека “Дубна”. Серия: Естественные и инженерные науки, 2017, № 1 (37), с. 32—38.
17. **Bogolepow M. A.** Uber das Klima von Moskau. — Meteorologische Zeitschrift, 1928, Band XLV, Heft 4, pp. 152—154.
18. **Fabrizi R., Bonafoni S., and Biondi R.** Satellite and ground-based sensors for the urban heat island analysis in the city of Rome. — Remote Sensing, 2010, vol. 2, pp. 1400—1415.
19. **Howard L.** The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis. — W. Phillips, 1818, vol. 1, 346 p.
20. **Kaplan G., Avdan U., and Avdan Z. Y.** Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia. — Sciforum Electronic Conference Series, 2018, vol. 2.
21. **Keeratikasikorn C. and Bonafoni S.** Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery. — Remote Sensing, 2018, vol. 10, 440.
22. **Lokoshchenko M. A.** Urban ‘heat island’ in Moscow. — Urban Climate, 2014, vol. 10, part 3, pp. 550—562.
23. **Lokoshchenko M. A.** Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. — J. Appl. Meteorol. and Climatol., 2017, vol. 56, No. 10, pp. 2729—2745.
24. **Lokoshchenko M. A. and Isaev A. A.** Influence of Moscow city on the air temperature in Central Russia. /In: Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, 2003, vol. 2, pp. 449—453.
25. **Lokoshchenko M. A. and Korneva I. A.** Underground urban heat island below Moscow city. — Urban Climate, 2015, vol. 13, pp. 1—13.
26. **Lokoshchenko M. A. and Sorokina (Enukova) E. A.** Urban ‘heat island’ in Moscow by satellite data. /In: Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France, 2015, 11-7-3911378.
27. **Miles V. and Esau I.** Seasonal and spatial characteristics of urban heat islands (UHIs) in northern West Siberian cities. — Remote Sensing, 2017, vol. 9, 989.
28. **Patel P. P.** Estimation of land surface temperature from Landsat thermal images towards urban heat island mapping of Kolkata. — Asian Studies, 2009, vol. XXVII, No. 2, pp. 34—44.
29. **Pongracz R., Bartholy J., Lelovics E., Dezso Z., and Dobi I.** Satellite- and ground-based urban heat effect of the Budapest agglomeration area. /In: Proceedings of the 8th International Conference of Urban Climate, Dublin, Ireland, 2012, 486.
30. **Rasul A., Balzter H., and 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, pp. 176—186.
31. **Stathopoulou M., Synnefa A., Cartalis C., Santamouris M., Karlessi T., and Akbari H.** A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. — Int. J. Sustainable Energy, 2009, vol. 28, No. 1—3, pp. 59—76.
32. **Steitz D. et al.** Terra: Flagship of the Earth Observing System. — NASA press kit, release No. 99—120, 1999, 26 p.