

УДК 551.588.7 551.525.2 551.507.362.2

ОСТРОВА ТЕПЛА МАЛЫХ ГОРОДОВ И ДЕРЕВЕНЬ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

© 2021 г. М. А. Локощенко^{1, 2, *}, Е. А. Енукова²

Представил академик РАН Н.С. Касимов 10.06.2021 г.

Поступило 10.06.2021 г.

После доработки 10.06.2021 г.

Принято к публикации 07.07.2021 г.

По данным радиометрических измерений спутников Terra и Aqua на примере одного года впервые исследованы “поверхностные острова тепла” (тепловые аномалии в поле температуры поверхности) различных городов и деревень Московского региона и соседних областей. Интенсивность этого явления ΔT_{Π} (разность средней температуры поверхности населенного пункта и окружающей сельской местности) меняется от слабоотрицательных значений в малых деревнях с учетом опушки окружающего их леса, близких к нулю для самых малых городов (Верея) и вплоть до 2.6°C для Москвы. По более точным данным спутника Landsat $\Delta T_{\Pi} > 0^{\circ}\text{C}$ и в малых населенных пунктах. Зависимости интенсивности “поверхностных островов тепла” как от численности населения (в диапазоне от 10^1 до 10^7 чел.), так и от площади населенного пункта (в диапазоне от 10^{-1} до 10^3 км²) с высокой достоверностью описываются экспоненциальными функциями. Годовой ход ΔT_{Π} в большинстве мест отмечен максимумом летом при активной вегетации растений и минимумом осенью или зимой. Различия в интенсивности “поверхностных островов тепла” между Москвой и малыми городами Московского региона статистически достоверны. Влияние краевых эффектов при разрешении данных спутников 1 км² может приводить к заметному занижению реальной интенсивности “острова тепла”, если площадь города составляет менее 20–25 км².

Ключевые слова: спутники, радиометрические измерения, интенсивность поверхностного острова тепла, географическая зональность, малые города

DOI: 10.31857/S268673972110011X

ВВЕДЕНИЕ

Городские “острова тепла” всесторонне изучены для большинства крупных городов мира, начиная с пионерской работы Л. Говарда, открывшего это явление в Лондоне [1, 3, 7]. Так, для Москвы “острова тепла” в приземном слое воздуха подробно рассмотрен, например, в [10]. Между тем известно, что “острова тепла” создают и небольшие населенные пункты, и даже отдельные городские дворы [3]. Однако, за исключением немногих примеров (например, Апатиты в [13]), малые города и деревни крайне редко становятся объектами исследований в городской климатологии. Обычно метеорологических станций в малых городах либо нет, либо только одна – как правило, на окраине города и отражающая промежу-

точные условия между фоновой и городской местностью. Для полноценного исследования “островов тепла” требуются для сравнения хотя бы две станции: в центре города и за его пределами. Маршрутные съемки в малых населенных пунктах дороги, проводятся редко и недолго. К их числу можно отнести и уникальные данные непрерывных измерений на передвижной железнодорожной лаборатории об “островах тепла” уральских и сибирских городов [2].

Применительно к Московскому региону маршрутные измерения авторам неизвестны. Широкие возможности для исследования “островов тепла” открыли радиометрические измерения температуры поверхности T_{Π} с борта спутников. Они регулярны и обладают высоким пространственным разрешением (1 км для спутников Terra и Aqua, и 30 м для спутников серии Landsat).

Задачей авторов явилось впервые исследовать “поверхностные острова тепла”, т.е. тепловые аномалии в поле температуры поверхности, в любых населенных пунктах от крупнейших городов (Москва) до малых деревень и выявить эмпирические зависимости интенсивности этого явле-

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

² Государственный университет “Дубна”, Дубна, Московская область, Россия

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

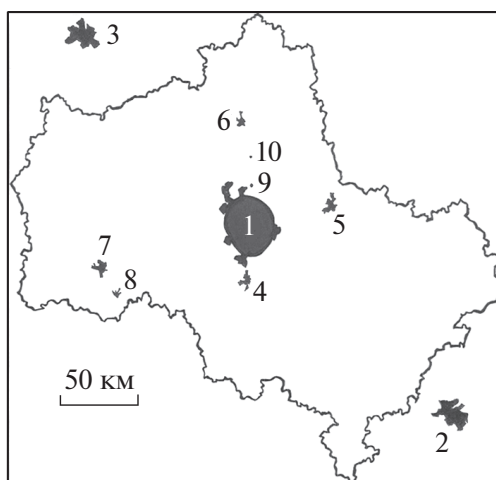


Рис. 1. Карта Московского региона с населенными пунктами, выбранными для анализа (цифровые обозначения — в табл. 1). Прямоугольник — область сравнения.

ния от числа жителей и площади населенного пункта. Подобные зависимости от численности населения применительно к “островам тепла” в приземном слое воздуха, аппроксимированные экспоненциальными функциями, приведены в [7] для городов США и Западной Европы, однако малые населенные пункты там не рассмотрены (исследован диапазон лишь от 10^3 до 10^7 чел.). В [6] показана довольно тесная связь (с коэффициентом корреляции $R = 0.87$) интенсивности не слишком слабых “островов тепла” с числом жителей для 27 крупных городов США с населением от 200 тыс. до 16 млн чел. Применительно к “поверхностным островам тепла” по данным спутников сходная зависимость, также близкая к экспоненте, получена в [9] для 28 городов Западной Сибири, но в еще более узком диапазоне населения: лишь от 4 до 332 тыс. чел. С площадью городов интенсивность их “островов тепла” сопоставляется реже. Заметим, что сами по себе связи населения и площади крупнейших городов неоднозначны и порой показывают большой разброс значений вследствие разной плотности населения городов и частой неопределенностью в оценках их площади [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нами использованы данные дневных снимков спутников Terra и Aqua, оснащенных радиометрами MODIS, пролетающих над Московским регионом ежедневно друг за другом с промежутком в 1 ч 50 мин (Terra — с 11 до 12, Aqua — с 13 до 14 ч). Точность измерений T_n этими радиометрами составляет над сушей $\pm 1^\circ\text{C}$ [12]. Заметим, что радиометры измеряют температуру поверхности на открытой местности, крон деревьев в лесах и преимущественно крыш зданий в районах плотной

застройки. Явление “поверхностного острова тепла” в Москве по данным этих спутников подробно исследовано авторами в [4]. Достоинством Terra и Aqua являются большие выборки их каждодневных снимков, тогда как спутники Landsat имеют более высокое разрешение, но пролетают гораздо реже: лишь раз в 16–18 дней.

В пределах Московского региона и примыкающих к нему районов соседних областей для анализа были выбраны 10 населенных пунктов: восемь городов и две деревни (см. рис. 1 и табл. 1). В своей совокупности они впервые охватывают максимально широкий спектр как численности населения (от 10^1 до 10^7 чел.), так и площади населенного пункта (от 10^{-1} до 10^3 км²). Векторные слои, т.е. шаблоны контуров всех выбранных населенных пунктов, созданы авторами с точностью ± 20 м на основе их формальных административных границ, содержащихся в картографической основе Google. Москва рассмотрена в ее традиционных границах до 2012 г. в форме черепахи (эллипса вдоль линии МКАД с шестью входящими за нее “протуберанцами”), поскольку так называемая “новая Москва” пока слабо заселена и близка к условиям сельской местности.

Векторный слой Рязани составлен без учета отдельного городского анклава — поселка Солотчи, а Москвы — без анклава Зеленоград.

Для каждого из выбранных пунктов в табл. 1 приведены доли в общей их площади двух типов поверхности: плотной жилой застройки и зеленых зон (лесов и парков в пределах города). Эти оценки получены с помощью программного обеспечения СканЭкс методом двоичного кодирования поверхности снимков с использованием эталонных участков на примере Москвы — по пять участков для обоих типов. Для выявления первого типа выбранные участки отражали плотную не озелененную застройку и были полностью заполнены искусственными покрытиями крыш домов и асфальта (преимущественно в густонаселенном центре столицы). Участки второго типа представляли собой густой лес со сплошной сомкнутостью крон деревьев в центре крупных столичных лесопарков. Применение одних и тех же эталонных участков ко всем векторным слоям обеспечивает объективность анализа и сравнимость полученных оценок. Как видим, в самых малых пунктах (в Верее и обеих деревнях) плотной застройки не выявлено вовсе; зеленых зон меньше всего в Рязани и больше всего в Твери и Ногинске.

Область сравнения принята единой для всех выбранных пунктов. Как и в [4], ею стал прямоугольник площадью 94 851 км², описанный вокруг границ Московской области и включающий пограничные районы соседних областей, с выре-

Таблица 1. Населенные пункты, выбранные для анализа, и его результаты

Населенный пункт	Площадь, км ²	Население, тыс. чел.	Доли плотной застройки/лесов и парков / остальной поверхности в площади города, %	Окружающая местность	Количество снимков (в скобках — дней со снимками) в 2018 г.	$m \pm \sigma$, где m — средняя интенсивность “поверхностного острова тепла”, σ — стандартное отклонение в 2018 г., °C
1. Москва	1081*	12678	20/13/67	Пригороды, поля, лес	118 (75)	2.6 ± 1.4
2. Рязань	224	539	3/4/93	Пригороды, поля	110 (71)	2.0 ± 2.3
3. Тверь	152	450	4/19/77	Пригороды, поля, лес	102 (68)	0.3 ± 2.8
4. Подольск	40	291	13/8/79	Москва и другие ее пригороды	115 (74)	2.2 ± 1.6
5. Ногинск	52	104	7/18/75	В основном — лес	113 (74)	0.7 ± 1.4
6. Дмитров	26	69	4/8/88	Поля, открытая местность	114 (73)	1.2 ± 2.0
7. Можайск	18	30	2/10/88	Поля, открытая местность	105 (71)	0.8 ± 2.3
8. Верея	5	5	0/12/88	Лес	103 (70)	-0.0 ± 1.5
9. Афанасово	1	0.336	0/6/94	Лес	94 (66)	-0.1 ± 1.3
10. Бяконтово	0.14	0.006	0/10/90	Лес	12 (12)	-0.4 ± 1.0

Примечание. *В традиционных границах (до 2012 г.)

занными из него площадями всех десяти исследованных объектов (рис. 1).

Общая область сравнения позволяет корректно сопоставить результаты, полученные для разных мест, поскольку разные города и деревни находятся в разном локальном окружении: это либо соседние пригороды Москвы (Подольск), либо открытая сельская местность (Можайск и Дмитров), либо лес (Верея, деревни Афанасово и Бяконтово). Основной характеристикой “поверхностных островов тепла” служит их интенсивность, т.е. разность средней температуры поверхности $\Delta T_{\text{П}}$ во всех ячейках площадью 1 км² внутри населенного пункта и за его пределами в области сравнения.

Очевидно, что выбранные для анализа населенные пункты должны:

- иметь по возможности цельную и компактную, геометрически простую форму;
- находиться в условиях равнинного рельефа и вдали от обширных водоемов;
- быть окруженными в основном сельской местностью, т.е. не иметь общих границ с другими сравнимыми или большими по размеру городами;
- не находиться слишком близко ни к Москве (во избежание влияния теплового следа столичного “острова тепла”), ни к границам области

сравнения (во избежание влияния географической зональности). Как известно, зональность в Московском регионе проявляется в общем росте температуры и поверхности, и воздуха в направлении с северо-запада на юго-восток [4].

Заметим, что два самых крупных после Москвы населенных пункта в выбранной части пространства — Тверь и Рязань — не отвечают последнему условию. Тверь находится вблизи северной границы этой области, так что интенсивность ее “острова тепла” может быть занижена (сравнительно холодная в силу зональности поверхность этого города соотносится в основном с более теплыми южными ячейками). Напротив, интенсивность “острова тепла” Рязани вблизи юго-восточной границы области сравнения может быть завышена, поскольку ее поверхность сравнивается главным образом с более холодными северными ячейками. С другой стороны, Подольск и дер. Афанасово находятся вблизи Москвы, так что в результатах анализа для этих пунктов нельзя полностью исключить влияние столичного “острова тепла”. Кроме того, для лучшей сравнимости во избежание влияния зональности желательна относительная близость населенных пунктов друг к другу (этому условию отвечают, с одной стороны, Можайск и Верея, а также Ногинск, Дмитров и обе деревни). Желательно также нали-

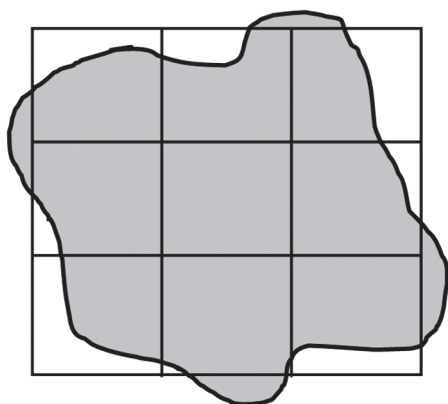


Рис. 2. Пример представления реальной площади условного города (серая фигура) в виде квадрата в сетке спутниковых данных.

чие в городе сетевой метеостанции (они есть в Москве, Рязани, Твери, Дмитрове и Можайске).

Серьезной проблемой при анализе спутниковых данных служит частая в нашем климате облачность, непроницаемая для приемников радиометров (при наличии облаков измеряется температура их верхней границы, нереально низкая для поверхности, что позволяет автоматически отсеивать такие значения). Как показали проведенные авторами численные эксперименты [4], пригодными для анализа “острова тепла” Москвы являются снимки, в которых облака, шлейфы дымов и прочие помехи занимают менее 50% площади Московского региона. При этом смещение оценок ΔT_{Π} сравнительно мало ($\leq \pm 20\%$), и его можно считать допустимым. На основе данного результата была получена выборка из 120 пригодных снимков обоих спутников в 2018 г.

ВЛИЯНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Ранее авторы на примере Москвы [4] подробно исследовали смещения оценок средней интенсивности “поверхностного острова тепла” вследствие пролета спутников в дневные часы (у ночных снимков качество хуже, и их мы не рассматриваем), а также в силу доступности этих данных только в антициклональных условиях, которые сами по себе усиливают “остров тепла”. Говоря же об “островах тепла” малых населенных пунктов, следует отметить еще один важный источник смещения оценок ΔT_{Π} — краевые эффекты вблизи границ исследуемых объектов. Допустим, температура поверхности во всех точках некоторого компактного по форме города $T_{\Pi} = a$, а за его пределами всюду $T_{\Pi} = b$, так что интенсивность “острова тепла” $\Delta T_{\Pi} = (a - b)$. Автоматическая программа распознавания объектов относит к ним все ячейки снимка, половина или более

площади которых находится в пределах объекта. Если по заданному векторному слою выявлено 9 городских ячеек в виде квадрата площадью $3 \times 3 \text{ км}^2$, то это означает, что в каждой из них доля города ≥ 0.5 , а вокруг везде < 0.5 (пример — на рис. 2). В пограничных ячейках, не полностью охваченных городом, температура поверхности окажется промежуточной соответственно доли города в их площади. При компактной и симметричной форме города центральная ячейка такого квадрата, скорее всего, полностью заполнена поверхностью города, а средняя доля города в каждой из смежных с ней ячеек на краях квадрата составляет 0.75.

Таким образом, средняя температура поверхности во всех девяти ячейках:

$$T_{\Pi} = (a + (a \times 0.75 + b \times 0.25) \times 8) / 9 = 0.78a + 0.22b. \quad (1)$$

При бесконечно большой внешней области сравнения вклад в ее температуру возможного выхода городской поверхности за пределы этих девяти ячеек пренебрежимо мал и, следовательно, средняя температура всех внешних ячеек вне города $T_{\Pi} \sim b$. Тогда интенсивность “поверхностного острова тепла” составляет:

$$\Delta T_{\Pi} = (0.78a + 0.22b) - b = 0.78(a - b). \quad (2)$$

Смещение оценок интенсивности тем меньше, чем больше площадь объекта и меньше доля пограничных ячеек по его периметру в общем их количестве. Очевидно, что для случая квадрата из 25 ячеек, почти точно равного площади Дмитрова, коэффициент перед разностью $(a - b)$ составит 0.84, для квадрата из 49 ячеек (близкого к площади Ногинска) — 0.88, для квадрата из 196 ячеек (площадь, промежуточная между Тверью и Рязанью) — 0.93. Наконец, для квадрата из 1089 ячеек (Москва) этот коэффициент возрастает уже до 0.97. Таким образом, данные спутников с разрешением 1 км^2 , очевидно, должны занижать реальную интенсивность “острова тепла” Дмитрова на 16%, Ногинска — на 12%, центров соседних областей — приблизительно на 7%, а Москвы — лишь на 3%. В реальности поверхность и города, и окружающей его местности неоднородна. Так, в Москве много лесопарков, представляющих собой локальные “острова холода” внутри городского “острова тепла” [8]. Четыре из пяти столичных метеорологических станций находятся в парковых зонах, и среднегодовая температура воздуха T в 2018 г. составила по их данным от 6.3°C в Тушино до 6.6°C в МГУ, в обсерватории Михельсона и на ВДНХ, тогда как на ст. Балчуг в зоне плотной застройки T достигла 7.8°C . С другой стороны, вокруг столицы расположен обширный пояс ее пригородов с довольно плотной городской застройкой. Благодаря этому в пограничных ячейках векторного контура Москвы вдоль линии МКАД доля поверхности с сельской

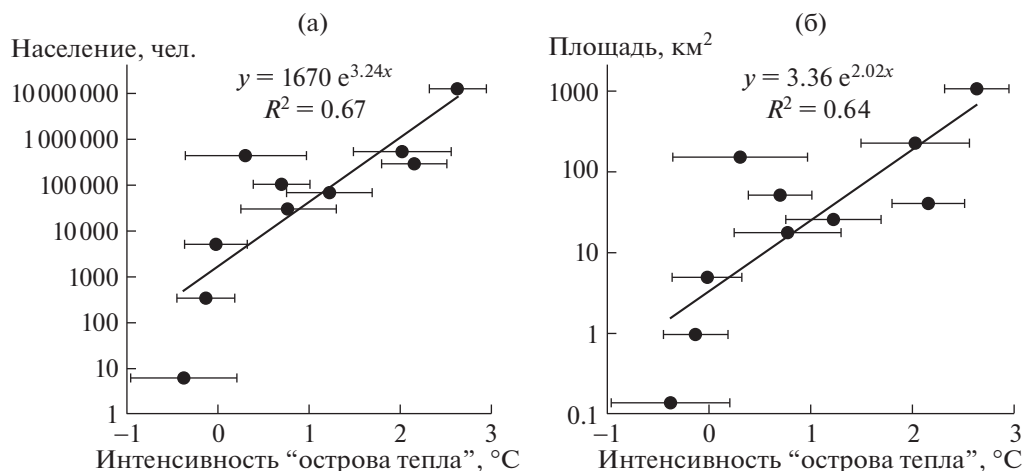


Рис. 3. Связи интенсивности “поверхностных островов тепла” городов и деревень Московского региона с их населением и площадью по данным спутников Terra и Aqua 2018 г. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5% по выборке всех дней со снимками.

местностью крайне незначительна, так что занижение ΔT_{Π} для столицы пренебрежимо мало (<3%).

Исходя из условно допустимого порога смещения 20%, оценки величины ΔT можно считать близкими к реальным при площади города ~20–25 км² или более. Таким образом, занижение реальной интенсивности “поверхностного острова тепла” существенно в нашем случае для Вереи и обеих маленьких деревень — тем более с учетом окружения их густым лесом. Можайск в этом ряду занимает пограничное положение. Заметим, что, вообще говоря, знак ΔT_{Π} может быть различным в зависимости от географических условий: так, в сухих тропиках порой весь город-оазис оказывается “островом холода” в окружающей его пустыне — во всяком случае, в сухой сезон года (например, Эрбил [11]). Но в средних широтах городская поверхность почти всегда теплее сельской местности, так что смещение оценок интенсивности “островов тепла” из-за влияния краевых эффектов сводится к ее занижению.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Анализ осуществлен на примере данных спутников Terra и Aqua в 2018 г. В табл. 1 приведено как число всех снимков в условиях ясного или малооблачного неба, оказавшихся пригодными для анализа отдельных городов, так и число дней с такими снимками. Если пригодными были снимки обоих спутников в один и тот же день, к расчетам принималось среднее арифметическое значение интенсивности “островов тепла” на обоих снимках. Естественно, наибольший размер выборки значений в отдельные дни (75) присущ самому большому по площади объекту — Москве; в

остальных городах он немного меньше, поскольку на некоторых снимках они были закрыты облаками. Самый маленький из рассмотренных населенных пунктов — деревня Бяконтово — крайне редко выявлялась автоматической программой распознавания. Лишь на 12 снимках, когда часть ближайшей ячейки была закрыта облаками, площадь этой деревни ненамного превысила половину ее оставшейся открытой поверхности. Все средние значения ΔT_{Π} нормированы на годовой ход, т.е. рассчитаны с равными весами для каждого из месяцев.

На рис. 3 показаны полученные связи интенсивности “островов тепла” как с численностью населения, так и с площадью исследованных городов и деревень. Как видим, обе статистические зависимости близки к экспоненциальным функциям: корреляционное отношение (или коэффициент корреляции в полулогарифмических координатах) R равен 0.82 и 0.80 соответственно для численности населения и площади. Обе зависимости существенно нелинейны: при их аппроксимации линейными трендами коэффициенты корреляции меньше: лишь 0.60 и 0.65 соответственно. Разумеется, полученные зависимости можно аппроксимировать и степенными функциями разного порядка с гораздо более высокими значениями R : вплоть до 0.99–1.00 для полиномов 5-й и 6-й степени. Однако эти функции немонотонные; описание же обеих зависимостей экспонентами отражает общую тенденцию усиления “островов тепла” с ростом городов и потому более логично.

Отклонения отдельных точек от линий регрессии объясняются влиянием общей географической зональности, локальной неоднородностью фоновых условий, а также особенностями по-

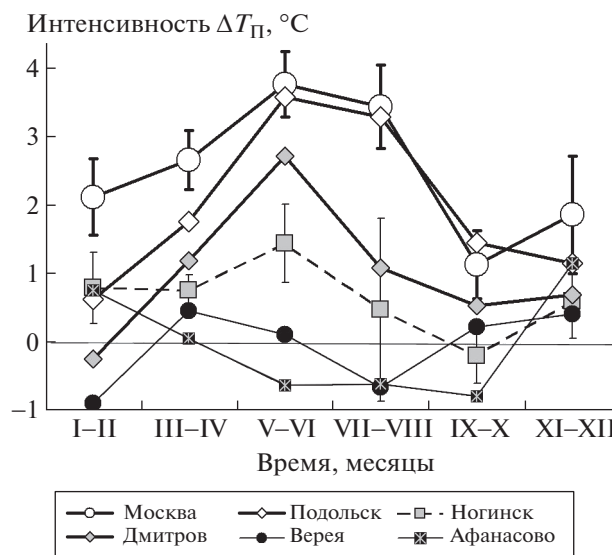


Рис. 4. Годовой ход интенсивности “поверхностных островов тепла” разных населенных пунктов Московского региона по данным спутников Terra и Aqua за 2018 год. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5%.

верхности самих городов (разной плотностью городской застройки и разной долей зеленых насаждений в разных местах). Так, “поверхностный остров тепла” Твери, действительно, для данной области сравнения оказался намного слабее не только сравнимой с ней Рязани, но и почти всех малых городов Московской области, расположенных южнее. Причинами этого служат как проявление зональности (нахождение Твери вблизи северного края зоны сравнения), так и большие лесопарки в этом городе, являющиеся локальными “островами холода”. Очень теплая поверхность Подольска, видимо, объясняется как обширной плотной городской застройкой (ее доля в площади города больше только в столице), так и влиянием теплового следа “острова тепла” соседней Москвы. Заметим, что в Дмитрове ΔT_p оказалась намного больше, чем в Можайске, хотя среднегодовая T по данным метеостанций в этих городах оказалась в 2018 г. одинаковой: 5.7°C . Данный результат также вполне логичен, поскольку доля плотной застройки в Дмитрове почти вдвое больше.

Примечательно, что самый маленький город Подмосковья Верея показал почти нулевое, а обе деревни Мытищинского района — даже слабоотрицательные значения ΔT_p . С учетом их малой площади очевидно, что расчетные ячейки, распознанные программой по векторным слоям как Афанасово и Бяконтово, включают в себя окружающий обе деревни лес. Таким образом, если границу Бяконтово считать проходящей не по кромке леса, а на расстоянии ~ 300 м в его глубине, то эта деревня вместе с лесной опушкой является слабовыраженным “островом холода” в поле

T_p . Впрочем, с учетом величин σ в табл. 1 и доверительной вероятности на рис. 3, отрицательный знак ΔT_p не является статистически достоверным. Для получения более точных оценок интенсивности “островов тепла” столь малых населенных пунктов требуются данные спутников с высоким пространственным разрешением.

С этой целью к анализу был привлечен также снимок спутника Landsat, полученный в условиях ясной погоды в 08: 23 28 мая 2018 г. Расчет T_p по измеренной радиояркостной температуре выполнен согласно рекомендациям GIS-Lab: <https://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html>. Дополнительно для сравнения приведены данные спутника Terra, пролетевшего в этот день над Московским регионом вслед за Landsat спустя 17 мин (в 08: 40). Область сравнения для расчетов ΔT_p на обоих снимках ограничена шириной полосы съемки спутником Landsat 185 км — поэтому в нее не попали ни Тверь, ни Рязань. Оказалось, что утром в этот день значение ΔT_p составило по данным Landsat 4.8°C и для Москвы, и для Дмитрова; 5.5°C для Можайска; 3.5°C для Вереи; 3.4°C для Афанасова и 1.4°C для Бяконтова. По данным Terra ΔT_p составило 4.7; 2.4; 5.8; 2.8 и -0.8°C соответственно для Москвы, Дмитрова, Можайска, Вереи и Афанасова. Как видим, в этот день в силу погодных условий все “поверхностные острова тепла” проявились сильнее обычного (применительно к Москве ΔT_p оказалась почти вдвое больше, чем в среднем за год). Оценки их интенсивности обоими спутниками почти совпали для Москвы и близки для Можайска, однако для Дмитрова сильно разошлись. Для малых населенных пунк-

тов получены положительные значения $\Delta T_{\text{П}}$ по данным Landsat, но гораздо меньшие (для Вереи) и даже отрицательные (для Афанасова) по данным Terra. Очевидно, оценки Landsat точнее вследствие близости расчетной области на мелкой сетке этого спутника к реальным границам населенных пунктов. Таким образом, занижение интенсивности “островов тепла” малых городов и деревень по спутниковым данным с низким разрешением из-за включения в расчеты окружающего эти пункты леса подтверждается данным примером.

Годовой ход интенсивности “поверхностного острова тепла” Москвы по многолетним данным отмечен максимумом при активной вегетации летом и минимумом поздней осенью [4]. Как видно на рис. 4, это подтверждает и отдельный расчет на примере 2018 г. Ввиду недостаточного размера выборки для отдельных месяцев годовой ход $\Delta T_{\text{П}}$ рассчитан для всех мест в среднем за каждые два месяца. Как видим, в большинстве пунктов за исключением самых малых (Вереи и Афанасова) максимум интенсивности также отмечается летом, а минимум — осенью или зимой. С учетом доверительных интервалов видно, что различия между крупнейшим мегаполисом Москвой и малыми городами (Ногинск) статистически достоверны во все сезоны. Для самых малых населенных пунктов однозначные закономерности годового хода не выявлены.

ВЫВОДЫ

1. Любые города, включая малые, создают в средних широтах “поверхностные острова тепла” в виде устойчивой тепловой аномалии в поле температуры поверхности. Величина этой аномалии составляет в среднем за год вплоть до 2.0–2.6°C для крупных городов.

2. Острова тепла самых малых населенных пунктов слабые, интенсивность их порядка 1°C; с учетом окружающей деревню лесной опушки она близка к нулю или является слабоотрицательной.

3. Связи интенсивности “поверхностных островов тепла” с численностью населения и площадью населенных пунктов с высокой достоверностью можно описать экспоненциальными функциями.

4. Годовой ход интенсивности “поверхностных островов тепла” большинства городов отмечен наибольшими значениями летом и наименьшими — осенью или зимой.

5. При соотношении площадей города и единичной ячейки расчетной сетки ~25: 1 и более занижение интенсивности его “острова тепла” $\Delta T_{\text{П}}$ вследствие влияния краевых эффектов сравнительно мало (<0.2 величины $\Delta T_{\text{П}}$).

6. Площадь плотной не озелененной жилой застройки составляет от 20% в Москве до нескольких сотых долей в малых городах и, в целом, убывает с уменьшением населенного пункта; в обеих деревнях она отсутствует вовсе. Лесопарковые территории занимают порядка 1/10 (от 6 до 19%) площади большинства городов и деревень.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы сердечно благодарят академика РАН Н.С. Касимова за ценные советы, а также М.В. Зимина и других сотрудников ИТЦ СканЭкс за предоставление программного обеспечения и большую помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко В.Н. Климат больших городов (обзор). Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1975. С. 72.
2. Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Мохов И.И., Ракин А.А. Структура острова тепла над городами России по наблюдениям с передвижной лаборатории. // ДАН. 2012. Т. 443. № 3. С. 366–371.
3. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 248.
4. Локощенко М.А., Енукова Е.А. Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным. // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 50–63.
5. Мохов И.И. Взаимосвязь численности населения в городах с их размерами. // ДАН. 2006. Т. 409. № 2. С. 258–260.
6. Мохов И.И. Связь интенсивности “острова тепла” города с его размерами и количеством населения. // ДАН. 2009. Т. 427. № 4. С. 530–533.
7. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 360.
8. Сорокина (Енукова) Е.А., Локощенко М.А. // Вестник Международного университета природы, общества и человека “Дубна” Серия “Естественные и инженерные науки”. 2017. 1 (37). С. 32–38.
9. Esau I., Miles V. // Exogenous Drivers of Surface Urban Heat Islands in Northern West Siberia // Geography, Environment, Sustainability. 2018. 11 (3). P. 83–99.
10. Lokoshchenko M.A. Urban ‘Heat Island’ in Moscow. // Urban Climate. 2014. V. 10. P. 3. P. 550–562.
11. 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. V. 14 (2). P. 176–186.
12. Steitz D., et al. Terra: Flagship of the Earth Observing System. // NASA press kit, release. № 99–120. 1999. 26 p.
13. Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 17573–17587.

HEAT ISLANDS OF SMALL TOWNS AND VILLAGES IN MOSCOW REGION

M. A. Lokoshchenko^{a, b, #} and Ye. A. Erukova^b

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation*

^b *State University "Dubna", Dubna, Moscow region, Russian Federation*

[#] *E-mail: loko@geogr.msu.ru*

Presented by Academician of the RAS N.S. Kasimov June 10, 2021

For the first time “surface urban heat islands” (thermal anomalies in the surface temperature field) of different towns and villages of Moscow region and neighboring regions have been studied by the data of radiometric measurements from Terra and Aqua satellites on the example of one year. An intensity of this phenomenon ΔT_s (a difference between average surface temperature inside inhabited locality and at surrounding rural zone) varies from weakly negative values at small villages including surrounding forest edge, close to zero values for the smallest towns (Vereya) and up to 2.6°C for the biggest city in the region (Moscow). According to the data of Landsat satellite, having higher spatial resolution, $\Delta T_s > 0^\circ\text{C}$ even at smallest localities. Dependencies of the “surface urban heat island” intensity on both the locality population (at a range from 10^1 до 10^7), and the locality area (at a range from 10^{-1} до 10^3 km²) may be approximated by exponential functions with great statistical significance. The ΔT_s annual course as a rule is noted by maximum in summer during intense vegetation by plants and minimum in autumn or in winter. Differences between ΔT_s in Moscow and small towns of Moscow region are statistically significant. An influence of edge effects for the satellite data spatial resolution 1 km² leads to a noticeable underestimation of real “heat island” intensity if town area is less than 20–25 km².

Keywords: satellites, radiometric measurements, “surface urban heat island” intensity, geographical zonality, small towns