

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

*На правах рукописи*

**Енукова Евгения Александровна**

**Городские «острова тепла» в поле температуры  
поверхности по данным космических снимков**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва - 2025 г.

Диссертация подготовлена на кафедре экологии и наук о Земле факультета естественных и инженерных наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Университет «Дубна».

**Научный руководитель:** **Локощенко Михаил Александрович**, кандидат географических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Соломина Ольга Николаевна**, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, Институт географии Российской академии наук, директор

**Красовская Татьяна Михайловна**, доктор географических наук, доцент, географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра физической географии мира и геоэкологии, профессор

**Кузнецова Ирина Николаевна**, доктор географических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 15 мая 2025 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1807.

E-mail: [dissovetmsu016.9@yandex.ru](mailto:dissovetmsu016.9@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС

«Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3390>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук

М.А. Смирнова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее проработанности.**

Человек создает вокруг себя уникальную среду обитания, называемую город. В современном мире территория и население городов неуклонно растут. Ныне уже более половины человечества (57%) проживает в городах, занимающих лишь ~1% площади планеты. Плотность населения в центральной части некоторых крупных городов достигла критических значений 30-40 тыс. чел./км<sup>2</sup>, а на их периферии продолжается разрастание городской территории. Естественное покрытие заменяется бетоном и асфальтом. Производство и автомобильный транспорт, которые являются основными источниками загрязнения атмосферы, в основном сосредоточены в городах. Все это отражается на состоянии микроклимата территории городов. Особенно сильно городская среда влияет на температуру приземного слоя воздуха и поверхности. В центре города она почти всегда выше, чем на его окраине. Эта разность означает феномен так называемого городского «острова тепла».

Городской «остров тепла» – это территория города, характеризующаяся повышенной по сравнению с окружающей сельской местностью температурой воздуха  $T_v$ . Явление городского «острова тепла» существует почти повсеместно, кроме только городов со специфическими природными условиями (см. главу 5). Городские «острова тепла» проявляются в поле не только  $T_v$ , но также температуры поверхности  $T_{п}$  и почвы. Городские «острова тепла» усиливают глобальное потепление климата. Изучение этого явления важно для задач энергетики (оценок затрат на отопление зимой и на кондиционирование зданий летом), уточнения краткосрочных прогнозов погоды, расчётов биопродуктивности растений, оценок опасностей для здоровья населения городов (теплового стресса при жаркой погоде). «Острова тепла» являются важным объектом изучения геоэкологии, поскольку связаны с антропогенными ландшафтами и их суммарным влиянием на географическую оболочку. Многолетние результаты спутниковых измерений  $T_{п}$  служат ценным средством геоэкологических исследований. Ещё одним важным для геоэкологии показателем, изменения которого могут влиять на  $T_{п}$  и интенсивность «островов тепла», является вегетационный индекс, значения которого также доступны по результатам измерений с борта спутников.

**Цель работы.** Основная цель исследования заключается в выявлении пространственных и временных показателей «острова тепла» в Москве по данным спутников о температуре поверхности региона.

### **Основные задачи исследования:**

1. Разработка методики работы с данными удаленного зондирования Земли о температуре поверхности и способов их применения для расчета показателей поверхностного «острова тепла» в Москве;
2. Изучение годового хода и долговременных изменений, а также пространственной структуры поверхностного «острова тепла» Москвы, включая пять основных типов поверхности города (лесопарков, открытой воды, плотной застройки, луговых и песчаных поверхностей);
3. Анализ систематических смещений в оценках интенсивности поверхностного «острова тепла», связанных с её изменениями в суточном ходе и наличием данных преимущественно в антициклональных условиях;
4. Исследование поверхностных «островов тепла» в крупных и малых населённых пунктах Московского региона и соседних областей, выявление зависимостей их температурного влияния от площади и числа жителей;
5. Сравнение особенностей городских поверхностных «островов тепла» в средних широтах (Московский регион) и в тропиках (Дели и Бангалор, Индия).

#### **Материалы и методы исследования.**

В работе использовалась методика определения интенсивности городского «острова тепла» на основе результатов дистанционного зондирования Земли. Источником стала открытая база данных космических снимков спутников Terra и Aqua, оснащённых радиометрами MODIS, представленная на официальном сайте космического агентства США [Earthdata.nasa.gov](http://Earthdata.nasa.gov). Из всего объёма имеющихся там данных (15 342 снимка) были отобраны безоблачные и малооблачные снимки территории Московского региона за период с 2000 по 2020 гг. Всего с обоих спутников после удалось получить 1379 таких снимков за весь период наблюдений. Информация о температуре поверхности ( $T_p$ ), предоставляемая радиометрами, содержится в отдельном тематическом продукте под названием LST (Land Surface Temperature), который имеет пространственное разрешение 1 км и точность измерения температуры поверхности суши  $\pm 1$  °С. Распределение температуры поверхности в исследуемом регионе было получено после обработки космических снимков в программе Scanex Image Processor, разработанной ИТЦ «СканЭкс». Для исследования «островов тепла» самых малых населённых пунктов, а также температуры малых по площади типов городской поверхности (песчаных и луговых территорий) были также использованы снимки спутников серии

Landsat с разрешением 100 м. Расчет средних значений температуры поверхности и интенсивности «острова тепла», а также различных статистических характеристик производился в программном обеспечении Microsoft Excel и Statistica 7. При построении карт температурного поля Московского региона использовалась программа Surfer, работающая на различных методах интерполяции.

Для решения основных задач моей диссертационной работы использовались векторные слои различных объектов, например, границ города Москва, Московской области, малых городов и деревень Московского региона, отдельных лесопарковых зон Москвы, а также Дели и Бангалора. Все эти векторные слои были построены на ГИС-портале GeoMiXer, позволяющем работать с космическими снимками различного пространственного разрешения и применять графические методы обработки. Помимо прочего, для сравнения характеристик интенсивности «острова тепла» в Москве в поле  $T_{\text{П}}$  и в приземном слое воздуха были привлечены данные сети метеорологических станций за различные периоды времени.

К анализу характеристик температурного воздействия городских лесов и парков необходимо было привлечь значения вегетационного индекса (NDVI) и индекса листовой поверхности (LAI). Это отдельные продукты дистанционного зондирования Земли, полученные по результатам съемки поверхности Земли радиометром MODIS.

В ходе работы разработана собственная оригинальная методика определения пригодности космических снимков для анализа показателей городского «острова тепла». Она стала результатом численных экспериментов с имитацией облачного покрова над разными частями территории города и области.

#### **Научная новизна.**

- Впервые были получены средние оценки интенсивности поверхностного «острова тепла» и её годового хода в Москве по многолетним данным спутников;
- Впервые изучены многолетние изменения «острова тепла» крупного города в поле температуры поверхности, а также вегетационного индекса;
- Впервые выявлены пороговые значения доли покрытия территории облаками, которые не приводят к большим смещениям оценок интенсивности «острова тепла»;

- На основе сравнений с данными метеорологических станций впервые определены поправки на дискретное время пролёта спутников (приведение интенсивности к среднесуточным значениям) и на антициклональные условия ясного неба (приведение интенсивности к средним условиям);

- Впервые подробно исследована зависимость интенсивности поверхностного «острова тепла» от выбора площади зоны сравнения или границ самого города;

- Подробно изучена неоднородная термическая структура городской поверхности. Впервые получены средние многолетние значения интенсивности локальных «островов холода» в лесопарковых зонах города Москвы, исследован ее годовой ход и зависимости от площади парка, вегетационного индекса NDVI и индекса площади листовой поверхности LAI; изучен многолетний термический режим поверхности открытой воды и плотной городской застройки;

- Впервые получены зависимости интенсивности «островов тепла» от площади и числа жителей городов и деревень в широких диапазонах от  $10^1$  до  $10^7$  человек и от  $10^{-1}$  до  $10^3$  км<sup>2</sup>;

- Получены оценки интенсивности поверхностных «островов тепла» для крупнейших городов Индии.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Представленные в данной работе материалы и выводы могут быть использованы для оценки экономических последствий увеличения температуры внутри города, основываясь на экономии тепло- и энергоресурсов в зимнее время и увеличении затрат на охлаждение летом. Полученные оценки охлаждающего эффекта городских лесопарков могут быть использованы в градостроительстве и геоурбанистике, включая развитие рекреационных зон внутри городов. Данные могут применяться в педагогической деятельности, в частности для изучения дисциплин «Городская климатология», «Экологическая климатология» и др.

Научная значимость работы определяется выявлением статистически достоверных зависимостей между различными факторами среды и интенсивностью «островов холода» и «островов тепла» и может служить базой для дальнейших исследований.

### **Степень достоверности, апробация результатов и публикации.**

По теме диссертации автором опубликовано 12 статей в журналах и сборниках, а также разделов монографий, 4 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий в базах данных Scopus, Web of Science и RSCI. Результаты работы были представлены

автором на международных и всероссийских конференциях и школах: VII Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум» – 2015, Москва, Российская Академия Естествознания; Международная конференция молодых ученых ELPIT-2015, 2015 г., Самара-Тольятти; 9th International Conference on Urban Climate (ICUC-9), Toulouse, France, 2015; XX и XXII Всероссийские конференции САТЭП, в 2016 г. и в 2020 г.; Международные научные конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017, -2018 и - 2019», Москва, МГУ; с 15-ой по 20-ю и 22-я Всероссийские и Международные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в 2017-2024 гг. Москва, ИКИ РАН; 26-я и 27-я научно-практические конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов, Дубна, Московская обл.; Всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития», Москва, ИГКЭ, 2017 г.; Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования КЛИМАТ-2019», 2019 г., Москва, ИФА РАН; Конференция к 100-летию со дня рождения М.А.Петросянца «М.А.Петросянец и отечественная метеорология», Москва, МГУ и ГМЦ, ноябрь 2019 г.; 11th International Conference on Urban Climate (ICUC-11), Sydney, Australia, 2023; Международная конференция I Белорусский Географический конгресс, Минск, Беларусь, апрель 2024 г.

#### **Личный вклад автора.**

Автором были обработаны и отобраны для последующего анализа дневные космические снимки радиометра MODIS, установленного на двух спутниках (TERRA и AQUA) за период с 2000 по 2020 годы (всего – 15342). Созданы совместно с научным руководителем векторные слои для анализа городского «острова тепла» в Москве и оценки внутренней структуры поля температуры поверхности города (оконтурены с высокой точностью границы города и зоны сравнения, лесов и парков, водных объектов, зоны городской застройки, песчаных и луговых поверхностей). Большая часть статистической обработки полученных данных о температуре поверхности проведена автором. Построены и описаны карты температуры поверхности Московского региона в программе Surfer10.1. Автор работы выполнил большую часть работы по проведению численных экспериментов с имитацией облаков над Московским регионом. Произведен отбор и анализ данных о температуре поверхности в условиях тропических мегаполисов Дели и Бангалор.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. На территории Москвы выявлена положительная многолетняя аномалия в поле температуры поверхности Земли с максимальной интенсивностью летом (в июне-июле) и минимальной осенью (в октябре-ноябре), усиление которой в 2000-х годах сменилось стабилизацией значений среднегодовой интенсивности в последующие годы;

2. Поверхностные «острова тепла» присущи не только крупным городам, но и средним, и даже малым населённым пунктам. Их интенсивность зависит от площади города, численности населения, степени озеленения и географического положения;

3. Термическое поле Москвы неоднородно с наибольшими значениями  $T_{\text{П}}$  в зоне плотной городской застройки и локальными минимумами («островами холода») в крупных лесопарках города, охлаждающий эффект которых зависит от площади парка, значения вегетационного индекса NDVI и индекса листовой поверхности.

### **Структура работы.**

Данная работа состоит из содержания, введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Полный текст работы изложен на 203 страницах, включает 41 таблицу и 106 рисунков. Библиографический список содержит 120 литературных источника, из них 55 на английском языке.

### **Благодарности.**

Автор диссертации выражает свою благодарность научному руководителю Локощенко М. А. за неоценимую помощь, понимание и поддержку во время подготовки и написания работы; Зимину М. В. за бесплатное программное обеспечение и предоставленную возможность обучения на базе ИТЦ «СканЭкс»; преподавательскому составу кафедры «Экологии и наук о Земле» университета «Дубна» за ценные советы и поддержку, академику Н. С. Касимову за доброе внимание и ценные советы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

Во введении представлены основные цели и задачи работы, обосновывается её актуальность и практическая значимость, а также краткая характеристика глав диссертации.

**В главе 1 Обзор литературы и методические вопросы** представлен обзор литературы о физико-географических характеристиках Московского региона, явлении городского «острова тепла» и его характеристиках, а также спутниковых данных. **В разделе 1.1 Физико-географическая характеристика Московского региона, включая климат, рельеф и водные ресурсы** предоставлена информация о физико-географическом положении

Москвы и Московской области. Подробно описано историческое изменение границ столицы. Обоснована причина выбора для анализа городского «острова тепла» границ города до 2012 года. Рассмотрены особенности климатических условий в различных классификациях климата (Б.П.Алисова, Л.С.Берга, В.П.Кёппена, Э. де Мартонна), морфологического строения территории (рельефа) как Московской области, так и самой Москвы. Приведены данные о гидрографической сети региона, ее особенностях и основных водных объектах.

**В разделе 1.2 Городские «острова тепла»: причины их образования, методы изучения, общие географические закономерности** содержатся сведения о городских «островах тепла» и причинах образования этого физико-географического явления. Рассмотрена общая пространственная структура «островов тепла», методы их изучения: по данным метеорологической сети, маршрутных съемок с использованием автоматических датчиков  $T_v$  и спутниковых систем, регистрирующих инфракрасное излучение поверхности. Приведены примеры применения этих методов на практике.

Данные спутников, видимо, впервые были использованы для анализа «островов тепла» применительно к Вашингтону и Балтимору (США) в конце 1970-х годов, что отмечено Г.Ландсбергом в его книге: Н.Е. Landsberg. *The Urban Climate*, 1981. Исследования «островов тепла» в поле температуры поверхности обобщены в монографии Т.Ока и др. (Т.Р.Оке at al. *Urban Climates*, 2017). В диссертации подробно рассмотрен ряд работ о поверхностных «островах тепла» по данным спутников в Скопье (Македония), Афинах (Греция), Нью-Йорке (США), Саламанке (Испания), Лондоне (Великобритания), Риме (Италия), Бангкоке (Таиланд), 28 городов Сибири (Россия), Калькутте (Индия), Будапеште (Венгрия) и др. Отдельные примеры проявления «острова тепла» Москвы на снимках спутников исследованы российскими учёными Е.А.Балдиной, М.Ю.Грищенко, М.И.Варенцовым и др. Заметим, что в большинстве работ для анализа поверхностных «островов тепла» использовались эпизодические или сезонные космические снимки, в то время как автором впервые проведён анализ многолетних рядов спутниковых данных с 2000 по 2020 гг.

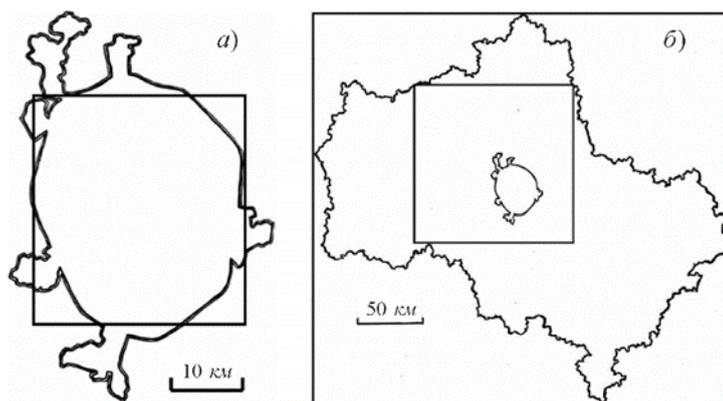
**В разделе 1.3 Использование спутниковых данных в городской климатологии. Свойства космических снимков, особенности измерений в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн, спутники Terra и Aqua, радиометр MODIS. Методические основы использования радиометрических данных о температуре поверхности** представлен обзор зарубежной и отечественной литературы по истории, методам и видам данных

дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены особенности регистрации инфракрасного излучения поверхности Земли и алгоритмы его перевода в данные о  $T_p$ . Проанализированы свойства космических снимков и радиометров. Описаны технические характеристики радиометра MODIS, выявлены его преимущества для целей работы по сравнению с другими съемочными системами. Рассмотрены тематические продукты, полученные с использованием данных радиометра.

**Глава 2 Поверхностный «остров тепла» Москвы** посвящена методическому описанию работы и анализу «острова тепла» г. Москва.

В разделе 2.1 **Данные и программное обеспечение** приведена общая информация о данных радиометра MODIS: пространственное разрешение 1 км, погрешность измерений  $T_p$  над сушей:  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Обсуждаются особенности применения космических снимков радиометра применительно к задачам данного исследования. Нами исследованы за 21 год только дневные снимки обоих спутников: качество ночных снимков хуже, поскольку ночью Москва часто находится на краю полосы съёмки или даже за её пределами. Спутники TERRA и AQUA пролетают днём над территорией Московского региона соответственно в 11–12 и 13–14 ч друг за другом обычно с интервалом 1 ч 50 мин. Иногда Москва может оказаться на крайних участках сразу двух полос, одна из которых будет с наименьшими помехами. В таком случае снимки TERRA и AQUA, принимаемые к анализу, могут отличаться друг от друга по времени всего на 10 минут. Учет точного времени пролета – очень важная задача в данном исследовании, так как городской «остров тепла» имеет четко выраженный суточный ход с минимумом поздним утром и в начале дня.

Изучая поверхностный «остров тепла» по спутниковым данным, автор столкнулась с несколькими методическими проблемами. Несколько разделов главы посвящены анализу и поиску решений особенностей использования радиометрических данных для анализа температурной аномалии города Москва. В разделе 2.2 **Анализ пространственной устойчивости значений интенсивности «острова тепла» в Москве** разбирается одна из этих методических проблем, а именно определение устойчивости в пространстве интенсивности поверхностного «острова тепла» в зависимости от выбора границ города и области сравнения. Приведены значения температуры поверхности в Москве при учете ее площади 991 км<sup>2</sup> в виде традиционных границ города (без Зеленограда), которые действовали вплоть до 2012 года, равновеликого им прямоугольника, описанного вокруг основной части города (рис.1), а также новых границ столицы с учётом «Новой Москвы».



**Рис. 1** Границы расчетных областей Москвы (а) и Подмосковья (б)

Интенсивность «острова тепла» ( $I = \Delta T_{\text{п}}$ ) как разность средних значений  $T_{\text{п}}$  по выборкам всех городских и всех загородных ячеек сравнивалась в зависимости от выбора границ как города, так и области сравнения: прямоугольник, вписанный в административные границы области площадью 15 955 км<sup>2</sup>, сами административные границы (46 570 км<sup>2</sup>) и прямоуголь-

ник площадью 94 851 км<sup>2</sup>, описанный вокруг них (Рис.1 и табл. 1).

**Табл. 1** Интенсивность «острова тепла» в зависимости от выбора границ города и области сравнения

<b>Изменение значения интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы в зависимости от выбора границ города (область сравнения – прямоугольник вокруг границ Подмосковья)</b>			
	Интенсивность «острова тепла» в границах Москвы до 2012 года, °С	Интенсивность «острова тепла» в границах прямоугольника, °С	Интенсивность «острова тепла» в новых границах города, включая «Новую Москву», °С
Средние значения за 2010-2013 гг.	3,1	2,7	1,4
<b>Изменение значения интенсивности поверхностного «острова тепла» в зависимости от выбора границ области сравнения (Москва – в границах до 2012 г.)</b>			
	Интенсивность «острова тепла». Область сравнения - реальные границы Московской обл., °С	Интенсивность «острова тепла». Область сравнения – прямоугольник, вписанный в границы области, °С	Интенсивность «острова тепла». Область сравнения – прямоугольник, описанный вокруг границ области, °С
Средние значения за 2009-2013 гг.	2,7	2,8	2,8
<b>Изменение значения интенсивности поверхностного «острова тепла» в Москве при разном удалении границ области сравнения от города</b>			
Расстояние от границы города, км	Температура поверхности в области сравнения, °С	Температура поверхности в Москве, °С	Интенсивность острова тепла, °С
5	18,6	20,4	1,8
10	18,4	20,4	2,0
15	18,2	20,4	2,2
20	18,1	20,4	2,3
25	18,0	20,4	2,4
30	17,9	20,4	2,5
35	17,8	20,4	2,6
40	17,7	20,4	2,7
45	17,7	20,4	2,7
50	17,7	20,4	2,7
55	17,7	20,4	2,7
60	17,7	20,4	2,7
~140	17,9	20,4	2,5

По результатам анализа автор сделала следующие выводы:

- Территория Москвы в её новых границах не подходит для анализа поверхностного «острова тепла» города, так как присоединенная в 2012 году так наз. «Новая Москва» слабо урбанизирована, например, плотность населения в её Троицком округе в 87 раз меньше, чем в традиционных границах города. Интенсивность поверхностного «острова тепла» в новых границах города оказывается заниженной более чем в 2 раза.

- В гипотетической «прямоугольной Москве», равновеликой её традиционной площади, поверхностный «остров тепла» был бы слабее из-за обширных холодных лесопарковых зон в углах прямоугольника («Лосиный остров» и др.).

- Значение  $I$  не зависит от площади области сравнения на расстояниях от 40 до 60 км от границ города. Слишком малая область сравнения при её близких к городу границах представлена в основном ближайшими пригородами столицы с большой долей урбанизированных территорий (городской застройки), что приводит к занижению расчетов интенсивности поверхностного «острова тепла». С другой стороны, при слишком большом удалении от границ города (140 км) в результатах проявляется географическая зональность, осложняющая их анализ.

**Раздел 2.3 Методические проблемы сравнений спутниковых данных о температуре поверхности с данными наземной метеорологической сети.** Он посвящен решению следующей методической проблемы – сравнению данных о  $T_{\Pi}$  с данными о температуре воздуха на высоте 2 м ( $T_{\text{В}}$ ) и поверхности на вскопанной площадке ( $T_{\text{С}}$ ) в Метеорологической обсерватории МГУ, измеренной стационарными термометрами ТМ-4 и ТМ-3. Расчет температуры поверхности по данным спутников TERRA и AQUA производился в единичном пикселе площадью 1 км<sup>2</sup> с координатами Метеорологической обсерватории МГУ.

Эти данные сравнивались с температурой воздуха на высоте 2 метров по данным стационарного термографа в час, ближайший ко времени пролета спутника, и температурой поверхности на вскопанной площадке в срок наблюдения, также ближайший к пролету спутника. Получены уравнения линейной регрессии:  $T_{\Pi} = 1,09 \times T_{\text{В}} + 0,16$ ;  $T_{\Pi} = 0,68 \times T_{\text{С}} - 1,45$ . Статистические связи температуры поверхности по данным спутников оказались чрезвычайно тесными с температурой как воздуха  $T_{\text{В}}$ , так и поверхности по стационарным измерениям  $T_{\text{С}}$  (коэффициент корреляции  $R$  составил соответственно 0,99 и 0,98 по выборкам из 163 снимков на примере 2011-2013 гг.). В то же время коэффициент линейной регрессии  $k$ , близкий к 1 при сравнении с  $T_{\text{В}}$ , оказался намного меньше при сравнении с  $T_{\text{С}}$ . Это отражает

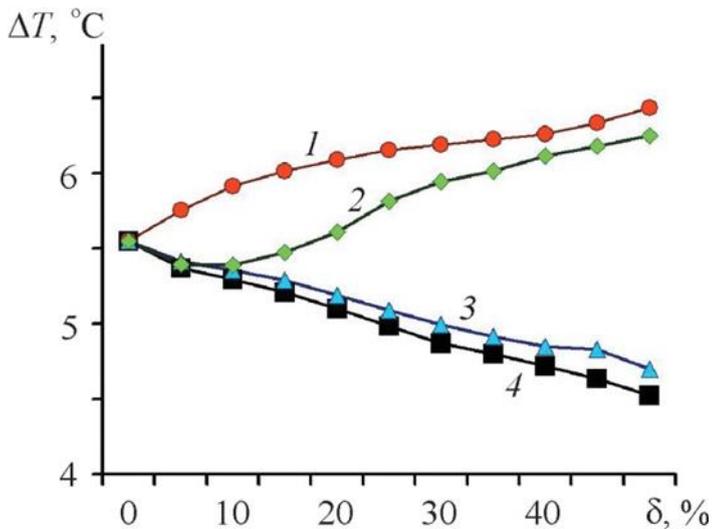
завышение стационарных оценок температуры поверхности из-за сильного нагрева оголенной поверхности вскопанной площадки площадью  $4 \times 6$  м, особенно летом, по сравнению с окружающей естественной поверхностью травы и крон деревьев. В среднем за год разность ( $T_{\text{П}} - T_{\text{В}}$ ) составила  $0,9 \pm 3,0$  °С, тогда как  $(T_{\text{П}} - T_{\text{С}}) = -6,5 \pm 8,6$  °С, а летом значение ( $T_{\text{П}} - T_{\text{С}}$ ) достигло даже  $-15,0 \pm 5,4$  °С.

Как известно, оценки средней интенсивности поверхностных «островов тепла» по данным спутников смещённые вследствие как дискретного времени пролёта спутников, так и влияния антициклональных условий, когда анализ снимков возможен, но «острова тепла» проявляются сильнее обычного. В этом разделе проведено сравнение интенсивности «острова тепла» в Москве по спутниковым снимкам и по данным метеорологической сети и выявлены зависимости ее значений от антициклональных условий и дневного времени пролета спутника. Она была рассчитана по данным 2014 и 2015 гг. как разность средних значений  $T_{\text{В}}$  4 московских и 13 подмосковных метеорологических станций с персоналом, т.е. всех, кроме Немчиновки и обсерватории им. Михельсона, и оказалась равной  $1,03$  °С в среднем за сутки и  $0,33$  °С в 12 ч – срок, наиболее близкий ко времени пролета спутников TERRA и AQUA. Таким образом, полуденное значение  $I$  по данным спутников занижено по сравнению со среднесуточной интенсивностью  $\sim$  в 3 раза.

Другая причина смещения оценок  $I$  – доступность данных о  $T_{\text{П}}$  только в антициклональных условиях (при ясной или малооблачной погоде), которые сами по себе усиливают «остров тепла». Отдельно рассчитанная интенсивность «острова тепла» в полдень на 2 м только в те дни пролета спутников, когда снимки оказались хорошего качества и были приняты к анализу (всего – 173 за 2 года), составила  $0,47$  °С. Следовательно влияние антициклональных условий приводит к завышению  $I$  приблизительно на 40% по сравнению со средней интенсивностью в 12 ч за все дни этих двух лет. Этот результат можно считать общей оценкой усиления «острова тепла» под влиянием антициклональных условий. С учётом тесной связи  $T_{\text{П}}$  и  $T_{\text{В}}$  можно предположить, что данная оценка близка и для приземного, и для поверхностного «островов тепла».

Препятствие для изучения «островов тепла» в поле  $T_{\text{П}}$  по данным спутников в средних и высоких широтах служит частая облачность: так, в Москве при среднем многолетнем балле покрытия облаками 7,7 доля идеальных снимков при ясном небе крайне мала (лишь 3%) и недостаточна для анализа. В связи с этим в ходе работы были получены оценки наибольшего балла облачности территорий Московской области и Москвы, при котором

анализ поверхностного «острова тепла» ещё возможен. Результаты приведены в разделе 2.4 **Численные эксперименты по имитации облаков на снимках в расчётах интенсивности «острова тепла» и их результаты.** Сами эксперименты заключались в работе над матрицами распределения  $T_{\Pi}$  на примере отдельных снимков при совершенно ясном небе. От них поочередно «отрезалось» число ячеек, эквивалентное 5, 10, 15 и так далее, до 50% от общего их количества с севера, юга, запада и востока области сравнения и Москвы с отдельными расчётами  $I$  на каждом шаге. На рис.2 представлены полученные результаты: прослеживается рост смещения оценок интенсивности поверхностного «острова тепла» по мере



**Рис. 2** Результаты эксперимента с имитацией облаков над территорией Московской области в разной доли  $\delta$  снимка за 30 июня 2010 г. 1 – юг; 2 – восток; 3 – запад; 4 – север.

увеличения доли имитируемого облачного покрова, хорошо согласующийся с географической зональностью. Так, исключение ячеек в южной части снимка ведёт к последовательному усилению «острова тепла», поскольку городская поверхность соотносится с более холодным севером области, а исключение северных районов – наоборот, к ослаблению «острова тепла», поскольку остающиеся южные ячейки в целом теплее.

Однако даже при исключении с любого направления половины площади снимка смещение  $I$  не превышает  $\pm 1^\circ\text{C}$ , т.е.  $\pm 18\%$  от значения  $I$  (на полном снимке 30/VI 2010 г. оно составило  $5,6^\circ\text{C}$ ).

По результатам проведённых экспериментов решено считать годными для анализа «острова тепла» все снимки с отсутствием явных помех и покрытием облаками не более 20% площади Москвы (поскольку термическая неоднородность города выражена сильнее) и не более 50% площади Московского региона; при этом погрешность в расчётах  $I$  лежит в допустимых пределах  $\pm 20\%$ .

**Раздел 2.5 Общая характеристика поверхностного «острова тепла» Москвы, закономерности годового и суточного хода его интенсивности** посвящен исследованию общих закономерностей этого явления. В соответствии с принятым критерием выявлены 1379

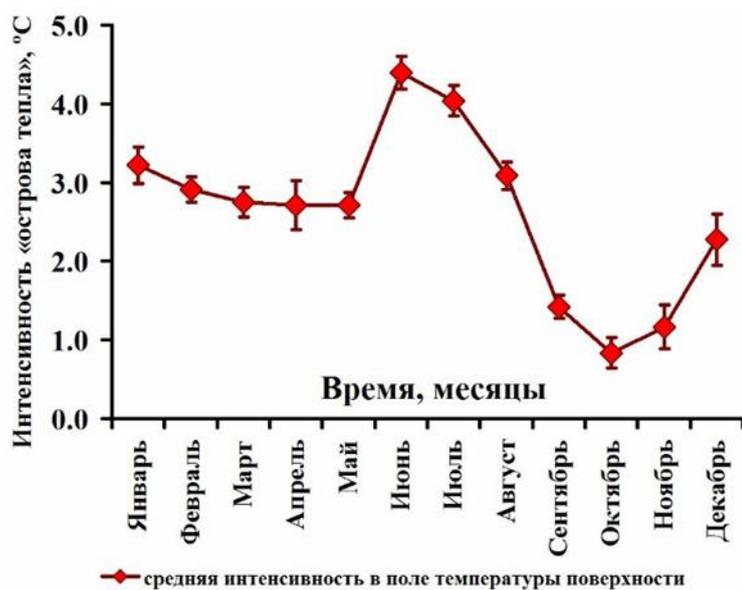
пригодных для анализа снимков за период с 2000 по 2020 годы. Интенсивность поверхностного «острова тепла» рассматривалась автором как разность средней  $T_{\Pi}$  в городе и в области сравнения:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\Gamma_i}}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{3_j}}{m} \quad (1)$$

где  $T_{\Gamma_i}$  и  $T_{3_j}$  – температура поверхности, измеренная внутри единичного пикселя городской и загородной территории соответственно;  $n$  – количество единичных пикселей внутри городской территории;  $m$  – количество единичных пикселей внутри загородной области сравнения. В нашем конкретном случае единичный пиксель имеет площадь 1 км<sup>2</sup>.

Средняя многолетняя интенсивность  $I$  составляет 2,6 °С при стандартном отклонении  $\sigma = 1,5$  °С; в отдельные дни она меняется от -3,2 до +7,7 °С. Наибольшее среднесезонное значение  $I$  отмечено летом, а наименьшее – осенью.

Годовой ход  $I$  в Москве представлен на рис.3. Наибольшее значение  $I$  наблюдается в



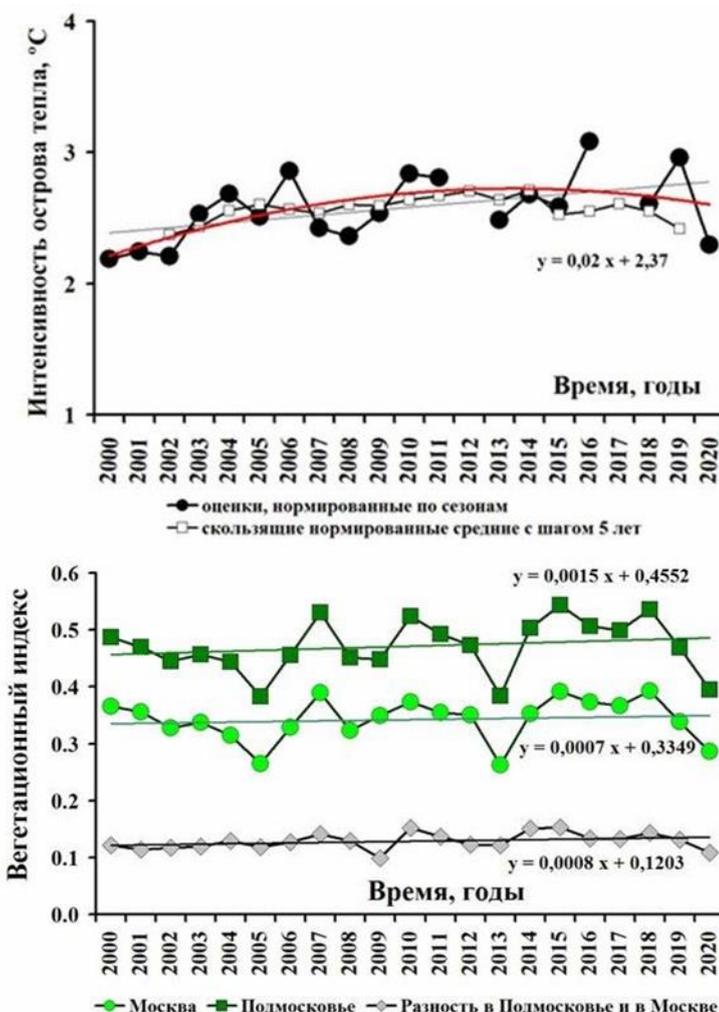
**Рис. 3** Годовой ход интенсивности поверхностного «острова тепла» за период 2000-2020 гг. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 0,95.

июне (4,3 °С), а наименьшее в октябре (0,9 °С). В зимние и весенние месяцы значение интенсивности стабильно и держится вблизи значения ~3 °С. С учётом 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, причём различия между летними и осенними значениями достоверны с доверительной вероятностью даже 0,9999.

Очевидно, что различия в интенсивности поверхностного «острова тепла» создаются контрастом термических и радиационных свойств поверхности в городе и за его пределами, включая состояние растительности. Наибольшие значения  $I$  в середине лета связаны с активной фазой вегетации и, следовательно, наибольшими затратами тепла на транспирацию

растениями в сельской местности (в городе растений меньше). Помимо этого, летом искусственные городские покрытия накапливают тепло, что усиливает «остров тепла». Осенний минимум  $I$  связан с окончанием вегетации и опадом листвы: в это время термические различия между городом и фоновой местностью наименьшие. Зимой и весной значения  $I$  промежуточные: снежный покров за городом обычно сплошной и чистый, тогда как в городе местами он отсутствует (дороги очищаются от снега, весной раньше образуются проталины) и, кроме того, загрязнён. Создающиеся различия в альбедо подстилающей поверхности, а также влияние антропогенных источников тепла, видимо, определяют более сильный зимой поверхностный «остров тепла» по сравнению с осенними месяцами.

## Раздел 2.6. Многолетние изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы и вегетационного индекса Москвы и Подмосковья за последние 20 лет.



**Рис. 4** Многолетние изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы (верх) и вегетационного индекса в Москве и Подмосковье (низ) по данным снимков MODIS. Чёрные и зелёные линии – линейные тренды, красная линия – параболический тренд

Среднегодовые значения  $I$  как Москвы, так и фоновой местности в 2000-2020 гг. возрастали с приблизительно одинаковой скоростью (коэффициенты линейной регрессии  $k$  составляют 0,07 и 0,06 °C/год соответственно). В следствие этого изменения поверхностного «острова тепла» незначительны.

На рис. 4 приведены среднегодовые значения интенсивности, нормированные по сезонам года, а также их скользящие средние с шагом 5 лет, за период 2000-2020 гг. В 2012 и 2017 гг. данных нет, поскольку в одном из сезонов обоих лет не оказалось ни одного пригодного снимка. Как видим, рост  $I$  в 2000-х гг. сменился в последующем стабилизацией значений, так что в целом за 20 лет не произошло значимых направленных изменений. Помимо  $I$ , на рис.4

приведены также средние за каждый год значения вегетационного индекса (NDVI) в Москве и в зоне сравнения в период активного развития растений с 1 апреля по 31 октября. В зоне сравнения в среднем по всей выборке из 780 снимков NDVI составляет 0,48, а в Москве – ожидаемо меньше (0,35). Как видно, никаких заметных изменений объёма фитомассы за 21 год не произошло ни в самих этих значениях, ни в их разности: все три коэффициента линейной регрессии  $k$  ничтожно малы.

Вероятными причинами стабилизации «острова тепла» являются как природные, так и социально-экономические факторы: приблизительное постоянство повторяемости ясного неба (способствующего усилению «острова тепла») и фитомассы в регионе по данным NDVI (определяющей затраты тепла на транспирацию), замедление и прекращение роста населения и энергопотребления города, а также его деиндустриализация.

В разделе 2.7 Влияние карантина из-за пандемии коронавируса в 2020 году на поверхностный «остров тепла» Москвы рассмотрены примеры сходных исследований в разных городах, показавших неоднозначные выводы. Автор провела сравнительные расчёты  $T_{\text{п}}$  и  $I$  в Москве за время карантинных ограничений с 31 марта до 6 июня 2020 г. и за тот же период в 2000-2019 годы. Оказалось, что как  $T_{\text{п}}$  и в Москве, и в Подмосковье, так и их разность ( $I$ ) были меньше, чем в эти даты в среднем за предыдущие 20 лет. Вероятное объяснение обоих эффектов — прохладная весна, связанное с этим замедление развития растительности, а также ослабление антропогенных источников тепла как в Москве, так и в Подмосковье.

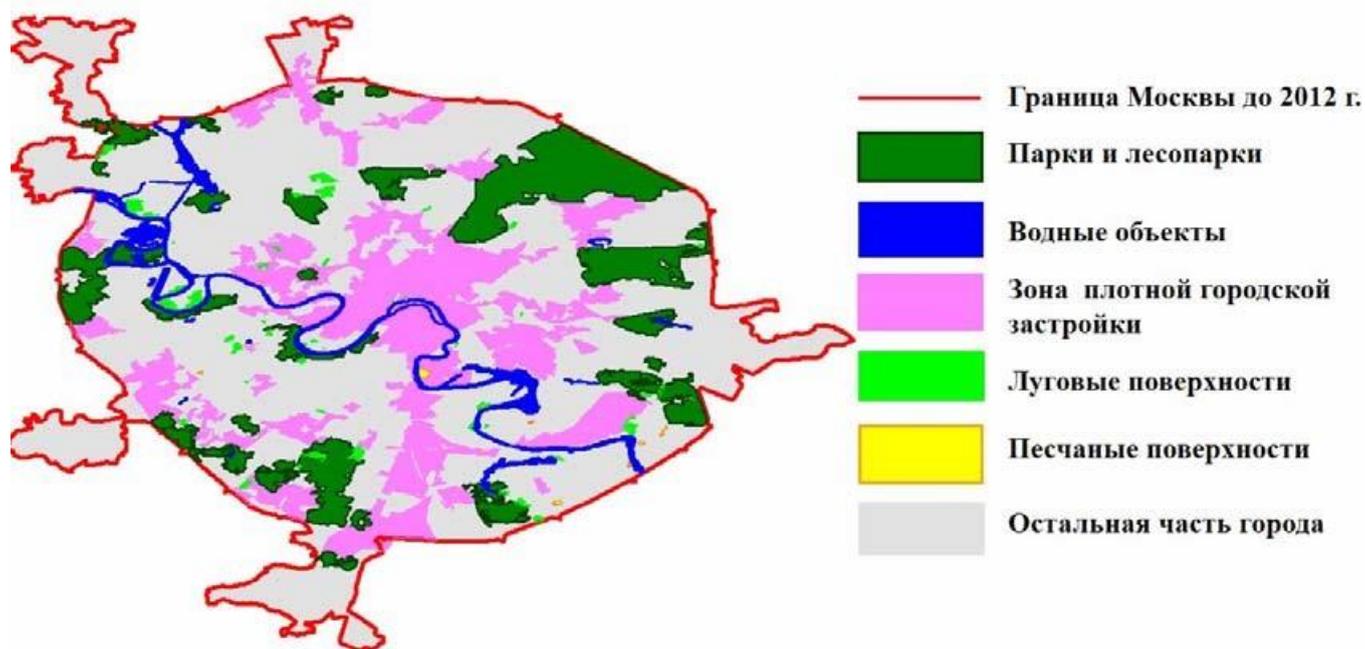
**Глава 3 Пространственная структура поверхностного «острова тепла» Москвы и термический режим разных типов городской поверхности** посвящена исследованию термической неоднородности города в поле  $T_{\text{п}}$ . В разделе 3.1 Термическая неоднородность городской поверхности и основы её классификации на примере Москвы описана авторская классификация городской территории, включающая 6 типов поверхности:

1. плотная городская застройка и промышленные зоны (любая по высотности и типу плотная застройка с преобладанием искусственных покрытий) – 183 км<sup>2</sup>;
2. леса и парки (все территории с преобладающей древесной растительностью разной степени сомкнутости крон) – 124 км<sup>2</sup>;
3. водные объекты (заливы, озера и р. Москва) – 29 км<sup>2</sup>;
4. луговые пространства (в пойме реки Москвы) – 8 км<sup>2</sup>;

5. песчаные поверхности (очень маленькие площади открытого песка – пляжи в пойме р. Москвы и песчаный карьер) – 0,8 км<sup>2</sup>;

6. остальная территория города, включающая в себя озелененную или разреженную застройку, а также пустырные территории – 646 км<sup>2</sup> (рис.5).

Разрешение снимков MODIS не позволяет использовать широко известные автоматические классификации типов городской поверхности (напр., Local Climate Zones Стюарта и Ока) из-за их слишком подробного деления в пространстве. Кроме того, излишне усложнённые схемы с большим количеством типов затрудняют анализ и создают элемент неопределённости в построении границ: так, взамен 10 связанных с городской застройкой типов LCZ мы делим её только на плотную и разреженную озеленённую (соответственно, используем только первый и шестой типы). Как видно из табл.2, лишь городская застройка существенно теплее города в целом.

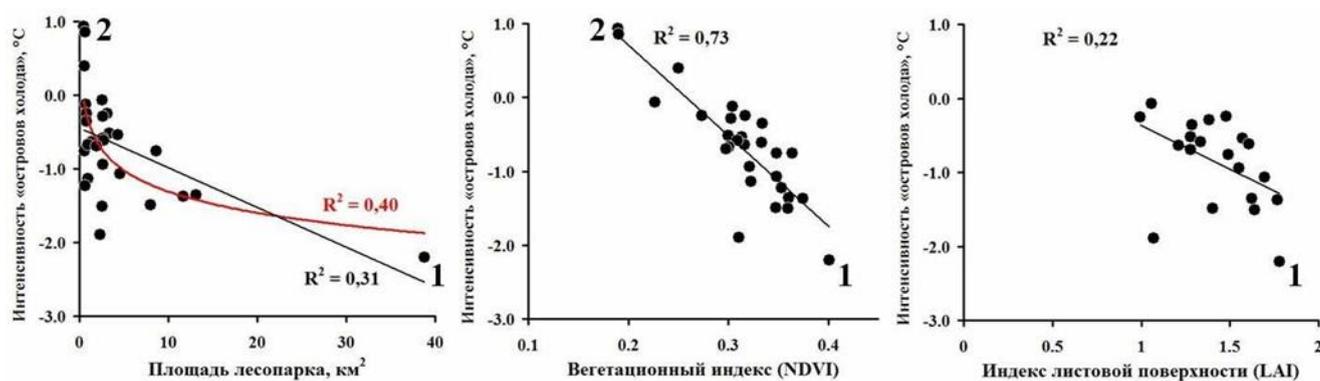


**Рис. 5** Типы городской поверхности Москвы (карта созданных векторных слоёв).  
Использованы административные границы Москвы до 2012 г.

**Табл. 2** Значения температуры поверхности и интенсивности температурного влияния по многолетним данным MODIS и снимкам спутника Landsat 8 за 2018 г.

По многолетним данным радиометра MODIS (2000-2012 гг.)						
	Москва в целом	Парки	Водные объекты	Городская застройка	Песчаные поверхности	Луга
Температура поверхности, °С	9,4	8,2	9,4	10,1	—	—
Температурное влияние, °С	—	-1,2	-0,0	0,7	—	—
По данным спутника Landsat 8 за 2018 год (6 снимков)						
Температура поверхности, °С	9,8	6,9	6,3	11,9	10,6	9,7
Температурное влияние, °С	—	-2,9	-3,5	2,1	0,8	-0,1

**Раздел 3.2 Локальные «острова холода» городских лесопарков Москвы.** Исследование связей интенсивности «островов холода» с их площадью, вегетационным индексом (NDVI) и индексом листовой поверхности (LAI) посвящено анализу локальных «островов холода» в лесопарках города. Рассмотрено влияние древесной растительности на  $T_{\text{П}}$  и  $T_{\text{В}}$  в городах. На территории Москвы выделено 28 парковых территорий площадью не менее  $0,5 \text{ км}^2$ , которые могут проявиться в поле  $T_{\text{П}}$  при разрешении снимков  $1 \text{ км}$ : от природного леса «Лосиный остров» вместе с парком Сокольники ( $38,80 \text{ км}^2$ ) до самой маленькой зелёной зоны Ваганьковское кладбище ( $0,51 \text{ км}^2$ ) – соответственно, 1 и 2 на рис.6. Общая площадь всех парков составила  $124 \text{ км}^2$ . Интенсивность «островов холода» рассчитывалась как разность средней  $T_{\text{П}}$  всех 28 парков и остальной части города. Среднее ее значение за 2008-2018 гг. составила  $-1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; наименьшее и наибольшее по отдельным снимкам – соответственно,  $-4,4 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $+0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . В годовом ходе «острова холода» сильнее всего выражены в июне ( $-2,7 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и слабее в ноябре ( $-0,2 \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Внутренние части крупных парков холоднее, чем парки в целом (в среднем на  $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Интенсивность «островов холода» отдельных парков зависит от их размера, породного состава, объема биомассы и плотности древостоя, в том числе сомкнутости крон. Помимо  $T_{\text{П}}$ , для каждого парка были рассчитаны также вегетационный индекс NDVI и индекс листовой поверхности LAI. Выявлены статистически значимые зависимости интенсивности локального «острова холода» парка от его площади (нелинейная), NDVI и LAI, представленные на рис. 6.



**Рис. 6** Зависимости интенсивности локальных «островов холода» от площади лесопарка (слева), значений индексов NDVI (середина) и LAI (справа). Приведены показатели достоверности  $R^2$  линейных (чёрный цвет) и логарифмического (красный цвет) трендов.

Исходя из представленных выше рисунков можно сделать вывод, что охлаждающий эффект парков тем сильнее, чем больше его площадь и фитомасса.

Температурное влияние водных объектов столицы рассмотрено в **разделе 3.3 Термический режим поверхности открытой воды, лугов и песчаных поверхностей на территории Москвы**. Для их анализа были оцифрованы все крупные участки русла р. Москвы и пруды, однако они невелики и не все проявляются в поле  $T_{\Pi}$  на снимках MODIS. Влияние водных объектов на температуру поверхности города имеет маятниковый характер: летом они на  $0,2^{\circ}\text{C}$  холоднее, а зимой на  $0,3^{\circ}\text{C}$  теплее окружающего города. В среднем же за год разность  $T_{\Pi}$  открытой воды и остальной части города близка к нулю. Для анализа поверхности песка и лугов, площадь которых в городе крайне мала, были привлечены данные спутника Landsat8 с разрешением 100 м. Как видно из табл.2 на примере 2018 г.,  $T_{\Pi}$  пойменных лугов близка к среднему значению для всего города, тогда как пляжи и песчаный карьер в среднем теплее остального города на  $0,8^{\circ}\text{C}$  – главным образом, за счёт их сильного нагрева летом.

Наиболее сложным в методическом плане оказалось оценить влияние плотной городской застройки, что описано в **разделе 3.4 Методические проблемы определения границ зоны плотной городской застройки и её термический режим**. Был составлен векторный слой этого типа поверхности и проведён расчет температурного влияния плотной застройки. Во все сезоны и месяцы года застройка теплее остального города в среднем на  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Отдельно была рассчитана интенсивность поверхностного «острова тепла» территории только плотной застройки Москвы. Она составила в среднем за 5 лет  $3,6^{\circ}\text{C}$ , в то время как значение  $I$  для всего города за те же годы оказалась меньше:  $2,8^{\circ}\text{C}$ .

В **разделе 3.5 Обобщение данных о температуре разных типов городской поверхности и анализ значимости различий между ними** исследованы различия  $T_{\Pi}$  трех типов: лесопарков, городской застройки и открытой воды. Статистический анализ проведён с использованием критерия Стьюдента:

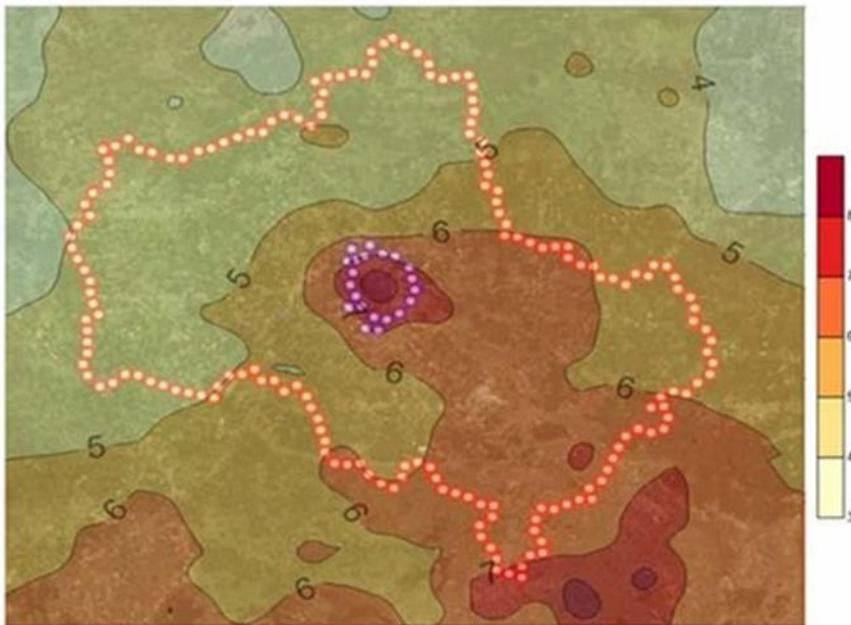
$$Z = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{\sigma^2(X)}{n} + \frac{\sigma^2(Y)}{m}}} \quad (2)$$

где  $X$  и  $Y$  – математические ожидания обеих выборок,  $\sigma^2(X)$  и  $\sigma^2(Y)$  – их дисперсии;  $n$  и  $m$  – их размер. В дополнение к (2), значимость различий оценивалась также по непараметрическому критерию Вилкоксона. Оказалось, что летом различия между температурой плотной застройки и открытой воды значимы с доверительной вероятностью  $p=0,95$ , а между плотной застройкой и лесопарками ( $T$  крон деревьев и поверхности в просветах между

ними) – даже с  $r=0,99$ . Весной и осенью до начала вегетации и после опадания листьев, а также зимой при наличии на всей территории города снежного покрова различия между типами поверхности выражены слабее.

**Глава 4. Температура поверхности и «острова тепла» малых городов Московского региона.** Она посвящена изучению среднего многолетнего поля  $T_{\text{п}}$  в Московской и соседних областях, части которых входят в зону сравнения.

**В разделе 4.1 Исследование поля температуры поверхности Московского региона, его географической зональности и многолетних изменений по данным спутников Terra и Aqua** представлены карты температуры поверхности по данным спутников, построенные в программе Surfer10.1 методом интерполяции. Пример такой карты показан на рис.7. Поверхностный «остров тепла» Москвы выражен двумя замкнутыми (7 и 8 °С) и одной полузамкнутой (6 °С) изотермой. Помимо этого, проявляется географическая зональность в виде общего роста  $T_{\text{п}}$  в направлении с северо-запада на юго-восток.



**Рис. 7** Пространственное поле температуры поверхности Московского региона по данным спутников за 2000-2020 гг. Изотермы проведены через 1 °С, Москва в границах до 2012 г

Проведен регрессионный анализ зависимости средней  $T_{\text{п}}$  в отдельных районах и городских округах Московской области от географического положения, лесистости территории, состояния растительного покрова (NDVI), типа и состояния почвы, а также плотности общего и городского населения. Наиболее тесная связь выявлена между состоянием растительного покрова, лесистостью и плотностью населения.

**Раздел 4.2 Сравнительный анализ поверхностных «островов тепла» городов и малых населённых пунктов Московского региона** посвящен изучению «островов тепла» 10 городов и деревень Московской и соседних областей (рис. 8) в широких диапазонах площади и численности населения (от  $10^{-1}$  до  $10^3$  км<sup>2</sup> и от  $10^1$  до  $10^7$  человек). Почти все эти поселения имеют компактную форму, находятся на равнине вдали от крупных водоемов,

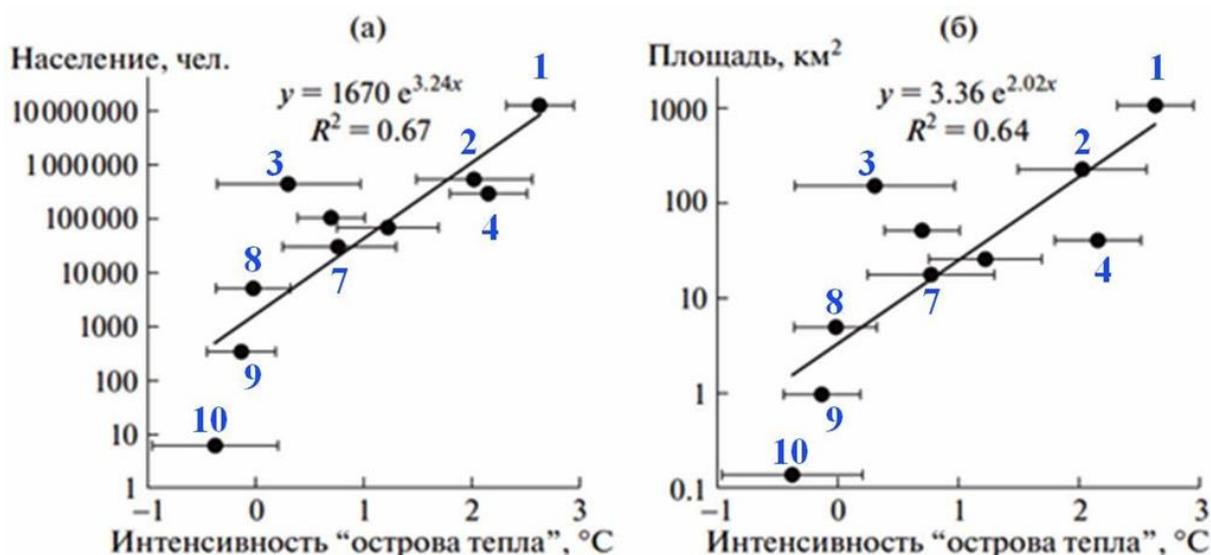


**Рис. 9** Карта Московского региона с населенными пунктами, выбранными для анализа (цифровые обозначения: 1 – Москва в границах до 2012 г., 2 – Рязань, 3 – Тверь, 4 – Подольск, 5 – Ногинск, 6 – Дмитров, 7 – Можайск, 8 – Верея, 9 – Афанасово, 10 – Бяконтово).

вающим границы малых деревень,  $I > 0$  °С и в них. Зависимости интенсивности поверхностных «островов тепла» как от численности населения, так и от площади населенного пункта с высокой достоверностью описываются экспоненциальными функциями: коэффициенты корреляции в полулогарифмических координатах  $R$  равны соответственно 0,82 и 0,80 (рис.9).

окружены в основном сельской местностью и не имеют общих границ с другими городами. Помимо расчётов  $I$ , методом двоичного кодирования с использованием эталонных участков определялись доли плотной застройки и зелёных зон в площади каждого из пунктов.

На примере 118 снимков в 2018 г. получено, что  $I$  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 °С для Москвы. По данным спутника Landsat 8 с высоким разрешением, точнее учиты-



**Рис. 8** 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 снимкам

Разброс в значениях отражает особенности отдельных мест: так, очень тёплая поверхность Подольска ( $I = 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) связана с высокой долей в нём плотной застройки (13%, выше только в Москве) и, отчасти, с тепловым следом близкой столицы. Напротив, неожиданно слабый «остров тепла» Твери ( $I = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) связан с большой долей парков в площади города (19%) и проявлением зональности (Тверь находится вблизи северного края зоны сравнения).

**Глава 5 Поверхностный «остров тепла» в условиях тропиков** посвящена изучению «островов тепла» тропических городов по данным MODIS на примере Дели и Бангалора (Индия) в 2017-2018 гг. В **разделе 5.1 Изучаемая территория** приводится описание ее климатических условий. **Раздел 5.2 Методические аспекты анализа данных в условиях тропиков** посвящен выбору границ обоих городов и зон сравнения с учётом рельефа. В **разделе 5.3 Характеристика поверхностных «островов тепла» в условиях тропиков** излагаются основные результаты. Среднегодовые оценки  $I$  затруднены из-за сплошной облачности во время летнего муссона: данных для Дели нет с июля по август, а для Бангалора – с апреля по сентябрь. Как оказалось, в среднем за остальные месяцы «остров тепла» Дели не выражен ( $I = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), а Бангалор в поле  $T_{\text{П}}$  представлен даже «островом холода» ( $I = -1,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Это объясняется значительным озеленением обоих городов, сильно застроенными их пригородами, а применительно к Бангалору – и его возвышенным положением на плато. Полученный результат расширяет выводы работы, показывая неоднозначность проявлений связанных с городами термических аномалий в поле температуры поверхности.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. На территории города Москва существует устойчивая положительная температурная аномалия в поле температуры поверхности.
2. В ходе экспериментов с имитацией облаков вычислены пределы пригодности снимков для анализа поверхностного «острова тепла», при которых смещение оценок интенсивности не превышает  $\pm 20\%$ .
3. С привлечением данных метеорологической сети установлено, что интенсивность поверхностного «острова тепла» в ясные и малооблачные дни завышена на  $\sim 40\%$  по сравнению со средним значением за все дни. В тоже время, в часы пролёта спутников (11-14 ч) интенсивность  $\sim$  в 3 раза меньше среднесуточного значения.

4. Средняя многолетняя интенсивность поверхностного «острова тепла» Москвы составляет за период 2000-2020 гг. 2,6 °С; в отдельных случаях она меняется в широких пределах от -3,2 до +7,7 °С. В годовом ходе интенсивность наименьшая в октябре-ноябре и наибольшая в июне при активной вегетации.

5. Пространственное поле температуры поверхности в Московском регионе отражает географическую зональность, а также влияние крупного города, лесистости территории и типа почв (наименее залесённые районы в целом теплее).

6. Крупные городские леса и парки являются локальными «островами холода»; в среднем они на 1,3 °С холоднее остальной поверхности города. В годовом ходе их охлаждающий эффект наибольший в июне (-2,7 °С) и наименьший в ноябре (-0,2 °С). Получены статистически значимые связи интенсивности «островов холода» с площадью лесопарка, вегетационным индексом и индексом листовой поверхности, косвенно отражающими объём фитомассы.

7. Явление «острова тепла» присуще в средних широтах средним и даже малым населённым пунктам.

8. В специфических условиях тропиков «острова тепла» даже в крупных мегаполисах могут не проявляться.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных **Web of Science, Scopus, RSCI:**

1. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. – 2020. - № 7. - С. 50-63. (Импакт-фактор РИНЦ = 1.53; 0,81 п.л.; вклад автора 50%)  
Lokoshchenko M.A. **Erukova E.A** Urban Heat Island in Moscow Derived from Satellite Data // Russian Meteorology and Hydrology. – 2020. - Vol. 45, № 7. - pp. 488–497. (JCI = 0.22; 0,81 п.л.; вклад автора 50%)
2. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Острова тепла малых городов и деревень Московского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле – 2021. – Т. 500, № 2. - С.200-207. (Импакт-фактор РИНЦ = 1.37; 0,4 п.л.; вклад автора 50%)  
Lokoshchenko M.A., **Erukova Ye.A.** Heat Islands of Small Towns and Villages in Moscow Region // Doklady Earth Sciences – 2021. - Vol. 500, Part 2 - P. 875–881 (SJR =

0.295; 0,4 п.л.; вклад автора 50%)

3. Lokoshchenko M.A. **Erukova E.A** Surface Urban Heat Island in Moscow during the COVID-19 Pandemic Lockdown in 2020 // *Geography, Environment, Sustainability – 2022.* - Vol.15, №.4. - pp.134-144. (SJR = 0,35; 0,792 п.л.; вклад автора 50%)
4. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.**, Алексеева Л.И. О современных изменениях «острова тепла» Москвы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле – 2023. – Т. 511, № 2. - С. 243-253. (Импакт-фактор РИНЦ = 1,37; 0,63 п.л.; вклад автора 30%)

Lokoshchenko M.A., **Erukova E.A.**, and Alekseeva L.I. Modern Changes of the Urban Heat Island in Moscow // *Doklady Earth Sciences – 2023.* - Vol. 511, Part 2, - P. 716–725 (SJR = 0.295; 0,4 п.л.; вклад автора 50%)

#### **Иные публикации автора по теме диссертации:**

1. **Сорокина 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 (Импакт-фактор РИНЦ = 0,032; 0,81 п.л., вклад автора 60%)
2. Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., **Erukova Ye.A.** Urban Heat Island in Moscow at different heights, depths and on the surface // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) – 2020.* - Vol.606. – 012030 (SJR = 0,21; 1,16 п.л., вклад автора 30%)
3. Lokoshchenko M.A., **Sorokina E.A.** Urban ‘heat island’ in Moscow by satellite data // In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12<sup>th</sup> Symposium on the Urban Environment, Toulouse, France – 2015.* - 11-7-3911378\_a (Импакт-фактор отсутствует, 0,58 п.л., вклад автора 50%)
4. **Сорокина Е.А.**, Локощенко М.А., Алексеева Л.И. Анализ интенсивности городского «острова тепла» в Москве // Труды VII Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум» – 2015. – 2015013948 (Импакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 70%)
5. **Сорокина Е.А.**, Локощенко М.А. Острова холода в Москве // Труды Пятого Международного экологического конгресса (седьмой международной научно-технической

- конференции) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT-2015, Самара – Тольятти – 2015. – Том. 5. – С. 254-261 (Импакт-фактор отсутствует, 0,92 п.л., вклад автора 70%)
6. **Енукова Е.А.** Температура поверхности Московского региона по данным спутников //Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В.Ломоносова. Под ред. М.А.Локощенко. – М.: МАКС Пресс - 2018. – Т. 1. - С. 124-129 (Импакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 100%)
7. **Енукова Е.А.** Поверхностный городской «остров тепла» в Москве в 2018 году по данным орбитальных спутников // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В.Ломоносова. Под ред. М.А.Локощенко. – М.: МАКС Пресс - 2019. – Т.1. - С. 111-118 (Импакт-фактор отсутствует, 0,46 п.л., вклад автора 100%)
8. Локощенко М.А., Алексеева Л.И., **Енукова Е.А.**, Корнева И.А. Остров тепла Москвы и его климатические характеристики. // Материалы I Белорусского Географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества. Минск. - 2024 – Ч. 1. – С. 279-284 (Импакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 30%)