

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата географических наук Енуковой Евгении Александровны
на тему: «Городские «острова тепла» в поле температуры поверхности
по данным космических снимков»
по специальности 1.6.21 – Геоэкология**

Диссертационная работа Енуковой Евгении Александровны «Городские «острова тепла» в поле температуры поверхности по данным космических снимков» посвящена изучению обусловленных антропогенным влиянием тепловых аномалий на поверхности в московском регионе с использованием спутниковых данных. Основная цель исследований: выявление пространственных и временных показателей «острова тепла» в Москве по данным спутников о температуре поверхности региона. В работе решены задачи: разработана методика работы с данными удаленного зондирования Земли о температуре поверхности и способов их применения для расчета показателей поверхностного «острова тепла» в Москве, изучены годовой ход и долговременные изменения, пространственная структура поверхностного «острова тепла» Москвы, выполнен анализ систематических смещений в оценках интенсивности поверхностного «острова тепла», связанных с её изменениями в суточном ходе и наличием данных преимущественно в антициклональных условиях, исследованы поверхностные «острова тепла» в населённых пунктах Московского региона и соседних областей, выявлены зависимости их от площади и числа жителей, установлены особенности городских поверхностных «островов тепла» в Московском регионе и в двух крупных городах Индии (Дели и Бангалор).

Актуальность темы диссертации подтверждается запросом на установление достоверных количественных показателей антропогенного воздействия на окружающую среду с целью разработки политики снижения негативного влияния, т.е. относится к одной из приоритетных задач современной климатологии. Тепловые аномалии в поле температуры над городскими поселениями представляют собой мезомасштабные явления, с которыми связаны не только аномалии погодных явлений (увеличение осадков и облачности, уменьшение солнечной радиации в городе и др.), но и уменьшение комфортности проживания горожан. Изучению антропогенного сигнала в поле температуры приземного воздуха в Москве посвящено довольно много работ; выполненные оценки поверхностных температурных аномалий по многолетним данным (2000-2020 гг.), их сезонной и пространственной изменчивости получены впервые. Использование данных космических спутников сопряжено с необходимостью разработки методики

обработки спутниковых измерений и преобразования их в температуру поверхности; разработанная и описанная в диссертации методика может быть полезной для других исследователей. Если «острова тепла» в больших городах – довольно популярное научное направление, то количественные оценки интенсивности тепловых аномалий в малых городах имеют востребованность и представляют самостоятельную научную ценность.

Диссертация объемом 231 стр. включает введение, 5 глав, заключение и список литературы. Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели и задачи, дается краткая характеристика глав.

Глава 1 содержит описание физико-географических характеристик Московского региона, обозначена проблема возникновения т.н. островов тепла в городах и методов их изучения по данным метеорологической сети, маршрутных съемок и спутниковых систем, регистрирующих инфракрасное излучение поверхности. Представлен обширный обзор зарубежных и отечественных научных публикаций о поверхностных «островах тепла» по данным спутников и отмечено, что в большинстве работ использовались эпизодические или сезонные космические снимки. Автором впервые проведён анализ многолетних рядов спутниковых данных с 2000 по 2020 гг. Описаны методические основы использования радиометрических данных о температуре поверхности, свойства космических снимков и радиометров и преимущества радиометра по сравнению с другими системами. Показаны особенности регистрации инфракрасного излучения поверхности Земли и алгоритмы его перевода в данные о поверхностной температуре (T_{Π}).

Глава 2 посвящена методике анализа «острова тепла» по спутниковым данным; поиску решений использования радиометрических данных для анализа температурной аномалии, в частности, по определению устойчивости в пространстве интенсивности поверхностного «острова тепла» I в зависимости от выбора границ города и области сравнения. Интенсивность «острова тепла» оценивалась как разность средних значений T_{Π} по выборкам всех городских и всех загородных ячеек космических снимков. Сделан вывод, что значение I не зависит от площади области сравнения на расстояниях от 40 до 60 км от границ города. Важнейшим этапом исследований является сравнение спутниковых данных о температуре поверхности с данными наземной метеорологической сети. Используя данные о температуре воздуха на высоте 2 м ($T_{\text{В}}$) и поверхности на вскопанной площадке ($T_{\text{С}}$) в Метеорологической обсерватории МГУ, показано завышение станционных оценок температуры поверхности; отмечено полуденное занижение примерно в 3 раза значения I по данным спутников по сравнению со средней среднесуточной разностью « $T_{\text{В}}(\text{город}) - T_{\text{В}}(\text{загород})$ ». Показано, что в

антициклональных условиях I приблизительно на 40% больше по сравнению со средней интенсивностью в 12 ч., погрешность в расчётах I лежит в допустимых пределах $\pm 20\%$.

По данным 1379 пригодных для анализа снимков за период с 2000 по 2020 годы установлена средняя многолетняя I равная $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sigma = 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) с диапазоном изменчивости $(-3,2) - (+7,7)\text{ }^{\circ}\text{C}$, с сезонным максимумом летом, минимумом осенью. Выявленную стабилизацию «острова тепла» в целом за 20 лет автор связывает с природными социально-экономическими факторами. **Глава 3** посвящена исследованию термической неоднородности в поле $T_{\text{П}}$ Москвы. Представлена авторская классификация городской территории, включающая 6 типов поверхности, рассчитаны $T_{\text{П}}$ по многолетним данным MODIS (2000-2012 гг.) и снимкам спутника Landsat8 (измерения 2018 г.). Из приведенных данных видно, что площадь плотной застройки в Москве в 1,5 раза больше лесопарковой территории. В разделе 3.2 представлен анализ связей интенсивности «островов холода» в лесопарках города с их площадью, вегетационным индексом (NDVI) и индексом листовой поверхности (LAI). Выявлены статистически значимые зависимости интенсивности локального «острова холода» парка от его площади (нелинейная), NDVI и LAI. Представленные в разделе 3.3 исследования свидетельствуют, что в целом значимого влияния на I температуры поверхности открытой воды (3% от общей площади Москвы), лугов и песчаных поверхностей (1%) не выявлено. В разделе 3.4 рассчитана интенсивность поверхностного «острова тепла» территории только плотной застройки Москвы, в среднем за 5 лет I оказалась равной $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при значении I для всего города $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Глава 4 посвящена изучению среднего многолетнего поля $T_{\text{П}}$ в Московской и соседних областях. По данным спутников Terra и Aqua представлены карты, указывающие на выраженный поверхностный «остров тепла» Москвы с температурой на $2-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше, чем в ближних окрестностях на фоне географической зональности в виде общего роста $T_{\text{П}}$ в направлении с северо-запада на юго-восток. Для 9 малых поселений региона установлено, что зависимости I от численности населения и от площади населенного пункта с высокой достоверностью описываются экспоненциальными функциями.

Глава 5 посвящена изучению «островов тепла» в двух городах Индии - Дели и Бангалор- по данным измерений MODIS в 2017-2018 гг. Описана методика выбора границ обоих городов и зон сравнения с учётом рельефа. Из-за сезонно обусловленной облачности расчеты I стали возможными только для отдельных месяцев и оказалось, что в Дели «остров тепла» не выражен ($I = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), а в расположенном на возвышенности г. Бангалор в поле $T_{\text{П}}$ обнаружен «остров холода» ($I = -1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Несмотря на «экзотичность» географии

исследуемых объектов, признается полезность проведенного анализа, расширяющего полученные на московском регионе представления о формировании поверхностных тепловых аномалий в регионах компактного проживания населения с развитой городской инфраструктурой.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. Результаты диссертации изложены в 12 научных публикациях автора в основном со своим научным руководителем, 4 из которых входят в наукометрические базы Web of Science, Scopus.

Научная новизна исследований состоит прежде всего в том, что по спутниковым данным определены средняя многолетняя интенсивность поверхностного «острова тепла», её годовой ход и изменчивость в целом для г. Москва, отдельно - в «островах холода» в лесопарках города с учетом вегетационного индекса и индекса площади листовой поверхности, а также – на территории наибольшей тепловой аномалии - в районах плотной городской застройки. К важным результатам методического плана относятся выявленные пороговые значения облачности для анализа спутниковых данных, критерии выбора границ и площади для корректной оценки интенсивности тепловой аномалии, полученные поправки для приведения интенсивности поверхностного «острова тепла» по данным срочных спутниковых измерений к среднесуточным значениям, а также для погодных условий неантициклонального типа. Представляет ценность установленные по данным в поселениях московского региона зависимости интенсивности «островов тепла» от их площади и числа жителей.

Полученные результаты имеют практическую значимость: могут быть использованы в разработке мероприятий для экономии энергоресурсов в зимнее время и по увеличению затрат на охлаждение летом; показанный охлаждающий эффект городских лесопарков может быть использован при планировании развития рекреационных зон.

Достоверность полученных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых ведущих профильных научных журналах, докладами автора на многочисленных международных и всероссийских конференциях и школах, сравнением и сходимостью результатов с полученными другими исследователями.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Выносимые на защиту положения представляют главные полученные соискателем научные результаты.

В качестве замечаний необходимо отметить следующее.

1. Характерной чертой стиля текста диссертации (на 231 странице) является приближенное к литературному многословное изложение с излишними подробностями. Экскурс в историю развития Москвы, классификация климатов и описание рельефа интересны, но к теме не имеют прямого отношения (разд.1.1); в далеко выходящем за пределы темы исследований пространно изложены материалы и в разд. 1.2. При несомненной полезности, занимающая 35 страниц глава 1 (содержит 21 рисунок) воспринимается как углубленный лекционный курс.
2. Название разд. 2.5 «Численные эксперименты по имитации облаков на снимках ...» некорректно, т.к. *численные* эксперименты проводятся с помощью математического моделирования.
3. В разд. 2.7 нечетко обозначена связь описанных многолетних изменений интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы за последние 20 лет с современными изменениями климата.
4. В разработанной классификации термической неоднородности городской поверхности (разд. 3.1) отсутствует важный инфраструктурный элемент – дорожные покрытия, которые занимают почти 10 % территории города в старых границах, при этом выделены в отдельные типы луга и песчаные земли с общей площадью по моим расчетам менее 1% .
5. В Разделе 3.2, посвященном «островам холода» городских лесопарков Москвы, приводится много интересных материалов, но текст на 34 страницах изобилует многими деталями и подробным описанием частных случаев, его можно было бы изложить в более сжатой форме, как и раздел 3.3.
6. Было бы полезным обозначить синоптические ситуации и погодные условия, когда Москва оказывается холоднее, чем какая-либо часть территории в области.
7. Включение в диссертацию главы 5 «Поверхностный «остров тепла» в условиях тропиков», на мой взгляд, лишь утяжеляет работу, поскольку амбициозный вывод, что получены оценки интенсивности поверхностных «островов тепла» для крупнейших городов Индии, подкреплен исследованиями на ограниченных данных по двум мегаполисам. Следует уточнить, относится ли к тропикам расположенный на широте примерно 13 градусов г. Бангалор.

В целом, диссертация Енуковой Е. А. представляет собой законченное научное исследование с достоверными результатами многолетнего кропотливого труда и вдумчивого анализа, указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.21 – Геоэкология (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Енукова Евгения Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.21 – Геоэкология

Официальный оппонент:

доктор географических наук,
главный научный сотрудник Отдел численных краткосрочных прогнозов
Регионального специализированного метеорологического центра Москва
Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации"

Кузнецова Ирина Николаевна

17 апреля 2025 г.

Контактные данные:

тел.: 8 499 252 34 48 labmuza@mail.ru

**Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:**

25.00.30 метеорология, климатология, агрометеорология

Адрес места работы:

123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1
Рабочий e-mail: hmc@mesom.ru , рабочий телефон, (499)252-34-48

Подпись сотрудника

Кузнецовой Ирины Николаевны

удостоверяю:

Начальник отдела кадров

О.П. Иноземцева

16 апреля 2025