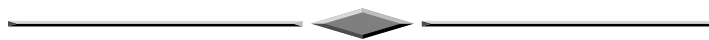


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.8(470.23-25)

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-61-70

Спутниковое картирование динамики «островов тепла» г. Санкт-Петербурга

А. В. Жаркова^{1,2}✉, А. А. Оripова²

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Российская Федерация

² Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: zharkova.av@mipt.ru

Аннотация. В данной статье приведены результаты спутникового картирования «городских островов тепла» г. Санкт-Петербурга, позволяющего оценить пространственно-временные вариации дистанционно измеренной температуры подстилающей поверхности. Актуальность работы обуславливается тем, что в настоящее время вопрос валидации показателей температуры подстилающей поверхности, рассчитанных с помощью космических снимков в динамике за несколько лет и посезонно, со значениями, полученными с помощью газоанализаторов экспериментально, подробно не изучался. Представлены результаты экспериментов по измерению концентрации монооксида углерода, температуры, влажности и давления для учета их вклада в образование «островов тепла». На основе расчетов индексных изображений, необходимых для изучения состояния вегетационной активности растений, в исследуемых территориях проведена оценка и выявлено угнетенное состояние растительности. Данные, полученные в результате экспериментов, подтверждены информацией из открытых источников. Сделан вывод о возможности дистанционного мониторинга точек перегрева подстилающей поверхности по данным ДЗЗ и Интернета вещей при увеличении выборки космических снимков, а также статистической обоснованности заключений.

Ключевые слова: «острова тепла», космические снимки, Landsat 8, Landsat 9, индексные изображения

Для цитирования:

Жаркова А. В., Оripова А. А. Спутниковое картирование динамики «островов тепла» г. Санкт-Петербурга // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 61–70. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-61-70

Введение

В связи с увеличением среднегодовой температуры Земли на более чем +2 °С к концу текущего столетия по сравнению с уровнем до начала промышленной революции, международное научное сообщество выработало стратегию предотвращения негативных экологических последствий глобального потеп-

ления [1]. Однако помимо глобального потепления, над крупными городскими агломерациями проявляются феномены, известные как «тепловые острова» – участки повышенной температуры воздуха и поверхности городской среды. К. Я. Кондратьев отмечал, что из-за формирования «тепловых островов» результаты прогнозирования глобального по-

тепления, полученные с применением многопараметрических физических моделей на основе данных, собранных мировой сетью метеорологических наблюдений, могут быть повышены [2].

Природные условия города и окружающей его сельской местности различаются. Так, для городских пространств характерен особый микроклимат [3–7]. В городе меньше зеленых насаждений, больше зданий, дорог, из материалов, задерживающих, но не отдающих тепло, больше тепловых выбросов от промышленных предприятий, автотранспорта. Таким образом происходит нарушение в нагревании поверхности: в центре городов увеличивается температура и уменьшается испарение [8].

Для снижения негативных экологических последствий, образующихся в результате работы промышленных предприятий, необходимо внимание к тепловым выбросам, исходящим от них в атмосферу. Мониторинг данных выбросов входит в производственный экологический контроль. Однако вопросы систематизации данных лабораторных исследований с нескольких объектов, прогнозы температурных показателей, оценки качества окружающей природной среды в зоне влияния предприятий остаются открытыми. Их можно решить с помощью спутникового картирования земной поверхности.

Целью исследования являлось изучение пространственно-временного распределения температурных аномалий, возникающих вследствие антропогенной деятельности в г. Санкт-Петербурге. Ранее в России были проведены крупные исследования по изучению «островов тепла»: оценка теплового загрязнения Москвы [9], изучение явления городских островов тепла в условиях Заполярья, а именно полярной ночи, при помощи экспериментальных измерений и данных спутниковой съемки на примере г. Норильска [10], взаимодействия железнодорожных транспортных узлов и окружающей среды с помощью снимков со спутника Landsat 8 [11].

Для г. Санкт-Петербурга производили картирование теплофизических свойств поверхности [12, 13], на основе которого был смодели-

рован прогноз температуры до 2024 г. Однако валидации показателей температуры, рассчитанных с помощью космических снимков в динамике (2018–2022) со значениями, полученными с помощью газоанализаторов экспериментально, ранее подробно не проводилось. В данной статье проведено изучение процесса посезонно. Это позволяет выявить тепловые аномалии не только в теплое и холодное время года, когда «острова тепла» наиболее заметны, но и в переходные сезоны, где идет большее сглаживание на фоне средних температур поверхности.

Ху, L. Y., Xie, X. D., и Li, S. отмечают, что при изучении городских территорий немаловажным является и исследование нормализованного индекса вегетационной растительности (NDVI) [14]. Этот показатель оценивает фотосинтетически активную биомассу. В представленном исследовании расчет данного показателя актуален, так как растения за счет транспирации влияют на испарение с подстилающей поверхности, что может оказывать влияние на формирование тепловых аномалий. Также индексные изображения, примером которых являются растры с рассчитанным NDVI, могут помочь оценить состояние окружающей среды в тех местах, где нет возможности оценить экосистемы визуально из-за труднодоступности [15].

Методы и материалы

Для определения «островов тепла» и изучения их пространственного положения использовались снимки Landsat 8 [16]. Этот космический аппарат позволяет получать мультиспектральные данные с пространственным разрешением до 30 м в видимом и ближнем ИК-диапазоне, и до 100 м в дальнем ИК-диапазоне [17]. В качестве исходных данных использованы материалы съемок, выполненных с апреля 2018 по март 2022 г. в количестве 17 снимков (по одному снимку в сезон). Критерием выбора именно этих снимков, кроме принадлежности к сезонам, являлся также низкий процент облачности.

Методика включает в себя следующую последовательность выполнения задач: анализ исходных данных; подбор космических сним-

ков и их атмосферная коррекция; трансформация в необходимую систему координат [18–20] использование плагина Land Surface Temperature QGIS Plugin [21]; определение границ «островов тепла» на разные даты и определение точек, в которых будет проводиться эксперимент; вычисление площадей; проверка и обработка полученных результатов с газоанализатора Plug&Sense! Smart Environment Pro (используется система Интернета вещей).

Для осуществления атмосферной коррекции были взяты архивные данные по пропускающей способности атмосферы, эффективности пропускания прямой и отраженной радиации [22]. После того как была проведена коррекция, необходимо было рассчитать для каждого снимка температуру земной поверхности (LST – Land Surface Temperature). При расчетах использовался встраиваемый в программное обеспечение QGIS 2.18.28 «Land Surface Temperature QGIS Plugin». Он имеет возможность оценивать коэффициент излучения земной поверхности (LSE), вычислять яркость на датчике, вычислять яркостную температуру и выполнять коррекцию яркостной температуры с учетом атмосферных показателей. Для спутников Landsat 8 TIRS среднеквадратичная ошибка (RMSE – Root Mean Square Error) по данным M. I. Ndossi, U. Avdan при подсчете LST составляет от 2,07 до 3,06 °C. Дополнительные настройки для данного исследования включали в себя выбор уравнения переноса излучения (УПИ) при расчете LST и алгоритма Zhang, Wang при расчете LSE.

Так как на территории г. Санкт-Петербурга располагаются крупные промышленные предприятия: «Адмиралтейские верфи», «Балтийский завод» и др., а также город является центром субъекта (Ленинградской области), после обработки космических снимков ожидается повышение температур земной поверхности в районе «серого пояса» и крупных вокзалов. Для оценки явления требуется экспериментально проверить наличие данных тепловых аномалий. Наличие оценивалось с помощью газоанализатора Plug&Sense! Smart Environment Pro 13.01.2023 [23].

Газовые датчики в газоанализаторе представляют собой электрохимические элементы, работающие в амперометрическом режиме. Они генерируют ток, линейно пропорциональный долевого объему целевого газа. Для преобразования тока, генерируемого рабочим электродом, в напряжение для аналого-цифрового преобразователя в модуле платы используется транзисторный каскад. Цифровой сигнал с анализатора передается на сервер в сети Интернет, что предоставляет возможность загрузить данные и обработать их в любом из удобных приложений.

Для каждой исследуемой точки необходимо производить измерение в течение получаса. При обработке данных измерений были исключены выбросы, для получения статистически более точных измерений.

Результаты и обсуждение

Для определения границ «островов тепла» на различные даты было необходимо установить интервалы значений, выше которых был бы определен «остров тепла», а также перевести результаты обработки раstra в векторные полигоны. Представление «островов тепла» в виде векторных, а не растровых объектов позволяет рассчитать площадь данных явлений, изменять настройки отображения в виде прозрачности, что может помочь в идентификации объектов, на территории которых они находятся, а также избежать ухудшения качества при масштабировании.

Авторами было рассмотрено несколько подходов к выделению ступеней шкалы для создания картосхемы: классификация методом равных интервалов, методом стандартного отклонения и методом выделения «островов тепла» по гистограмме значений слоя, где через взвешенное наложение учитывался бы равный вклад каждого сезона в годовое распределение.

Классификация методом равных интервалов позволила выявить примерное расположение точек перегрева, так как отображала максимальные значения температуры, однако не учитывала различие температуры этих точек с температурой ближайшей местности. Для учета отклонения данных значений был

рассмотрен метод классификации через стандартное отклонение. Недостатком данного варианта являлась необъективность отображения изменения площадных характеристик «островов тепла» во времени, так как не учитывался вклад каждого сезона в итоговую годовую картину.

Итоговым вариантом стало использование взвешенного наложения, так как оно не только

$$(зима \cdot 0,25) + (весна \cdot 0,25) + (лето \cdot 0,25) + (осень \cdot 0,25),$$

где 0,25 – вклад каждого сезона в отображение температур поверхности Земли для года, а названиями сезонов обозначены растры рассматриваемого времени года.

Опираясь на форму графика частотного распределения, которое можно построить после применения калькулятора растра, выделяется три ступени, необходимые для шкалы, – показатели водных объектов, средние значения и «острова тепла». Для перевода растровых объектов в полигональные была осуществлена предварительная переклассифика-

отображало основные места локализации «островов тепла» для г. Санкт-Петербурга, но и позволяло учитывать сезонность исследуемого явления, увидеть устойчивые аномалии, связать их с функциональным назначением места, на котором они образовались. Для того, чтобы использовать метод взвешенного наложения, было необходимо вставить в калькулятор растров соответствующую формулу:

ция. После осуществления переклассификации было произведено преобразование по схожим значениям точек. Полигоны площадью меньше 0,05 кв. км были убраны при отображении, так как они являются локальными проявлениями островов тепла для жилых зданий, исследование которых лучше производить на местности, а не дистанционно. Пример картосхемы можно видеть на рис. 1, где цветом отображена устойчивость «островов тепла» с 2019 по 2021 г. в районе завода «Арсенал».

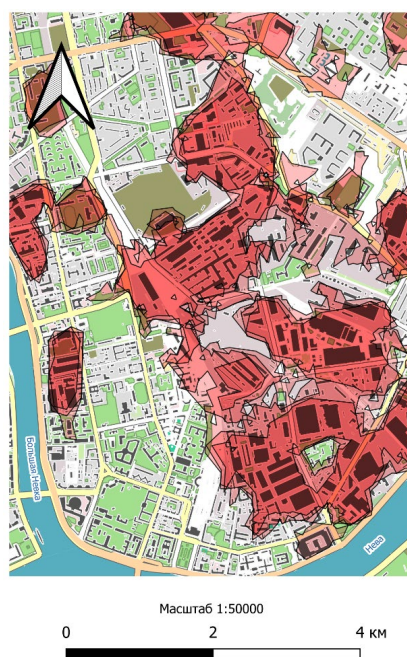


Рис. 1. Картосхема динамики «островов тепла» в районе завода «Арсенал»:

■ – устойчив в течение 1 года; ■ – устойчив в течение 2 лет; ■ – устойчив в течение 3 лет

На основе проведенного картирования всей территории города были выделены следующие основные типы объектов, с которыми связано

образование «островов тепла»: промышленные сооружения, автомагистрали, места с большой плотностью застройки, где здания располо-

жены компактно, торговые центры. Для «островов тепла» характерно следующее изменение площадных характеристик, посчитанное с помощью статистики по полям: в 2019 г. площадь всех выделенных в ходе исследования полигональных объектов составляла 67,4 км², в 2020 г. – 125,5 км², в 2021 г. – 73,3 км². Пик значений в 2020 г. может быть связан с условием отбора «островов тепла» по площади, либо нетипичными для местности температурами.

Для экспериментальной проверки наличия тепловых аномалий на практике с помощью газоанализатора Plug&Sense! Smart

Environment Pro было выбрано три точки: Кировский завод (далее – точка 1), Первомайская ТЭЦ (далее – точка 2), Московский вокзал (далее – точка 3), представленных на рис. 2. В каждой из точек измерения проводились в течение 30 минут. Данные, получаемые с прибора, автоматически передавались на сервер, с которого происходила дальнейшая выгрузка и обработка данных. Исследовалась концентрация монооксида углерода (мг/м³), как одного из газов, вырабатывающихся при сжигании топлива, температура (°С), относительная влажность (%) и давление (мм рт. ст).

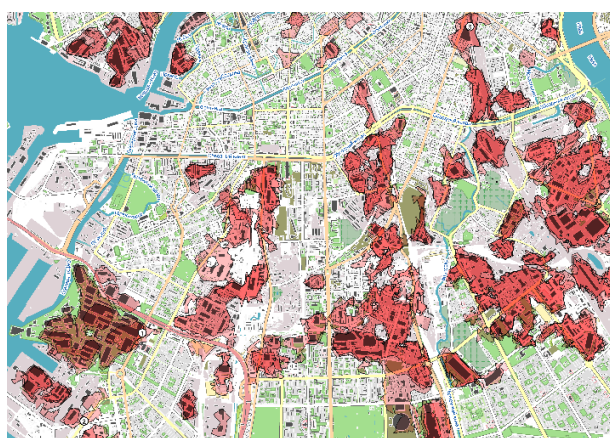


Рис. 2. Расположение точек замеров в пространстве

После обработки данных, с помощью библиотек Matplotlib (Python) было подтверждено влияние монооксида углерода (CO) на увеличение температуры, а также замечено снижение концентрации CO, за счет увеличения относительной влажности.

Это может использоваться для создания дополнительного испарения с поверхности и снижения ее перегрева, посредством создания водных объектов. Графики зависимостей представлены на рис. 3.

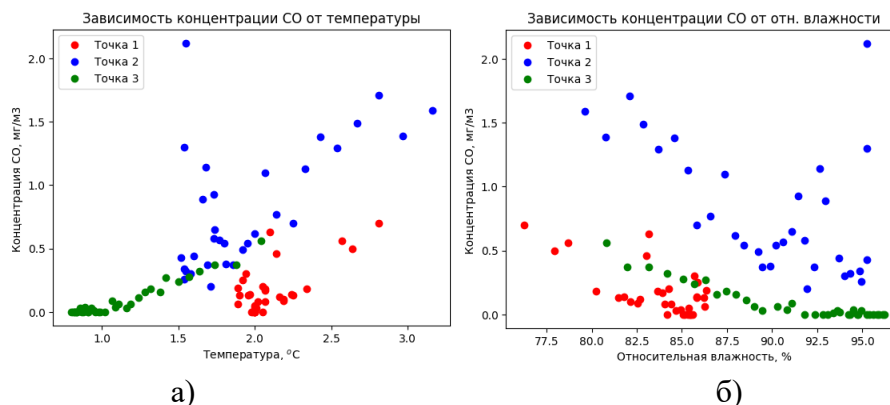


Рис. 3. Зависимости по результатам эксперимента концентрации CO: а) от температуры; б) от относительной влажности

С целью валидации экспериментальных данных с данными метеорологических наблюдений [22] было проведено сравнение температур, влажности и давления, представленное в табл. 1. Данные метеостанций (м/с) подтвердили достоверность экспериментальных значений.

Таблица 1

Сводная таблица по точкам исследования

Полигон	Площадь (19–20–21 гг.), км ²	Температура (датчик), С°	Температура (м/с), С°	Концентрация СО (датчик), мг/м ³	Влажность (датчик), %	Влажность (м/с), %	Давление (датчик), мм рт. ст.	Давление (м/с), мм рт. ст.	NDVI _{ср}
Точка 1	1,8–0,5–1,3	2,24	1,71	1,98	82,52	88	754,89	754,9	0,053
Точка 2	0,21–0–0,05	2,12	1,60	2,68	88,93	88	755,04	754,9	0,075
Точка 3	0,27–0–0,18	1,34	1,90	1,69	89,77	90	754,54	754,6	0,007

Для анализа состояния растительного покрова были рассчитаны вегетационные индексы NDVI по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$

где NIR – отражательная способность земной поверхности в ближнем ИК – диапазоне солнечных лучей, а RED – отражательная способность земной поверхности в красном диапазоне солнечных лучей.

Для каждой точки были взяты растры, отображающие NDVI, за весенний и летний сезон в течение трех лет. Был произведен расчет NDVI_{средний} по полигонам за теплые периоды 2019–2021 г. Для Кировского завода, Первомайской ТЭЦ и Московского вокзала он равен 0,053, 0,075 и 0,007 соответственно (см. табл. 1). Данные показатели могут говорить об угнетенном состоянии растительности, расположенной рядом с промышленными объектами. Этот вывод был сделан исходя из шкалы, предложенной В. П. Петрищевым, С. А. Дубровской, Р. В. Ряховым, где показатели NDVI в интервале от – 0,6 до 0,34 говорят о том, что растительность имеет низкую степень развития или отсутствует (то есть на территории исследования находится открытый грунт) [24].

При этом если низкий индекс в зоне завода и вокзала может быть обусловлен плотной городской застройкой и искусственными покрытиями, то для ТЭЦ, рядом с которой находятся ЗНОП (зеленые насаждения общего пользования), это может говорить об их стрессовом состоянии. Было предположено, что транспирация растений не оказывает значимого влияния на крупные «острова тепла». Однако для под-

тверждения данной гипотезы необходим расчет дополнительных индексов: вегетационного индекса, свободного от воздействия аэрозоля (AVFI₁₆₀₀ – Aerosol Free Vegetation Index 1600), индекса листовой поверхности (LAI – Leaf Area), усовершенствованного вегетационного индекса (EVI – Enhanced Vegetation Index), основанных на гиперспектральных данных [25].

Заключение

Разработанная методика картирования «островов тепла» показала хороший результат, согласующийся с результатами натурных измерений прибора Plug&Sense! Smart Environment Pro и с показателями, полученными от метеостанций. При этом основная работа состояла непосредственно в подборе шкалы для выделения «островов тепла», нахождения границы между тепловой аномалией и ее отсутствием.

На основе составленной картосхемы были выбраны точки для экспериментального подтверждения теоретических данных. Данная работа подтвердила возможность дистанционного мониторинга тепловых аномалий. Однако требуется увеличение объемов выборки снимков и автоматизации их обработки в каждом сезоне, для составления более полной картины. Так станет возможным более полное изучение полученных значений растра, с целью отбора статистически значимых. Тем самым можно будет удостовериться в выдвигаемых выводах и зависимостях.

Полученные результаты могут быть использованы организациями, связанными с архитектурно-планировочными решениями, экологическим мониторингом состояния атмосферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамочная Конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций. Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане с 28 ноября по 11 декабря 2011 года [Электронный ресурс]. – URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf> (дата обращения 14.12.2023).
2. Кондратьев К. Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 4. – С. 93–119.
3. Atta-ur-Rahman, Rajib Shaw, Akhilesh Surjan, Gulsan Ara Parvin Urban Disasters and Approaches to Resilience // *Urban Disasters and Resilience in Asia*. – 2016. – P. 1–19.
4. Kaplan G., Avdan U. and Avdan Z. Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia // *The 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 7. – P. 358.
5. Wang W., Liu K., Tang R., Wang S. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2019. – Vol. 110. – P. 168–175.
6. Mohamed M., Othman A., Abotalib A. Z., Majrashi A. Urban Heat Island Effects on Megacities in Desert Environments Using Spatial Network Analysis and Remote Sensing Data: A Case Study from Western Saudi Arabia // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1941.
7. Arnfield A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // *International Journal of Climatology*. – 2003. – Vol. 23. – P. 1–26.
8. Howard Luke. Of the temperature // *The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. – 1818. – Vol. 2. – P. 89–144.
9. Балдина Е. А., Константинов П. И., Грищенко М. Ю., Варенцов М. И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне // *Земля из Космоса*. – 2015. – Спецвыпуск. – С. 38–42.
10. Варенцов М. И., Константинов П. И., Самсонов Т. Е., Репина И. А. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2014. – Т. 11. – № 4. – С. 329–337.
11. Иванова А. А., Балдина Е. А. Исследование и картографирование теплового воздействия объектов железнодорожных транспортных узлов на окружающую среду по данным дистанционного зондирования // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2018. – Т. 24. – № 2. – С. 27–39.
12. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Прогноз температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга на основе спутникового картирования теплофизических свойств // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2016. – Т. 13. – № 2. – С. 176–191.
13. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – № 3. – С. 51–66.
14. Xu L. Y., Xie X. D., & Li S. Correlation analysis of the urban heat island effect and the spatial and temporal distribution of atmospheric particulates using TM images in Beijing // *Environmental Pollution*. – 2013. – Vol. 178. – P. 102–114.
15. Гордиенко А. С., Ткач А. В. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 55–63.

16. Геологическая служба США [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/lands> (дата обращения 27.08.2023).
17. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С., Виноградов К. П., Боголюбова А. А. Мониторинг водных объектов дистанционными методами // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 67–75.
18. Баландин В. Н., Меньшиков И. В., Брынь М. Я., Фирсов Ю. Г., Штерн С. Л. Алгоритм вычисления плоских прямоугольных координат, сближения меридианов и масштаба проекции Гаусса в 6-градусной зоне по геодезическим координатам // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 24–26.
19. Копылова Н. С. Современные подходы к моделированию поверхности Земли // География: развитие науки и образования: коллективная монография по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 155-летию со дня рождения В. И. Вернадского, Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2018 года. – СПб.: Российский государственный педагогический ун-т им. А. И. Герцена, 2018. – С. 365–371.
20. Копылова Н. С., Стариков И. П. Оценка метрических свойств отображения геопространственной информации средствами картографических веб-технологий для района Арктики и континентального шельфа // Геодезия и картография. – 2021. – № 5. – С. 15–22.
21. Ndossi M. I., Avdan U. Application of open-source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8 (5). – P. 413.
22. Архив погоды [Электронный ресурс]. – URL: https://rp5.ru/Погода_в_Санкт-Петербург (дата обращения 16.09.2023).
23. Устройство газоанализатора Plug&Sense! Smart Environment Pro [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://development.libelium.com/gases_pro_sensor_guide/ (дата обращения 11.04.2023).
24. Петрищев В. П., Дубровская С. А., Ряхов Р. В. Сравнительный анализ состояния растительности в г. Оренбурге по результатам обработки мультиспектральных космических снимков // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 4. – С. 213–217.
25. Саворский В. П., Кашницкий А. В., Константинова А. М., Балашов И. В., Крашенинникова Ю. С., Толпин В. А., Маклаков С. М., Савченко Е. В. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 3. – С. 28–45.

Об авторах

Анна Владиславовна Жаркова – инженер лаборатории высокоточных систем ориентации МФТИ, магистрант факультета экотехнологий.

Азиза Алишеровна Орипова – кандидат технических наук, доцент факультета биотехнологий.

Получено 17.01.2024

© А. В. Жаркова, А. А. Орипова, 2024

Satellite mapping of the “heat islands” dynamics of St. Petersburg

A. V. Zharkova^{1,2✉}, A. A. Oripova²

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

² ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: zharkova.av@mipt.ru

Abstract. This article presents the results of satellite mapping of the “urban heat islands” of St. Petersburg, which makes it possible to assess spatiotemporal variations in remotely measured temperature of the underlying surface. The relevance of the work is determined by the fact that at present the issue of validating the temperature indicators of the underlying surface, calculated using satellite images in dynamics over several years and seasonally, with values obtained experimentally using gas analyzers, has not been studied in detail. The results of experiments measuring carbon monoxide concentration, temperature, humidity and pressure to take into account their contribution to the formation of heat islands are presented. Based on calculations of index images necessary to study the state of plant vegetation activity, an assessment was carried out in the study areas and the depressed state of vegetation was revealed. The data obtained as a result of experiments is confirmed by information from open sources. A conclusion is made about the possibility of remote monitoring of the underlying surface overheating points using remote sensing data and the Internet of things with an increase in the sample of satellite images, as well as the statistical validity of the conclusions.

Keywords: “heat islands”, satellite images, Landsat 8, Landsat 9, index images

REFERENCES

1. United Nations Framework Conventions on Climate Change. Report of the Conference of the Parties on its seventeenth session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011. Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf> (accessed December 14, 2023) [in Russian].
2. Kondratyev, K. Ya. (2004). Uncertainty of observational data and numerical climate modeling. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*, 4, 93–119 [in Russian].
3. Rahman, A. Shaw, R. Surjan, A. and Parvin, G.A. (2016). Urban Disasters and Approaches to Resilience. *Urban Disasters and Resilience in Asia*, 1–19.
4. Kaplan, G., Avdan, U., & Avdan, Z. Y. (2018). Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. *The 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing*, 7, 358.
5. Wang, W.; Liu, K.; Tang, R.; & Wang, S (2019). Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 110, 168–175.
6. Mohamed, M., Othman, A., Abotalib, A.Z., Majrashi, A. (2021). Urban Heat Island Effects on Megacities in Desert Environments Using Spatial Network Analysis and Remote Sensing Data: A Case Study from Western Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 13, 1941.
7. Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 1–26.
8. Howard, Luke (1818). Of the temperature. *The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*, 2, 89-144
9. Baldina, E. A., Konstantinov, P. I., Grishchenko, M. Yu., & Varencov, M. I. (2015). Urban heat islands study using thermal infrared remote sensing data. *Zemlya iz Kosmosa [Earth from Space]*, “SPECIAL ISSUE”, 38–42 [in Russian].
10. Varentsov, M. I., Konstantinov, P. I., Samsonov, T. E., & Repina, I. A. (2014). Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space]*, 11 (4), 329–337 [in Russian].
11. Ivanova, A. A., Baldina, E. A. (2018). The research and mapping of the thermal impact of railway transport nodes on the environment from remote sensing data. *InterCarto. InterGIS*, 24 (2), 27–39 [in Russian].
12. Gornyy V. I., Kritsuk, S. G., Latypov, I. Sh., & Tronin, A. A. (2016). Forecast of the surface temperature of the urban environment of St. Petersburg, based on satellite mapping of thermophysical

properties. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space]*, 13 (2), 176–191 [in Russian].

13. Gornyy, V. I., Kritsuk, S. G., Latypov, I. Sh., Tronin, A. A., Kiselev, A. V., Brovkina, O. V., Filippovich, V. E., Stankevich, S. A., & Lubskii, N. S. (2017). Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint. Petersburg and Kiev). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space]*, 3, 51–66 [in Russian].

14. Xu, L. Y., Xie, X. D., & Li, S. (2013). Correlation analysis of the urban heat island effect and the spatial and temporal distribution of atmospheric particulates using TM images in Beijing. *Environmental Pollution*, 178, 102–114.

15. Gordienko, A. S., Tkach, A. V. (2022). Study of the state of the environment in the area of oil production using space images. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27 (6), 55–63 [in Russian].

16. United States Geological Survey. Retrieved from <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/lands> (accessed August 8, 2023).

17. Mustafin, M. G., Valkov, V. A., Pavlov, N. S., Vinogradov, K. P., & Bogolyubova, A. A. (2023). Monitoring of water bodies by remote methods. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28 (2), 67–75 [in Russian].

18. Balandin, V. N., Menshikov, I. V., Bryn, M. Ya., Firsov, Yu. G., & Stern S. L. (2013). Algorithm for calculating flat rectangular coordinates, convergence of meridians and the scale of the Gauss projection in a 6- degree zone according to geodetic coordinates. *Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]*, 204, 24–26 [in Russian].

19. Kopylova, N. S. (2018). Modern approaches to modeling the Earth's surface. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya [Geography: Development of Science and Education]* (pp. 365–371). St. Petersburg: A. I. Herzen Russian State Pedagogical University Publ. [in Russian].

20. Kopylova, N. S., & Starikov, I. P. (2021). Evaluation of metric properties of geospatial information display by means of cartographic web technologies for the Arctic region and the continental shelf. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 15–22 [in Russian].

21. Ndossi, M. I. Avdan, U. (2016). Application of open-source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. *Remote Sensing*, 8 (5), 413.

22. The weather archive. Retrieved from https://rp5.ru/Погода_в_Санкт-Петербурге (accessed September 16, 2023) [in Russian].

23. The structure of the gas analyzer Plug & Sense! Smart Environment Pro. Retrieved from https://development.libelium.com/gases_pro_sensor_guide/ (accessed April 11, 2023).

24. Petrishchev, V. P., Dubrovskaya, S. A., & Ryahov, R. V. (2014). A comparative analysis of the vegetation in the city of orenburg on the results of the processing of multispectral space images. *Problemy regionalnoi ekologii [Regional environmental issues]*, 4, 213–217 [in Russian].

25. Savorskiy, V. P., Kashnitskiy, A. V., Konstantinova, A. M., Balashov, I. V., Krashennnikova, Yu. S., Tolpin, V. A., Maklakov, S. M., & Savchenko, E. V. (2016). Capabilities of hyperspectral indices analysis of the Vega-Constellation remote monitoring information systems. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the earth from space]*, 13 (3), 28–45 [in Russian].

Author details

Anna V. Zharkova – Engineer of the Laboratory of High-Precision Orientation Systems MIPT, Master's Student Faculty of Ecotechnologies.

Aziza A. Oripova – Ph. D., Associate Professor, Faculty of Biotechnologies.

Received 17.01.2024

© A. V. Zharkova, A. A. Oripova, 2024