

Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных

Г. П. Стручкова^{1,✉}, Т. Г. Крупнова², О. В. Ракова², С. А. Тихонова¹,
Н. С. Шеин¹, Т. А. Капитонова¹

¹Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

✉pandoramy8@list.ru

Аннотация

Тепловые аномалии города, называемые еще «тепловыми островами», образуются под влиянием антропогенных факторов. В г. Якутск влияние на возникновение температурных аномалий оказывают ГРЭС-1, ГРЭС-2 и другие промышленные комплексы. Скудность жилых построек и сооружений, препятствующих движению воздушных масс, не дает возможность поддерживать состояние криолитозоны на должном уровне, что в условиях потепления климата способствует деградации многолетней мерзлоты. В работе для определения подобных «тепловых островов» на территории г. Якутск предлагается использование методов дистанционного зондирования, основанных на данных теплового инфракрасного диапазона спутника Landsat 8, обеспечивающего получение информации с интервалом 16 суток. На основе предложенной методики проведен анализ тепловых аномалий различных районов г. Якутск и его окрестностей в летнее и зимнее время, которые создают зоны возможной оттайки мерзлоты и влияют на геокриологическую безопасность города. Наличие подобной информации позволит отслеживать процесс изменения температурного поля территории и проводить превентивные мероприятия по устойчивости зданий и сооружений.

Ключевые слова: температурные аномалии, тепловой остров, тепловой инфракрасный диапазон космоснимков, антропогенное воздействие, температурные карты поверхности земли, Landsat 8

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Пер. № 121032200040-5, научная тема FWRS-2021-0018).

Для цитирования: Стручкова Г.П., Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Тихонова С.А., Шеин Н.С., Капитонова Т.А. Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):415–424. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424>

Original article

Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data

G. P. Struchkova^{1,✉}, T. G. Krupnova², O. V. Rakova², S. A. Tikhonova¹,
N. S. Shein¹, T. A. Kapitonova¹

¹Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Chemistry Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

✉pandoramy8@list.ru

Abstract

Thermal anomalies in the city, otherwise called “heat islands,” are formed under the influence of anthropogenic factors. In Yakutsk, temperature anomalies were caused by GRES-1, GRES-2, and other industrial complexes. The crowding of residential buildings and structures prevents the movement of air masses and makes it impossible to

maintain the condition of the cryolithozone at the proper level, which contributes to the degradation of permafrost in a warming climate. We propose to identify “heat islands” in Yakutsk using remote sensing methods, based on the data of the thermal infrared range of the Landsat 8 satellite, which provides information with an interval of 16 days. The thermal anomalies in various areas of Yakutsk and its vicinity in summer and winter, which create zones of possible permafrost degradation and affect the geocryological safety of the city, were analyzed based on the proposed methodology. This information will make it possible to monitor the process of changes in the temperature field of a territory and implement preventive measures for the stability of buildings and structures.

Keywords: thermal anomalies, heat island, thermal satellite images, anthropogenic impact, temperature maps of the earth's surface, Landsat 8

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Reg. number: 121032200040-5, theme number: FWRS-2021-0018).

For citation: Struchkova G.P., Krupnova T.G., Rakova O.V., Tikhonova S.A., Shein N.S., Kapitonova T.A. Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):415–424. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424>

Введение

Тепловые аномалии города являются проявлением интенсивных антропогенных преобразований земной поверхности, а именно, последствием использования энергии, транспорта, промышленности и давления на природные ресурсы, вызванного быстрой урбанизацией, незапланированными застройками и недостаточно корректно спроектированной городской структурой. Дороги, здания и другие объекты инфраструктуры поглощают и повторно излучают солнечную энергию в большей степени, чем леса, водные объекты и природные ландшафты. Районы города, где сильно сконцентрированы эти структуры и мало зелени, становятся «островами» с более высокими температурами, чем территории отдаленных районов. Подобные очаги тепла называются «тепловыми островами». Исследование температурных аномалий города как природно-антропогенного комплекса является одним из инструментов в определении экологического состояния города. «Острова тепла» могут формироваться как днем, так и ночью, в небольших и больших городах, пригородах, южном и северном климате и в любое время года.

В 1810-х годах Люком Ховардом [1] впервые был обнаружен феномен «теплового острова» города, т. е. повышение температуры городского пространства в сравнении с пригородными районами. В середине XX в. начались основные исследования «тепловых островов». В настоящее время накоплено достаточно много исследований этого феномена [2–5 и др.].

Обзор научных исследований и данных показал, что эффект «теплового острова» в будущем будет увеличиваться по мере роста и изменения инфраструктуры, плотности населения и пространственной протяженности городских терри-

торий [4]. Подобные исследования актуальны и потому, что на данный момент проблеме городских «тепловых островов» в РФ по сравнению с зарубежными странами уделено гораздо меньше внимания.

Осуществление исследований эффекта «теплового острова» городов традиционными методами, основанными на натурных наблюдениях, является крайне трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому рационально привлечение материалов спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне.

«Тепловые острова» обычно определяются разницей температур между городами и прилегающими районами. Температура также может быть разной внутри города. В некоторых областях гораздо теплее, чем в других, из-за неравномерного распределения теплопоглощающих зданий и тротуаров, в то время как в других местах прохладнее из-за наличия деревьев и зелени. Существует два типа «тепловых островов»: поверхностные «тепловые острова» и атмосферные. Они различаются способами их формирования, методами, используемыми для выявления и измерения, воздействием и, в некоторой степени, методами, доступными для их охлаждения.

Поверхностные «острова тепла». Эти «тепловые острова» образуются из-за того, что городские поверхности, такие как дороги и крыши, поглощают и излучают тепло в большей степени, чем большинство естественных поверхностей. В жаркий день при температуре 32 °C обычные кровельные материалы могут нагреваться на 15 °C выше, чем температура воздуха [5]. «Тепловые острова» на поверхности, как правило, наиболее интенсивны в дневное время, когда светит солнце. Размеры зданий и расстояние между ними в городе воздействуют на возмож-

ность поглощать и излучать солнечную энергию и влиять на потоки ветра. В районах, где застройка достаточно плотная, конструкции и поверхности, перекрытые соседними зданиями, становятся большими термальными массами, которые недостаточно быстро отдают свое тепло.

Атмосферные «тепловые острова». Эти «тепловые острова» образуются в результате более теплого воздуха в городских районах по сравнению с более холодным в отдаленных. Атмосферные «тепловые острова» различаются по интенсивности гораздо меньше, чем поверхностные.

Повышенные температуры на «тепловых островах» могут влиять на окружающую среду, экономику и здоровье человека.

Исследования температурных аномалий на различных участках территории города методами полевых измерений являются дорогостоящими, трудоемкими и сложными работами. Использование методов и данных дистанционного зондирования территории с применением космоснимков – альтернативный информативный и качественный подход исследования изменений состояния окружающей среды. Тепловые космические снимки имеют широкий спектр возможностей. Данные дистанционного зондирования в тепловом инфракрасном диапазоне применяются для мониторинга природно-антропогенных объектов и в разных отраслях исследований земной поверхности [6].

Возможности использования космоснимков в тепловом инфракрасном диапазоне:

- своевременное обнаружение техногенных выбросов и тепловых аномалий, например, контроль тепловых выбросов промышленных объектов и ТЭЦ, выявление аномальных источников теплового излучения и классификация территорий по значениям радиационной температуры, выделение границ неоднородных областей и выявление дымовых шлейфов на основе специальных алгоритмов;

- обнаружение суммарных загрязнений природной среды объектами промышленного и городского хозяйства, обнаружение погодных аномалий с применением ГИС-технологий, методов географического дешифрирования и компьютерной обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ);

- разработка тематических методик обработки спутниковых данных и построение температурных карт городов.

Во многих российских и зарубежных исследованиях приводится и обосновывается связь между городским «тепловым островом» и городским «островом загрязнения» [2, 3, 7–15]. В данной работе делается попытка использования результатов дешифрирования тепловых данных космической съемки в зимний и летний периоды с 2013 по 2020 г. для определения зон геокриологических рисков на территории г. Якутск. Проблема влияния антропогенных факторов и современного тренда изменения климата на уменьшение мощности многолетней мерзлоты и, тем самым, на устойчивость и безопасность фундаментов и грунтов под зданиями и сооружениями является жизненно важной для городов Севера, построенных на многолетнемерзлых грунтах. Этим обусловлена чрезвычайная актуальность исследований, использующих как методы численного моделирования, так и организацию наземного геокриологического мониторинга, результаты которых позволили установить, что вследствие современных изменений климата температура мерзлых пород в старой части г. Якутск на глубине 10 м повысилась на 1–2, а местами даже на 3 °C [16–21]. В ряде работ [22–25] для обнаружения и исследования «тепловых островов» использовались спутники Landsat, обеспечивающие получение данных в инфракрасном диапазоне с различной детализацией.

Наличие «тепловых островов» в условиях Севера повышает температуру поверхности земли и может значительно повлиять на состояние грунта и устойчивость строений на прилегающей территории как отдельных сооружений, так и больших промышленных комплексов. Повышение температуры влияет на гидрологические условия, образование таликов, нарушение стока воды и образование наледей в черте города [19, 20]. «Острова тепла» оказывают определенное влияние на тепло- и влагосодержание почвенного покрова, что может вызвать как пучение, так и термопросадку грунта. Это необходимо также учитывать при расчете геокриологического прогноза в городской среде [17].

«Тепловые острова» в условиях Севера повышают температуру поверхности земли и могут значительно повлиять на состояние грунта и устойчивость строений на прилегающей территории. Скуденность жилых построек и сооружений препятствует движению воздушных масс,

тем самым, не давая возможности поддерживать состояние криолитозоны на должном уровне, что особенно актуально в условиях потепления климата.

Материалы и методы

В данной работе рассмотрены разновременные и разносезонные снимки, сделанные в тепловом инфракрасном диапазоне в зимний (декабрь–январь) и летний (май–июнь) периоды с 2013 по 2020 г.

Для исследования «теплого острова» в г. Якутск были использованы снимки со спутника Landsat 8 OLI с 2013 по 2020 г. за декабрь–январь. Для сравнения зимних и летних снимков были исследованы май–июнь 2019–2020 гг. с того же спутника. Анализ осуществлялся с помощью программных продуктов ArcGIS 10.2, QGIS 2.18.28. по методике, описанной в работах [22–25].

В программном комплексе QGIS 2.18.28 был установлен модуль LAND SURFACE TEMPERATURE.

Принципы работы модуля заключаются в следующем.

1. Вкладка Radiance: подгружаем температурный канал у Landsat 8 OLI – 10 канал THERMAL INFRARED и файл метаданных, затем преобразуем цифровые числа в яркость и калибруем значения яркости.

2. Вкладка Brightness Temperature: подгружаем расчет Radiance и производим преобразование яркости в яркостную температуру.

3. Вкладка NDVI: подгружаем 4 (RED) и 5 (NIR) каналы и производим расчет нормированного разностного индекса растительности NDVI.

4. Вкладка Land Surface Emissivity: подгружаем расчет NDVI и производим оценку коэффициента излучения земной поверхности с использованием подхода на основе NDVI.

5. Вкладка Land Surface Temperature Algorithm: требуется расчет атмосферных параметров, который можно сделать на сайте NASA: <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, в данной там таблице необходимо внести дату и время, когда был сделан снимок, и координаты нужного участка. Расчет отправляется на электронную почту. Далее подгружаем расчеты Radiance и Land Surface Emissivity и получаем необходимую нам карту – температуру поверхности Земли [22, 23].

В конце работы выходит карта температур, которую можно подкрасить для наглядности в

нужные цвета с помощью инструмента LAYER STYLING. На полученной карте более яркий красный цвет соответствует более высокой температуре поверхности (рис.1, 2).

Исследование проблемы «тепловых островов» методами географического дешифрирования позволяет определить основные закономерности распределения тепловых аномалий в пространстве и времени, их связь с антропогенными и природными объектами различных типов.

Результаты

Результаты исследований показали, что созданные на основе дешифрирования тепловых данных космической съемки картографические материалы позволяют выделить промышленные объекты, зоны скученности жилых районов, пустыри без озеленения – места, оказывающие сильное влияние на общую интенсивность теплового излучения города и, тем самым, образующие зоны геокриологических рисков, влияющих на безопасность и устойчивость сооружений.

В тепловом балансе города участвуют антропогенная и природная составляющие. Природная составляющая – это радиационный баланс, являющийся одним из главных климатообразующих факторов. Техногенная составляющая – это поступление тепла от транспорта, со сточными водами, от стационарных источников тепла (предприятий промышленности и теплоснабжения), образованного при нагреве солнечными лучами асфальта и зданий. В последние годы все составляющие антропогенного теплового баланса города становятся сравнимы с природной составляющей.

В результате анализа снимков выделены области тепловых аномалий, связанные с техногенными проявлениями (городские территории, загрязнение водной и воздушной среды). Лучше всего тепловые аномалии техногенных объектов наблюдаются на зимних снимках. Температурная разница между «тепловым островом» города и пригородной зоной составляет от 10 до 25 °C на зимних и около 10 °C на летних снимках.

В г. Якутск на возникновение температурных аномалий оказывают влияние в основном стационарные источники: ГРЭС-1 и после ввода в эксплуатацию в 2018 году ГРЭС-2, промышленные предприятия – объекты лесопромышленной отрасли, домостроительный комбинат и др. Скученные жилые постройки и сооружения препятствующие движению воздушных масс, в какой-то

степени дорожная сеть, также являются источниками выделения тепла. На протяжении всего года эти источники выделяют большое количество тепла, притом что количество выбросов неизменно нарастает.

На рис. 1 представлено распределение средней температуры в пикселе зимних снимков 2013–2020 гг. Температурное поле неоднородно. Район ГРЭС, ГРЭС-2, центральная часть города, водная поверхность возле лесопилки имеют выраженные области более высоких значений температур. Минимальная средняя температура на территории города и его окрестностей составила -43°C , максимальная -32°C . Средняя температура внутри городской черты превышает среднюю температуру удаленных окрестностей на 8–10 градусов.

На рис. 2 представлено распределение средней температуры в пикселе летних снимков 2019–2020 гг. Температурное поле также неоднородно. К местам с аномально высокими температурами поверхности добавляются места скученности жилых построек и сооружений: 203 микрорайон, торговые центры, аэропорт, ДСК (домостроительный комбинат) и открытые местности без озеленения – пустыри. Также заметно влияние рельефа местности – температура земной поверхности повышена у подножия сопки. Минимальная средняя температура на территории города и его окрестностей составила $18-20^{\circ}\text{C}$, максимальная 35°C . Средняя температура внутри городской черты превышает среднюю температуру удаленных окрестностей на 8–10 градусов.

Уменьшение «тепловых островов». Существует множество стратегий для уменьшения серьезности эффекта «теплого острова». Многие сообщества принимают меры по сокращению городских «тепловых островов», используя пять основных стратегий: 1) увеличение древесного и растительного покрова, 2) установка зеленых крыш, 3) установка прохладных, в основном отражающих, крыш, 4) использование прохладных тротуаров (отражающих), 5) использование методов разумного роста.

Стратегии и технологии

Деревья и растительность. Расширение растительного и древесного покрова снижает температуру поверхности и воздуха, создавая тень и охлаждение за счет эвапотранспирации [12, 25]

Зеленые крыши – выращивание растительного слоя (растений, кустарников, трав и / или де-

ревьев) на крыше снижает температуру поверхности крыши и окружающего воздуха и улучшает управление ливневыми водами.

Прохладные крыши – установка прохладной крыши, сделанной из покрытий или материалов, значительно отражающих солнечный свет и тепло от зданий, снижает температуру крыш, повышает комфорт жителей и снижает потребность в энергии [12].

Прохладные тротуары – использование материалов для мощения тротуаров, стоянок и улиц, которые остаются более прохладными, чем обычные тротуары (за счет отражения большей солнечной энергии и усиления испарения воды), не только остужают окружающий воздух и поверхность тротуара, но также может повысить видимость в ночное время и уменьшить сток ливневой воды [12].

Умный рост – эти методы охватывают ряд стратегий развития и сохранения, которые помогают защитить природную среду и в то же время делают наши сообщества более привлекательными, экономически более выгодными и более пригодными для жизни.

Заключение

По данным, основанным на тепловых изображениях инфракрасного диапазона с использованием спутника LANDSAT 8, были получены изображения температур поверхности земли в г. Якутск и его окрестностях.

На основе построенных карт выполнен анализ динамики тепловых аномалий поверхности земли различных районов г. Якутск и его окрестностей в летнее и зимнее время, а также установлены пределы территориальной изменчивости температуры городской поверхности. Результаты исследований показали, что созданные на основе дешифрирования тепловых данных инфракрасного диапазона с использованием спутника Landsat 8 картографические материалы, позволяют выделить промышленные объекты, зоны скученности жилых районов, пустыри без озеленения – места, оказывающие большое влияние на общую интенсивность теплового излучения города и, тем самым, образующие зоны геоэкологических рисков, влияющих на геоэкологическую безопасность. Наличие подобной информации позволит отслеживать процесс изменения температурного поля территории города и, используя комплексный анализ совместно с результатами традиционных методов наземного мони-

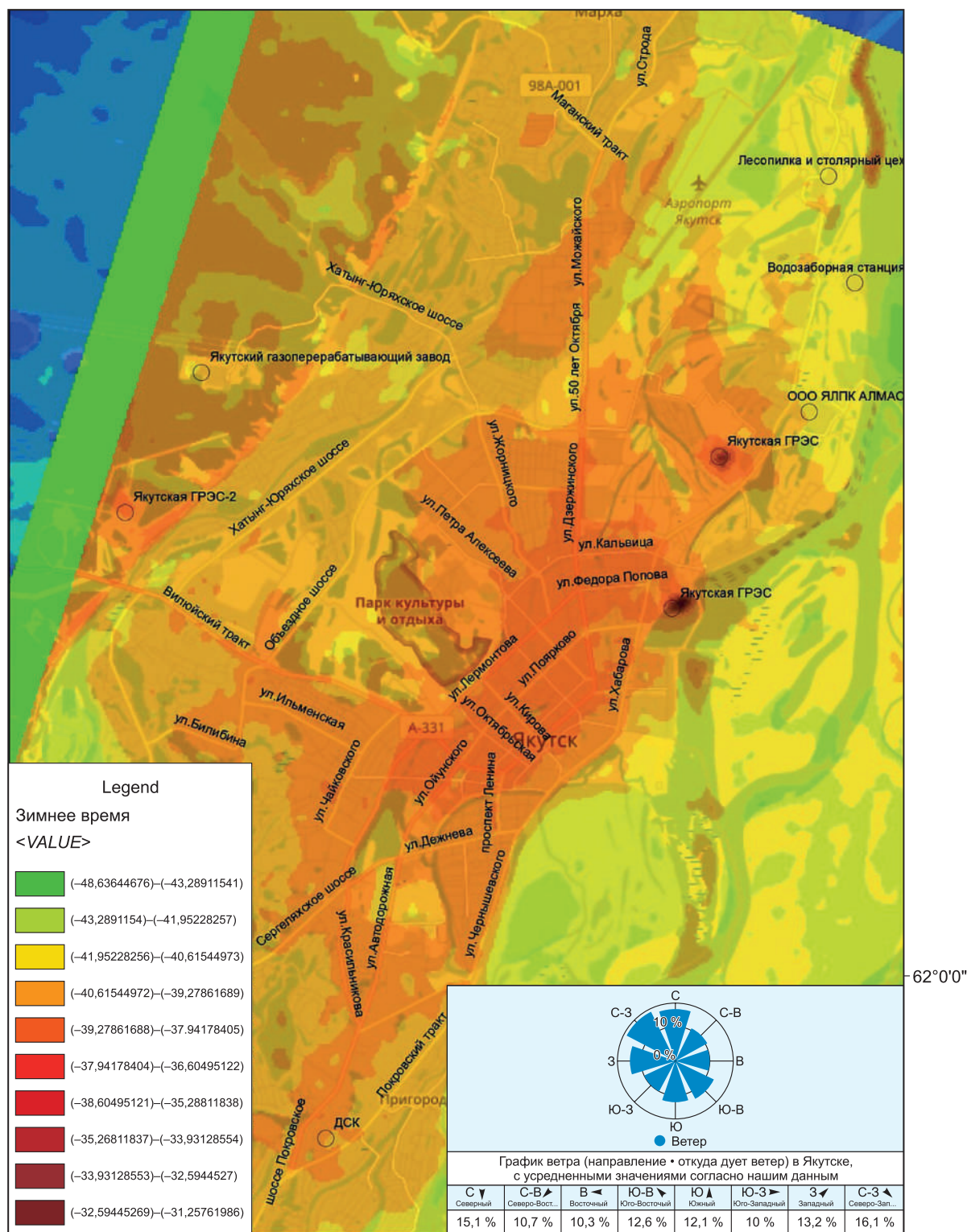


Рис. 1. Распределение средней температуры в пикселе по зимним снимкам 2013–2020 г.

Fig. 1. Distribution of average temperature in a pixel, according to winter images (2013–2020)

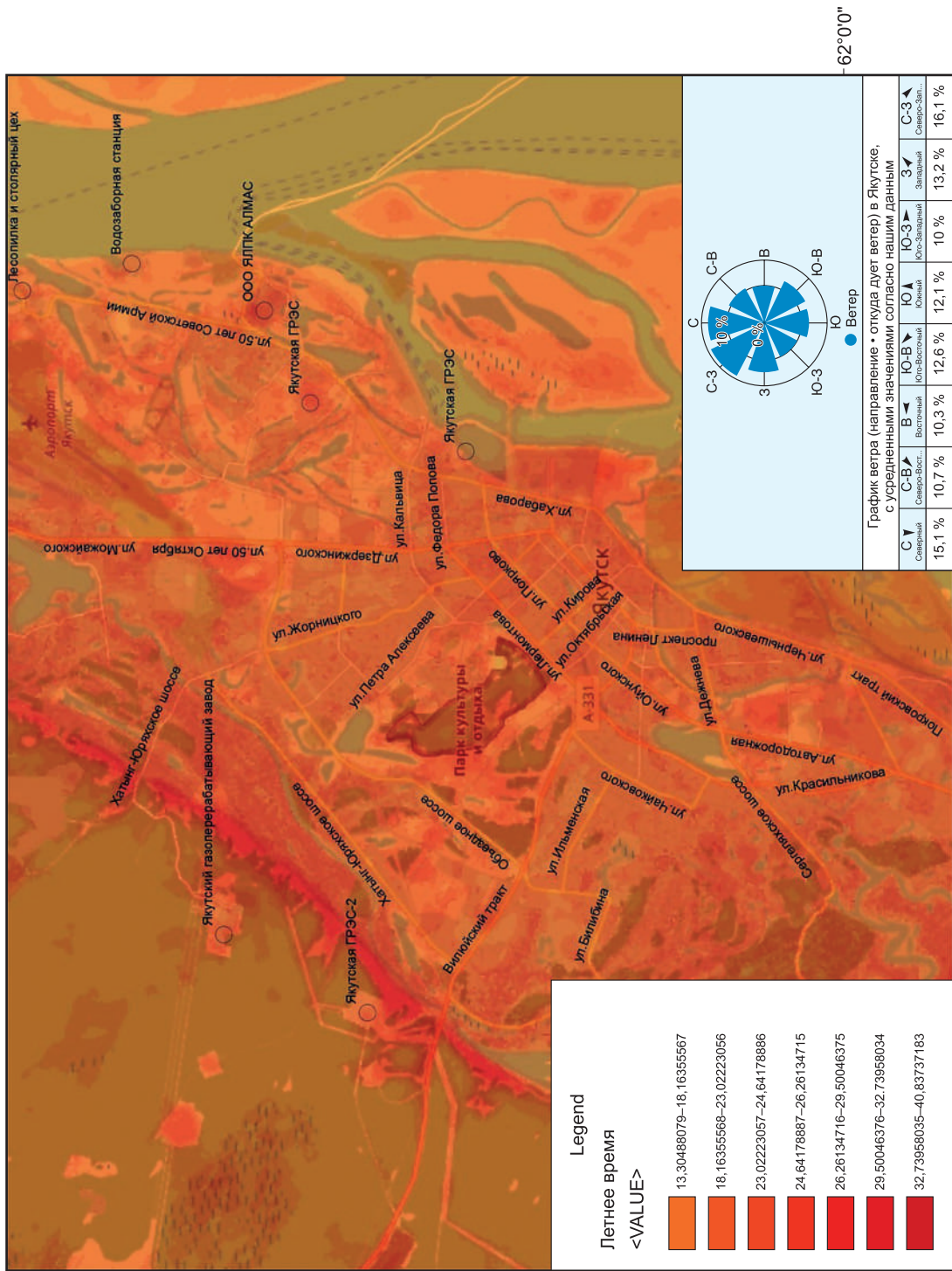


Рис. 2. Распределение средней температуры в пикселе по летним снимкам 2019–2020 г.
Fig. 2. Distribution of average temperature in a pixel, according to summer images (2019–2020)

торинга состояния мерзлых грунтов, проводить превентивные мероприятия по предотвращению деградации многолетней мерзлоты, поддерживать устойчивость зданий и сооружений в условиях меняющегося (потепление) климата.

Список литературы / References

1. Локощенко М.А. Особенности городского «острова тепла» в Москве. *Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы: Тезисы докладов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых, г. Борок, 30 мая – 04 июня 2011 г.* Борок; 2011:9–20.
2. Lokoshchenko M.A. Features of urban “heat island” in Moscow. *Atmospheric composition. Atmospheric electricity. Climatic processes: Proceedings of the 15th All-Russian school-conference of young scientists, Borok, May 30 – June 04, 2011.* Borok; 2011:19–20. (In Russ.)
3. Дубровская С.А., Ряхов Р.В. Тепловые структуры и аномалии города Магнитогорска по результатам дешифрирования мультиспектральных изображений. *Вестник Оренбургского гос. университета.* 2015; 10(185):286–288.
4. Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V. Thermal structures and anomalies of the city of Magnitogorsk based on the results of interpretation of multispectral images. *Vestnik Orenburgskogo gos. Universiteta= Bulletin of the Orenburg state. university.* 2015;10(185):286–288. (In Russ.)
5. Грищенко М.Ю., Константинов П.И. Дешифрирование поверхностного острова тепла Москвы по тепловым космическим снимкам с ресурсных спутников. *Збірник наукових праць.* 2016;(23):27–34.
6. Grishchenko M.Yu., Konstantinov P.I. Decoding of surface heat island of Moscow by thermal space images from resource satellites. *Collection of scientific papers.* 2016;(23):27–34. (In Russ.)
7. Hibbard K.A., Hoffman F.M., Huntzinger D., West T.O. Changes in land cover and terrestrial biogeochemistry. *Climate Science Special Report: A Sustained Assessment Activity of the U.S. Global Change Research Program.* Washington; 2017:405–442.
8. Simmons M.T., Gardiner B., Windhager S. et al. Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a subtropical climate. *Urban Ecosystems.* 2008(11):339–348. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
9. Kalinicheva S.V., Fedorov A.N., Zhelezniak M.N. Mapping Mountain permafrost landscape in Siberia using Landsat thermal imagery. *Geosciences (Switzerland).* 2019;9(1). <https://doi.org/10.3390/geosciences9010004>
10. Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Мониторинг температуры земной поверхности территории Красноярска и окрестностей на основе спутниковых данных Landsat-8. *Успехи современного естествознания.* 2018;(7):177–182. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36822>
11. Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Monitoring of Earth surface temperature in Krasnoyarsk and its surroundings based on Landsat-8 satellite data. *Advances in current natural sciences.* 2018;(7):1770182. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36822>. (In Russ.)
12. Ying Ding, Huihui Feng, Bin Zou, Yunfeng Nie. Heterogeneous air pollution controls its correlation to urban heat island: A satellite perspective. *Advances in Space Research.* 2022;69:12(15):4252–4262. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.027>
13. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8. *Известия высших учебных заведений. Электроника.* 2021;26(3-4):314–323. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323>
14. Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Study of Anthropogenic Changes in the Urban Landscape Based on the Landsat-8 Infrared Range. *Proceedings of Universities. Electronics.* 2021;26(3-4):314–323. (In Russ.) <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323>
15. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;537(6):062051. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062051>
16. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Выявление изменения городской среды на основе спутниковых данных инфракрасного диапазона (на примере Красноярска). *ИнтерКарто. ИнтерГИС.* 2019; 25(2):90–100. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100>
17. Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Detection of urban environment changes based on infrared satellite data (on the example of Krasnoyarsk). *InterCar-to. InterGIS.* 2019;25(2):90–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100>
18. Ulpiani Giulia. On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *The Science of the Total Environment.* 2020;751(38):141727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>
19. Li Y., Zhang J., Sailor D.J., Ban-Weiss G.A. Effects of urbanization on regional meteorology and air quality in Southern California. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2019;19(7):4439–4457. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-19-4439-2019>
20. Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Исследование температурного режима Новосибирской агломерации по данным спутникового зондирования. *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019): Сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием, г. Бердск, 26–30 августа 2019 г.* Новосибирск: Изд-во ИВТ СО РАН; 2019:327–334.

- Voronina P.V., Chubarov D.L., Dobretsov N.N. Investigation of temperature conditions in Novosibirsk agglomeration based on satellite sensing data. In: *Spatial data processing for monitoring natural and anthropogenic processes (SDM-2019): Proceedings of All-Russian conference with international participation, Berdsk, August 26–30, 2019*. Novosibirsk: IVT SO RAN; 2019: 327–334. (In Russ.)
15. Santamouris M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*. 2020;(207):109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
16. Пермяков П.П., Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б. Численное моделирование термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата. *Наука и образование*. 2016;2(82):43–48.
- Permyakov P.P., Varlamov S.P., Skryabin P.N., Skachkov Yu.B. Numerical simulation of the thermal state of cryolithozone in a changing climate. *Nauka i obrazovanie*. 2016;2(82):43–48. (In Russ.)
17. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука; 2002. 86 с.
- Permyakov P.P. *Identification of parameters of the mathematical model of heat and moisture transfer in frozen ground*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 86 p. (In Russ.)
18. Чжан Р.В., Куницкий В.В., Павлова Н.А., Сыромятников И.И. О возобновлении геокриологического мониторинга на территории г. Якутска. *Наука и техника в Якутии*. 2020;1(38):12017.
- Zhang R.V., Kunitsky V.V., Pavlova N.A., Syromyatnikov I.I. On the resumption of geocryological monitoring in the territory of Yakutsk. *Science and technology in Yakutia*. 2020;1(38):12–17. (In Russ.)
19. Алексеева О.И., Балабаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В. Природные и техногенные проблемы г. Якутска. *Наука и образование*. 2006;4(44):94–98.
- Alexeeva O.I., Balabaev V.T., Grigoryev M.N., Makarov V.N., Zhang R.V., Shatz M.M., Shepelev V.V. Natural and anthropogenic problems of Yakutsk. *Nauka i obrazovanie*. 2006;4(44):94–98. (In Russ.)
20. Шац М.М. Городская инфраструктура города Якутска (современное состояние и пути повышения надежности). *Наука и образование*. 2011;4(64):28–35.
- Shatz M.M. Urban infrastructure of Yakutsk (current state and ways to improve reliability). *Nauka i obrazovanie*. 2011;4(64):28–35. (In Russ.)
21. Алексеева О.И., Демченко Р.Я., Курчатова А.Н. Мониторинг мерзлых оснований зданий в Якутске. *Криосфера Земли*. 1999;3(4):9–14.
- Alekseeva O.I., Demchenko R.Ya., Kurchatova A.N. Monitoring of frozen foundations of buildings in Yakutsk. *Earth Cryosphere*. 1999;3(4):9–14. (In Russ.)
22. Оценка температуры поверхности из снимка Landsat-8 при помощи Land Surface Temperature QGIS Plugin. <https://wiki.gis-lab.info/w/>.
- Estimation of the surface temperature from the Landsat-8 image using the Land Surface Temperature QGIS Plugin. <https://wiki.gis-lab.info/w/>. (In Russ.)
23. Isaya Ndossi M., 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;8(5):413. <https://doi.org/10.3390/rs8050413>
24. Jumari N.A., Ahmed A.N., Huang Yu.F., Ng J.L., Koo Ch.H., Chong K.L., Sherif M., Elshafie A. Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City. *Heliyon*. 2023;(9):e18424. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18424>
25. Jain Sh., Sannigrahi Sr., Sen S., Bhatt S., Chakraborti S., Rahmat Sh. Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fast-growing urban area. *Journal of Urban Management*. 2020;9(1):54–66. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.09.004>

Об авторах

СТРУЧКОВА Галина Прокопьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5161-979X>, ResearcherID: K-3234-2018, e-mail: pandoramy8@list.ru

КРУПНОВА Татьяна Георгиевна, кандидат химических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>, ResearcherID: N-4304-2014, e-mail: krupnovatg@susu.ru

РАКОВА Ольга Викторовна, кандидат химических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>, ResearcherID: ABC-5896-2020, e-mail: rakovaov@sus.ru

ТИХОНОВА Сардана Алексеевна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, e-mail: sardankobeleva@gmail.com

ШЕИН Николай Сергеевич, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-000107665-6944>, e-mail: shnnck@yandex.ru

КАПИТОНОВА Тамара Афанасьевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, ResearcherID: K-4201-2018, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

About the authors

STRUCHKOVA, Galina Prokopevna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5161-979X>, ResearcherID: K-3234-2018, e-mail: pandoramy8@list.ru

KRUPNOVA, Tatyana Georgievna, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>, ResearcherID: N-4304-2014, e-mail: krupnovatg@susu.ru

RAKOVA, Olga Viktorovna, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>, e-mail: rakovaov@susu.ru

TICHONOVA, Sardana Alekseevna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, e-mail: sardankobeleva@gmail.com

SHEIN, Nikolay Sergeevich, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-7665-6944>, e-mail: shnnck@yandex.ru

KAPITONOVA, Tamara Afanesevna, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, ResearcherID: K-4201-2018, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 20.08.2022

Поступила после рецензирования / Revised 20.06.2023

Принята к публикации / Accepted 17.08.2023