

УДК: 004.932

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-543-555

А. А. Гостева¹, А. К. Матузко²

ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН И ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ

АННОТАЦИЯ

Исследование температуры поверхности земли (LST) по спутниковым данным Landsat-8 и Landsat-9 г. Красноярска за период с 2013 по 2022 г. позволило авторам выделить характерные для территории тепловые аномалии, которые возникают в границах городского острова тепла (ГОТ). Имеется также архив значений температуры воздуха по данным сети наземных наблюдений Федерального исследовательского центра КНИЦ СО РАН с 2020 г. При анализе городской территории эффективнее рассматривать эти показатели вместе. При совмещении контуров тепловых аномалий по сезонам были выбраны те, которые оказывают наибольшее влияние на город и считаются авторами всесезонными постоянными тепловыми аномалиями. Отмечается их сезонная динамика в зависимости от сезона весна, лето или осень, поэтому на исследуемой территории авторами были выбраны данные за несколько разных сезонов с 2020 до 2022 г. Зимний период не рассматривается по причине отсутствия данных о температуре поверхности из-за наличия снежного покрова. Для более детального рассмотрения городской среды в данном исследовании рассматривается классификация локальных климатических зон (ЛКЗ). Выявлено изменение контуров ЛКЗ при сравнении карт температуры поверхности 2020 и 2022 гг., а также наблюдается смена классов ЛКЗ за счет активной застройки по нескольким направлениям (в северо-западном, северном и юго-восточном) и расширения городских границ. Проанализирован архив данных о температуре воздуха и поверхности. Рассмотрено местоположение промышленных объектов с контурами постоянных тепловых аномалий и оценивалось влияние городской среды на их взаиморасположение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЛКЗ, LST, Landsat, ГОТ, тепловые аномалии, тепловые спутниковые снимки

Anna A. Gosteva³, Aleksandra K. Matuzko⁴

INFLUENCE OF THE URBAN ENVIRONMENT ON THE FORMATION OF LOCAL CLIMATE ZONES AND THERMAL ANOMALIES

ABSTRACT

The study of land surface temperature (LST) based on Landsat-8 and Landsat-9 satellite data for Krasnoyarsk for the period from 2013 to 2022 allowed the authors to identify thermal anomalies characteristic of the territory that occur within the boundaries of the urban heat island

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Академгородок, д. 50, Красноярск, Россия, 660036, *e-mail:* AGosteva@icm.krasn.ru

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок, д. 50/44, Красноярск, Россия, 660036, *e-mail:* akmatuzko@icm.krasn.ru

³ Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center, 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* AGosteva@icm.krasn.ru

⁴ Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia, *e-mail:* akmatuzko@icm.krasn.ru

(UHI). There is also an archive of air temperature values based on the ground-based observation network of the Federal Research “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” since 2020. When analyzing the urban area, it is more effective to consider these indicators together. When combining the contours of thermal anomalies by season, those were selected that have the greatest impact on the city and are considered by the authors to be all-season permanent thermal anomalies. Their seasonal dynamics are noted depending on the season (spring, summer or autumn), therefore, in the study area, the authors selected data for several different seasons from 2020 to 2022. The winter period is not considered due to the lack of surface temperature data due to the presence of snow cover. For a more detailed examination of the urban environment, this study examines the classification of local climatic zones (LCZ). A change in the contours of the LCZ was revealed when comparing the surface temperature maps of 2020 and 2022, and a change in the LCZ classes was observed due to active development in several directions (in the northwest, north and southeast) and the expansion of urban boundaries. An archive of air and surface temperature data was analyzed. The location of industrial facilities with contours of permanent thermal anomalies was considered, and the influence of the urban environment on their relative positions was assessed.

KEYWORDS: LCZ, LST, Landsat, UHI, thermal anomalies, thermal space images

ВВЕДЕНИЕ

Город с промышленными объектами, асфальтированными дорогами, пробками на дорогах и железобетонными зданиями отличается климатом от окружающей местности [Cheval, 2020]. В городе другой климат, называемый городским, который отличается от окружающей местности температурой, ветром, влажностью и другими метеорологическими характеристиками. Сегодня эти различия еще более заметны, поскольку климат меняется [Borzino, 2020].

Исследование направлено на изучение связи распределения тепловых аномалий и городской среды Красноярска. Проблема качества воздуха весьма актуальна для г. Красноярска — это промышленно развитый город со множеством источников выбросов, окруженный горами и расположенный глубоко в Евразии. В период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), таких как отсутствие ветра, всего за несколько часов город накрывает смогом. Экологи часто фиксируют превышение показателей загрязняющих веществ, таких как бензо[а]пирен, NO₂, CO, SO₂ и PM, а город часто входит в антирейтинг мирового индекса качества воздуха [Yakubailik, 2020]. Тепловое загрязнение является неблагоприятным фактором для экологического состояния и комфорта городской среды.

Мониторинг атмосферного воздуха на территории г. Красноярска необходим для анализа экологического состояния, прогнозирования возникновения НМУ и составления комплекса мер по улучшению экологической ситуации. Выявление территорий с постоянным повышением температуры поверхности также необходимо для понимания экологического состояния. При решении этих задач необходимо исследование территории Красноярска дистанционными и наземными методами. В статье рассмотрено комплексное применение спутниковых наблюдений за температурой поверхности, локальных климатических зон (ЛКЗ) и автоматических постов контроля параметров атмосферы.

Для анализа города по районам и микрорайонам авторами было принято решение не разделять город по территориальному признаку, классифицировать по наиболее однородным участкам городской поверхности.

Наблюдение за температурой поверхности по спутниковым данным с 2013 г. позволяет выделить характерные для территории тепловые аномалии, которые возникают в границах городского острова тепла (ГОТ). Температура воздуха имеет также свой архив по данным сети наземных наблюдений Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН с 2020 г., который необходимо сопоставить со спутниковыми данными. Учитывая резко континентальный климат на исследуемой территории, авторами были выбраны данные за несколько разных сезонов с 2020 до 2022 г.

Цель данной работы — собрать воедино архив данных о температуре воздуха и поверхности, сопоставить расположение промышленных объектов с локальными тепловыми аномалиями и определить влияние городской среды на их взаиморасположение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Красноярск расположен на стыке трех геоморфологических стран: Западно-Сибирской равнины, Среднесибирского плоскогорья и Алтае-Саянской горной страны. Сам город расположен на обоих берегах р. Енисей в ее среднем течении. В границах города Енисей течет с запада на восток, ширина реки неодинакова за счет островов. Важной особенностью реки в границах города является практически постоянная температура воды. В зимний период она не замерзает, т. к. в 40 км от города построена Красноярская ГЭС. Разнообразие ландшафтно-геологических структур с акваториями и растительностью определяет развитие архитектуры города. Направление долины Енисея совпадает с преобладающим западным направлением ветров. Сужение долины Енисея в пределах города влияет на скорость ветрового потока и, как следствие, на интенсивность вентиляции. В периоды шторма в городе наступают неблагоприятные метеорологические условия, способствующие образованию смога. Рельеф Красноярска отличается разнообразием форм. Все эти факторы требуют комплексного подхода для изучения процессов состояния городской среды с использованием наземных и дистанционных источников данных. Для анализа в работе используются данные из наземных и дистанционных источников на территорию г. Красноярска за период с 2013 до 2022 гг., из которых сформирован каталог данных.

В качестве данных дистанционного зондирования использованы спутниковые снимки, собранные в рамках наблюдения за Землей программы Landsat. Спутники эксплуатируются с 1972 г.; в течение десятилетий создавался архив спутниковых снимков [Liu, 2011]. Программа, разработанная для изучения суши, внесла значительный вклад в ряд научных областей, начиная от естественных и заканчивая социальными [Zhou, 2019]. Landsat-8 был запущен на орбиту 11 февраля 2013 г. Спутник Landsat-8 получает данные с помощью двух разных датчиков — Operational Land Imager (OLI) и теплового инфракрасного датчика (TIRS). Снимки Landsat-8 состоят из 11 спектральных диапазонов, из которых 10-й и 11-й — дальние инфракрасные диапазоны с пространственным разрешением 100 м [Malakar, 2018]. В марте 2021 г. стали доступны новые уровни обработки Landsat-8 Collection 2 Level 2. С 10 февраля 2022 г. появились данные нового аппарата Landsat-9 — это последний спутник, он был запущен в сентябре 2021 г. и сейчас полностью работоспособен после прохождения некоторых первоначальных испытаний [Choate, 2022]. Landsat-9 имеет два основных прибора: OLI-2 и TIRS-2. После запуска нового спутника Landsat-9 количество доступных изображений увеличилось примерно вдвое.

В работе авторов [Гостева и др., 2023] подробно описан алгоритм вычисления температуры поверхности (LST) по данным Landsat-8–9 Collection 2 Level 2 для территории г. Красноярска с использованием собственного ПО. В этом наборе данных уже проведена атмосферная, геометрическая и радиометрическая коррекция и рассчитана LST. Необходимость создания собственного ПО для расчета LST вызвана тем, что данные во втором уровне обработки отсутствуют на части территории, их потеря составляет 25 %. Данные

для вычисления температуры поверхности земли загружаются с сайта агрегатора космических снимков геологической службы США¹; далее необходимо выбрать Landsat-8–9 Collection 2 Level 2. Из списка файлов необходимо выбрать слои атмосферных параметров, такие как тепловое излучение (ST_TRAD), восходящее излучение (ST_URAD), спектральный коэффициент пропускания атмосферы (ST_ATRAN), нисходящее излучение (ST_DRAD), красный канал (B4), ближний инфракрасный (B5), сопроводительный файл с метаданными.

По определению, ГОТ — это различие температуры, наблюдаемое в городе от температуры окружающей его местности. В данной работе авторы детально рассматривают температуру поверхности в границах города по данным Landsat-8–9 с разрешением теплового канала 100 м, а температуру воздуха — по данным двадцати станций мониторинга КНЦ СО РАН. Такая детализация позволяет исследовать неоднородность распределения температуры поверхности и воздуха внутри ГОТ.

Для изучения ГОТ из каталога данных были выбраны спутниковые снимки Landsat-8 за период с 2013 по 2022 гг. и Landsat-9 за 2022 г. Выбирались снимки в бесснежный период с отсутствием облаков над городом; по этим критериям было собрано 35 снимков. Для каждого изображения были выделены тепловые аномалии с использованием методики [Matuzko, 2018], состоящей из нескольких этапов. На первом этапе производится вычисление LST по данным Landsat-8–9. Следующим этапом определяются повышенные значения температур — это верхний квартиль диапазона (от 75 до 100 %). Далее растровые значения преобразуются в векторный формат и все полигоны со значениями температуры меньше, чем квартиль, удаляются. Из оставшихся полигонов необходимо удалить все контуры, размер которых менее трех пикселей. Это объясняется тем, что пиковые значения такого размера могут быть или ошибкой, или точечным объектом (например, металлическая крыша), но при этом тепловая аномалия не распространяется за пределы самого объекта.

Оставшиеся полигоны авторами работы определены как контуры тепловых аномалий. Накопленный архив контуров тепловых аномалий внутри ГОТ Красноярска позволяет проанализировать динамику их изменения с 2013 по 2022 г. Все полученные контуры тепловых аномалий были сгруппированы по трем временам года: весна, лето и осень, т. к. было замечено, что сезонность влияет на распределение городского острова тепла. Были выделены также две группы постоянных и переменных контуров тепловых аномалий. В группу постоянных вошли те контуры, которые максимально сохранили свои границы в период с 2013 по 2022 гг. вне зависимости от сезона. В работе анализируются именно постоянные контуры тепловых аномалий.

При изучении городской среды в качестве минимального участка местности выбраны локальные климатические зоны (ЛКЗ). ЛКЗ представляют собой территории с однородным покрытием поверхности, структурой, материалами и особым характером деятельности человека и имеют специфический тип взаимодействия с приземным слоем атмосферы [Самсонов, 2018]. Впервые метод выявления ЛКЗ предложен И. Д. Стюартом и Т. Р. Оке. Он представляет собой классификацию, состоящую из 17 типов зон, основанную главным образом на свойствах подстилающей поверхности, этажности зданий и плотности застройки [Оке, 2017]. Классификация является универсальной; для исследования были выбраны только классы городской среды, некоторые классы были исключены из-за отсутствия, а некоторые были объединены. Границы классов векторизовались вручную по открытым данным Open Street Map.

¹ EarthExplorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 29.06.2024)

В итоге для анализа распределения тепловых аномалий территории г. Красноярска были выбраны только классы с различными типами застройки: малоэтажная жилая застройка, многоэтажная жилая застройка, крупногабаритная застройка, промышленность. Два последних класса были объединены в один, потому что их поверхности идентичны, на обеих территориях есть строения большой площади, которые окружены парковками или другими асфальтобетонными покрытиями, они не имеют зеленых насаждений рядом.

Сеть наземных наблюдений Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН в настоящее время насчитывает 20 станций мониторинга воздуха CityAir¹. Метеостанции измеряют температуру воздуха на высоте 2 м над землей, но при этом необходимо учитывать разницу между температурой воздуха и LST [Yakubailik, 2020]. Помимо температуры воздуха станции мониторинга дают среднее значение концентрации в атмосферном воздухе взвешенных частиц диаметром менее 2,5 микрон, они называются PM 2,5. На рис. 1 показаны расположение постов наблюдений ФИЦ КНЦ СО РАН, соотношение постоянных контуров тепловых аномалий и ЛКЗ в границах г. Красноярска.

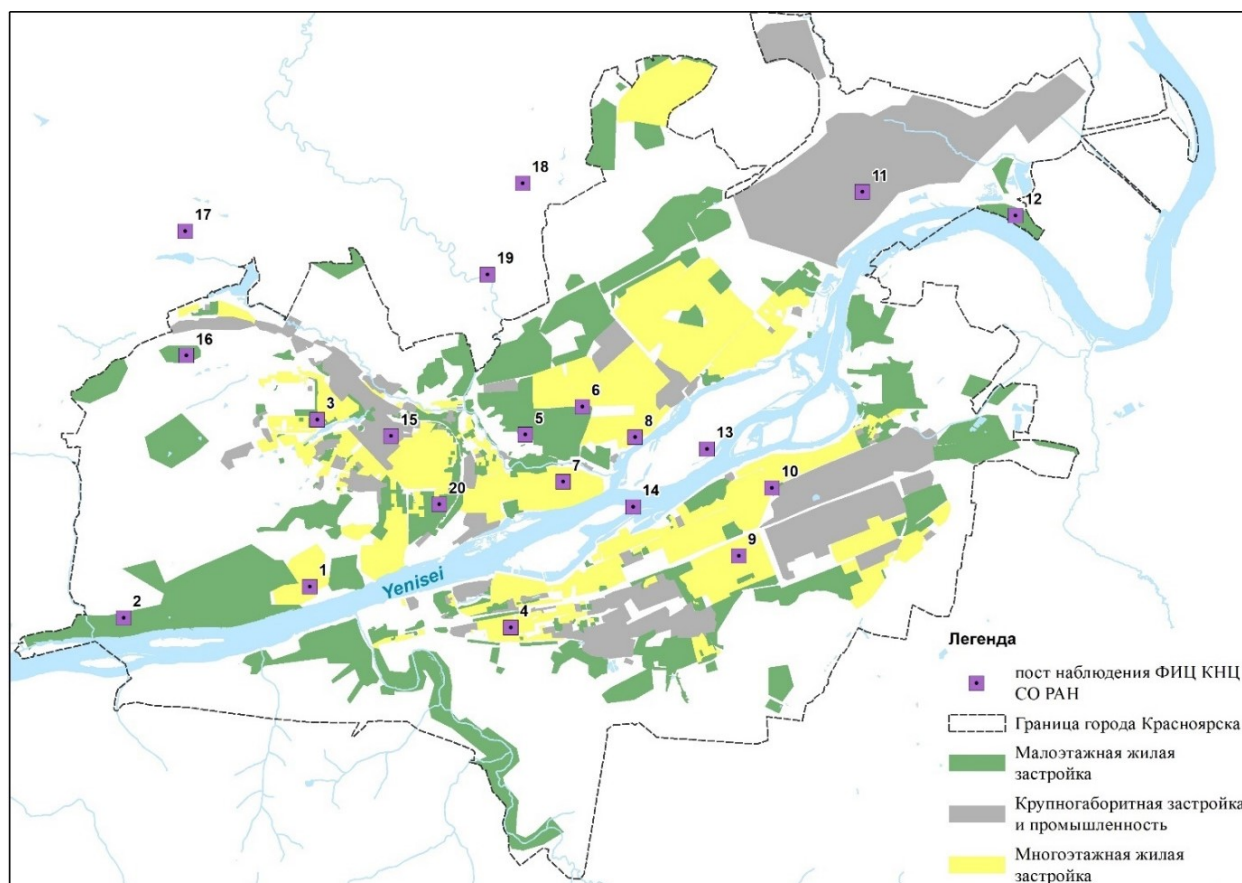


Рис. 1. Расположение станций мониторинга воздуха и ЛКЗ
Fig. 1. Location of air monitoring stations and LCZ

Для изучения тепловых аномалий в ГОТ необходимо учитывать дополнительные метеорологические параметры, такие как атмосферное давление, влажность, температура воздуха, индекс качества воздуха (AQI). В каталог данных исследования добавлены эти параметры за 2020, 2021 и 2022 гг. в дни съемки территории исследования Landsat-8–9.

¹ CityAir — система контроля качества воздуха. Электронный ресурс: <http://cityair.io/> (дата обращения 29.06.2024)

Из-за облачности выбор спутниковых снимков был сильно ограничен — выбраны дни, максимально подходящие к разным временам года. В 2020 г. было очень мало доступных сцен, и они все больше относятся к летнему сезону. В 2021 и 2022 гг. данные достаточно хорошо отображают сезонные изменения. В табл. 1 представлены метеорологические среднесуточные параметры на соответствующие даты исследования, полученные на посту наблюдения № 5 сети ФИЦ КНЦ СО РАН, который расположен в микрорайоне Покровка.

Табл. 1. Метеорологические условия на даты исследования
Table 1. Meteorological conditions on the dates of the study

Дата	Атмосферное давление	Влажность, %	Температура воздуха, °С	Индекс качества воздуха, PM _{2.5}
15 августа 2020	733.79	75.09	27.53	36
12 июня 2020	736.18	51.43	22.69	8
20 мая 2020	740.35	27.18	26.3	15
21 апреля 2021	744.83	36.72	1.5	14
26 июля 2021	729.44	92.11	30.12	60
5 октября 2021	746.46	100	6.5	78
17 мая 2022	735.87	60.1	22.14	38
12 июня 2022	732.61	51.59	20.32	11
14 сентября 2022	747.43	44.89	12.21	57

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Контуры тепловых аномалий определены для трех времен года (весна, лето, осень). Весенние острова тепла составляют 81 полигон, осенние острова тепла — 21 полигон, летние острова тепла — 82 полигона. Зимний период не рассматривался из-за отсутствия бесснежного периода в это время года. Высокие значения температур поверхности более заметны летом и весной, именно в это время преобладает количество контуров тепловых аномалий. Стоит также отметить, что тепловые аномалии находятся не только в местах городской застройки промышленными объектами, но и на природных возвышенностях. Учитывая специфику сформированных ЛКЗ, в данной работе не будем рассматривать природные тепловые аномалии, а только промышленные и городские. Для проведения анализа был сформирован один общий векторный слой контуров тепловых аномалий, который авторы формировали по принципу максимального пересечения контуров в разные сезоны. Всего авторы выделили 24 наиболее значимых контура. Стоит отметить, что преобладающее большинство тепловых аномалий расположено в ЛКЗ «крупногабаритная застройка и промышленность» (рис. 2).

При сравнении карт температуры поверхности 2020 и 2022 гг. были обнаружены изменения городской среды. На месте Комбайнового завода были построены жилые дома, следовательно, классы ЛКЗ необходимо изменить с «крупногабаритной застройки и промышленности» на «многоэтажную жилую застройку». Расширение городских границ тоже изменяет классы ЛКЗ. В городе ведется активная застройка по нескольким направлениям (в северо-западном, северном и юго-восточном); в основном новые территории классифицируются как «многоэтажная жилая застройка». Смена класса ЛКЗ с жилой на крупногабаритную застройку и промышленность достаточно редка и в период с 2020 по 2022 гг. не обнаружена.

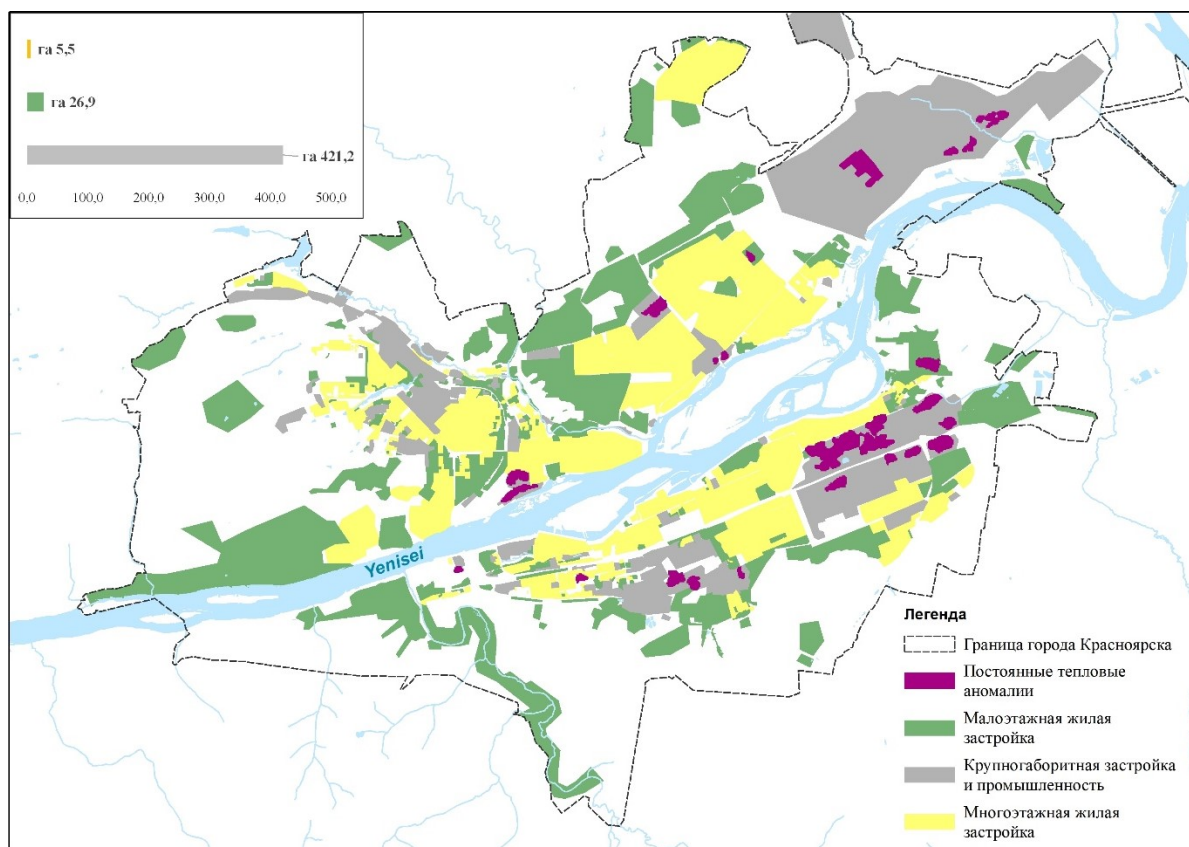


Рис. 2. Площадь распределения ЛКЗ в постоянных контурах тепловых аномалий
 Fig. 2. Distribution area of LCZ in constant contours of thermal anomalies

Из каталога собранных данных за период наблюдений с 2020 по 2022 г. было подобрано 9 дат с достаточно полным набором данных для каждого года и каждого сезона. Даты выбирались с учетом полноты данных, полученных пунктами наземных наблюдений Федерального исследовательского центра КНИЦ СО РАН и отсутствием облаков над ними. Для оценки качества и достоверности данных проведено сравнение трендовых значений температуры воздуха и поверхности, т. к. сравнивать эти значения напрямую некорректно.

Сложные погодные условия в 2020 г. привели к низкому качеству собранных данных, и после отбора данных за период весна-осень 2020 г. в районе исследования обнаружено всего три сцены с низким процентом облачности. Все доступные данные представлены в табл. 2.

Табл. 2. Значения температуры воздуха и LST в трех сезонах 2020 г.
 Table 2. The value of the air temperature and LST in three seasons of 2020

Точка наблюдения	15 августа 2020		12 июня 2020		20 мая 2020	
	Температура воздуха, °C	LST, °C	Температура воздуха, °C	LST, °C	Температура воздуха, °C	LST, °C
1	24,66	19,10	21,33	27,35	25,24	31,11
2	25,63	23,79	22,31	28,70	25,22	33,18
3	26,60	15,267	22,12	26,29	26,00	32,01
4	26,54	13,79	24,16	27,42	26,53	34,80
5	27,53	18,31	22,69	23,45	26,3	36,61

Точка наблюдения	15 августа 2020		12 июня 2020		20 мая 2020	
	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С
6	24,7	18,28	20,92	24,85	23,95	36,73
7	24,18	21,71	23,25	25,83	26,93	35,41
8	24,27	18,77	23,18	21,79	25,88	34,59
9	25,83	22,09	24,91	26,24	26,38	36,80
10	22,48	21,18	20,58	28,50	24,07	35,93
11	26,83	21,50	23,83	26,82	29,66	32,88
12	25,59	26,89	23,91	28,31	26,81	37,65
15	23,25	18,41	20,54	24,89	24,31	35,87
16	28,93	19,26	22,00	27,31	27,47	35,69
17	27,52	20,39	27,53	28,59	25,66	37,71
18	29,04	19,12	25,41	27,35	27,06	38,66
19	25,03	17,92	23,48	27,32	25,27	35,27
20	23,40	21,98	21,72	28,52	24,37	36,57

Соотношение температуры воздуха и поверхности в 2020 г. показывает, что данные за 15 августа 2020 г. для анализа не подходят, хотя при визуальном анализе облачность не была найдена. Температура по спутниковым данным была занижена, что можно объяснить дымом от лесных пожаров, которые были зафиксированы в Красноярском крае в августе 2020 г¹.

Три сезона 2021 г. (весна, лето, осень) представлены в табл. 3. Стоит отметить соответствие календарных и фактических сезонов года в 2021 г.

Табл. 3. Значения температуры воздуха и LST в трех сезонах 2021 г.
Table 3. The value of the air temperature and LST in three seasons of 2021

Пункт наблюдения	21 апреля 2021		26 июля 2021		5 октября 2021	
	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С
1	0,76	-2,14	28,13	33,79	6,46	7,27
2	0,87	-1,07	28,97	34,20	5,56	8,98
3	1,10	-0,71	30,56	31,46	5,77	6,18
4	2,65	0,25	32,95	35,18	6,97	8,94
5	1,50	3,16	30,12	29,09	6,5	6,95
6	1,16	5,64	27,30	34,30	7,09	7,42
7	0,92	-0,76	30,00	34,40	4,38	7,23
8	1,47	2,96	28,96	32,82	4,97	7,81
9	1,87	1,63	30,54	36,13	5,88	8,89
10	-1,03	4,13	25,98	36,01	3,58	8,10
11	5,86	8,14	32,49	36,49	10,67	8,76
12	3,22	9,26	30,93	35,94	5,68	8,05

¹ О лесопожарной обстановке в России на 00:00 по Московскому времени, 15 августа 2020 г. Электронный ресурс: <https://aviales.ru/popur.aspx?news=6158> (дата обращения 26.09.2023).

Пункт наблюдения	21 апреля 2021		26 июля 2021		5 октября 2021	
	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С
13	2,30	1,87	29,71	31,19	6,45	8,80
14	-0,84	-3,65	23,90	23,52	3,02	8,47
15	-1,54	0,88	26,51	36,09	4,06	6,72
16	0,60	-1,11	28,74	32,89	4,99	5,30
17	3,30	4,44	31,26	35,17	3,96	8,36
18	11,28	8,99	32,89	35,32	10,06	9,70
19	1,41	6,25	29,15	33,87	5,08	7,60
20	0,03	-1,73	25,99	32,66	3,26	7,92

Всего за весенне-летний период 2020 и 2021 гг. было собрано 8 снимков Landsat-8 с низким процентом облачности на территории исследования. Запуск программы Landsat-9 увеличил объем доступных данных, и за весенне-летний период исследования 2022 г. было отобрано 10 изображений с низким процентом облачности со спутников Landsat-8 и -9. В табл. 4 показаны значения температуры воздуха и LST для трех дат в 2022 г.

Табл. 4. Значения температуры воздуха и LST в трех сезонах 2022 г.
Table 4. The value of the air temperature and LST in three seasons 2022

Пункт наблюдения	17 мая 2022		12 июля 2022		14 сентября 2022	
	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С	Температура воздуха, °С	LST, °С
1	24,88	28,48	20,93	28,83	11,64	14,31
3	26,41	27,72	22,19	31,09	13,06	15,96
4	27,29	34,30	23,36	36,90	12,19	17,59
5	25,92	33,00	20,41	34,64	12,21	16,12
6	24,96	33,57	21,34	34,14	12,43	16,80
7	25,94	32,63	22,80	34,54	9,91	16,76
9	27,77	32,67	22,66	33,55	12,62	17,20
10	24,21	32,33	18,61	33,32	9,03	16,51
11	29,74	34,17	25,37	29,48	16,33	15,06
12	27,47	39,29	23,96	29,42	12,79	17,49
13	26,64	30,16	21,50	31,05	11,79	15,87
14	22,93	20,42	18,27	22,51	14,12	14,13
15	26,12	31,05	20,23	34,93	10,26	17,40
16	25,32	31,21	20,62	30,64	11,74	16,94
17	28,52	32,17	26,40	33,73	11,99	18,35
18	28,48	34,01	28,57	32,33	18,60	18,63
19	27,47	31,92	20,85	31,89	11,59	17,41
20	24,19	31,56	34,15	34,15	10,20	16,99

Контуры тепловых аномалий, полученные по LST, совпадают с высокими значениями температуры воздуха со станций мониторинга, т. к. станций всего 20, и для территории большого города этого мало. Для заполнения пропусков в значениях

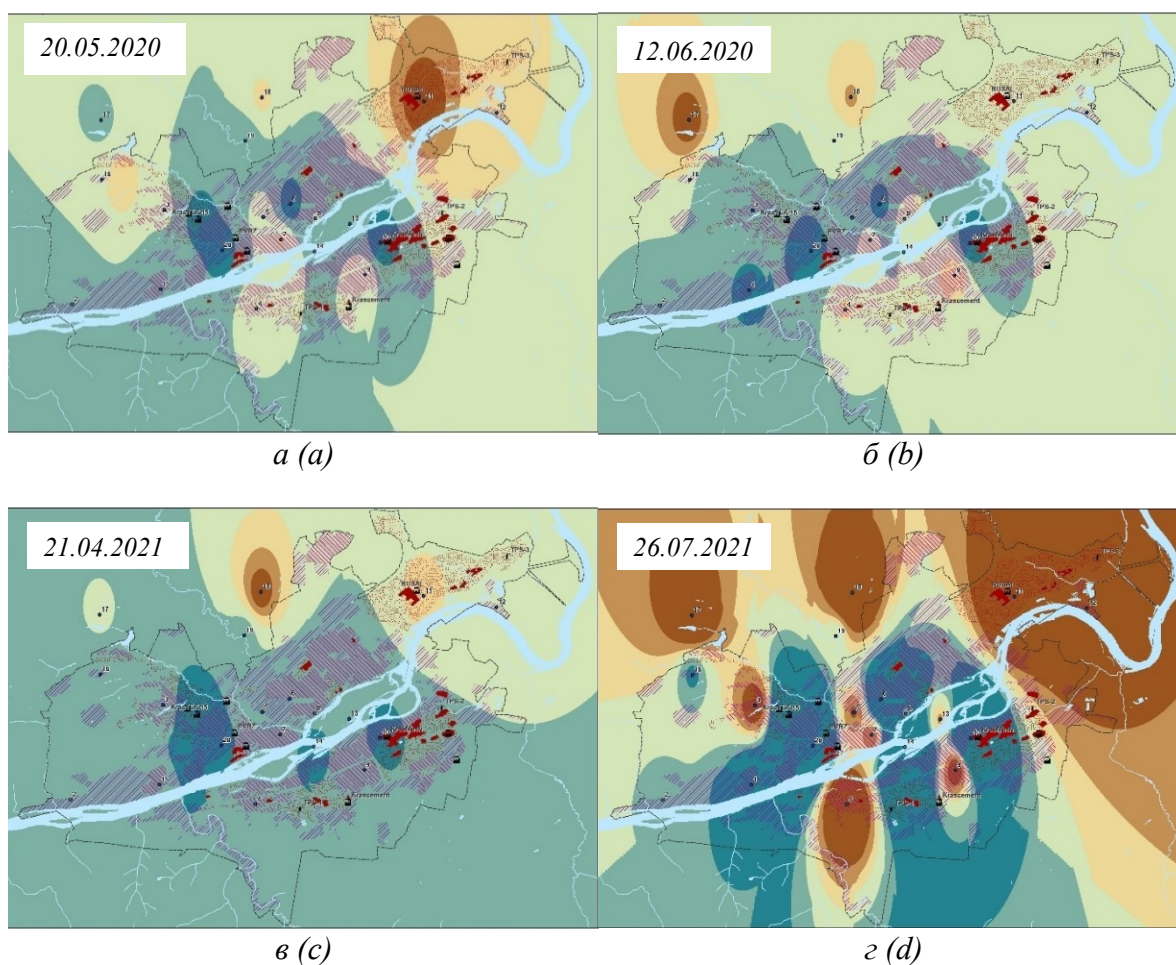
проведена интерполяция использованием метода обратно взвешенных расстояний. Этот метод предполагает, что влияние значения переменной уменьшается с увеличением расстояния от станции. Количество станций не позволяет точно вычислить температуру в любой точке города, но поможет показать изменения значений температуры воздуха на исследуемой территории.

На рис. 3 показаны карты интерполяции по температуре воздуха на даты исследования. Температура в зависимости от сезона меняется от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. При разных значениях температуры воздуха наблюдается увеличение значений в точках наблюдения.

На 6 из 7 изображений максимальные значения температуры зафиксированы в пункте наблюдений 11, в этом месте находится крупный промышленный объект РУСАЛ.

На рис. 3а средняя температура воздуха за 20.05.2020 составляет $26,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по табл. 1), пиковые значения в районе РУСАЛа $29,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 2), остальная температура воздуха распределена более равномерно. Похожая ситуация повторяется 14.09.22 (рис. 3з).

В пунктах 17 и 18 на большинстве изображений тоже зафиксированы максимальные температуры, которые наблюдаются 12.06.20 (рис. 3б), 21.04.21 (рис. 3в), 26.07.21 (рис. 3г), 05.10.21 (рис. 3д), 17.05.22 (рис. 3е). Точки наблюдения 17 и 18 не относятся к промышленным и находятся за пределами города. Такие максимальные температуры требуют отдельного изучения этой местности.



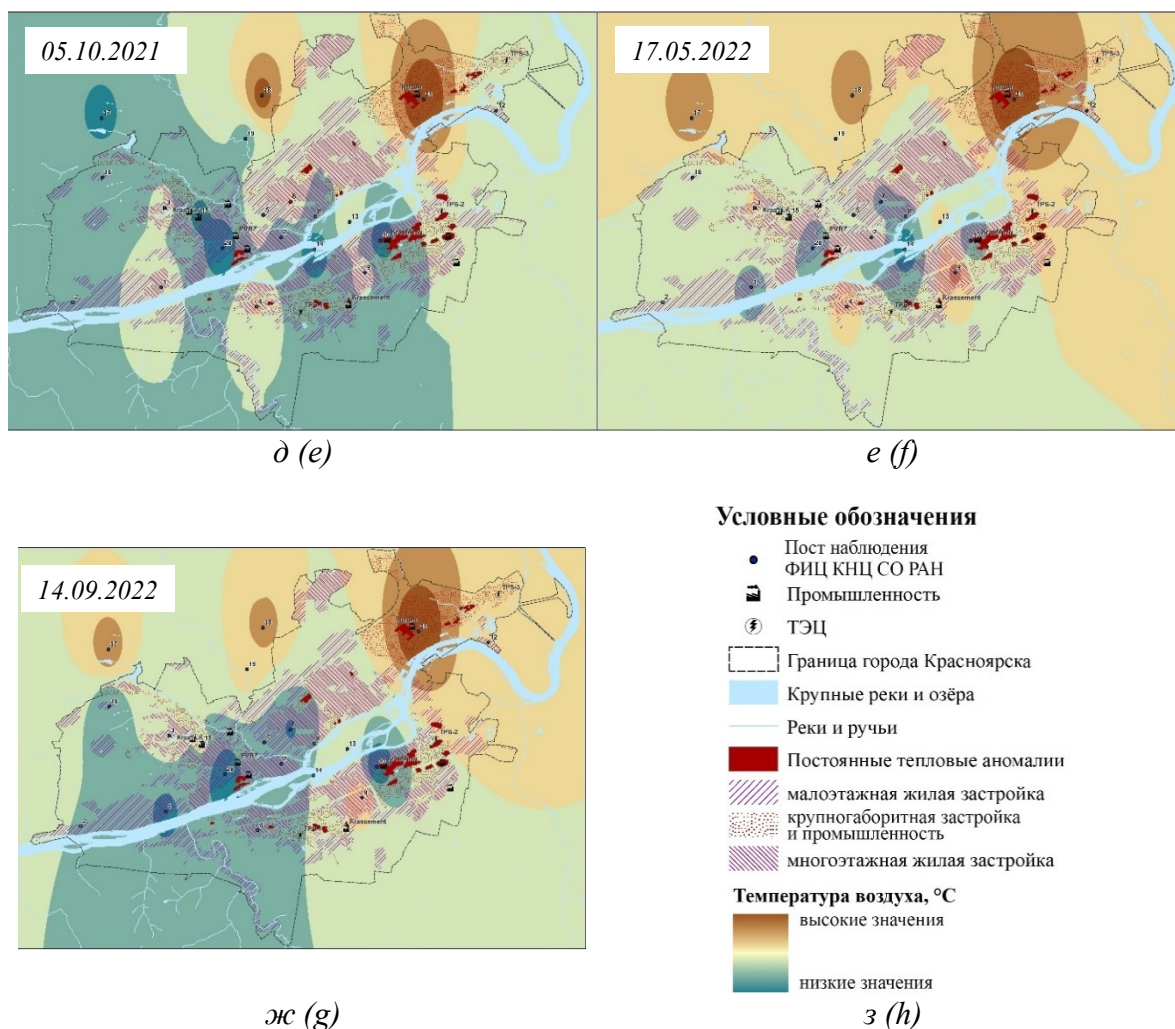


Рис. 3. Карта интерполяции по температуре воздуха: а) 20 мая 2020 г.; б) 12 июня 2020 г.; в) 21 апреля 2021 г.; г) 26 июля 2021 г.; д) 5 октября 2021 г.; е) 17 мая 2022 г.; ж) 14 сентября 2022 г.; з) условные обозначения

Fig. 3. Interpolation map based on air temperature: a) May 20, 2020; b) June 12, 2020; c) April 21, 2021; d) July 26, 2021; e) October 5, 2021; f) May 17, 2022; g) September 14, 2022; h) legend

ВЫВОДЫ

Большие объемы данных приводят к необходимости создания новых подходов к их применению. Чаще всего совместить источники недостаточно, и нужно формировать новые подходы к их объединению. По этой причине возникает необходимость проанализировать исходные данные, оценить их взаимодействие и устранить неточности.

В статье описаны два способа получения данных о температуре. Первый способ — получение значений температуры воздуха со станций мониторинга. Второй — определение значений температуры поверхности по данным спутников Landsat-8 и Landsat-9.

При анализе городской территории эффективнее рассматривать эти два показателя вместе. На основе данных о приземной температуре авторы получили контуры тепловых аномалий в границах г. Красноярска, сформировавшиеся за период с 2013 по 2022 г. Отмечается их сезонная динамика в зависимости от сезона (весна, лето или осень). При совмещении этих контуров по сезонам были выбраны те, которые оказывают наибольшее

влияние на город и считаются авторами всесезонными постоянными тепловыми аномалиями.

В работе территория города разделена на три класса ЛКЗ. Оценивая расположение постоянных контуров тепловых аномалий и ЛКЗ, можно отметить, что расположение контуров тепловых аномалий совпадает с классом «крупногабаритная застройка и промышленность».

Комплексный подход к изучению городской среды позволяет расширить представление о взаимодействии различных факторов, например, промышленных объектов, вырубки лесов, сложного ландшафта и состояния окружающей среды. Учитывая неравномерность получения данных ДЗЗ (обычно 3–4 безоблачных изображения за сезон), важно определить постоянные контуры тепловых аномалий и найти их взаимное расположение с ЛКЗ. Общие тенденции распределения температуры сохраняются как при изучении LST, так и при интерполяции температуры воздуха. Вклад промышленных объектов отображается на картах интерполяции температуры воздуха.

Геопространственные инструменты и инструменты дистанционного зондирования для городских исследований дают возможность планировать этапы городского развития, чтобы смягчить эффект воздействия тепловых аномалий на городскую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гостева А. А., Матузко А. К., Якубайлик О. Э.* Алгоритм вычисления температуры поверхности для восстановления потери данных Landsat-8–9 Collection 2 Level 2. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2023. Т. 29. № 1. С. 318–329. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329.
- Самсонов Т. Е., Тригуб К. С.* Картографирование локальных климатических зон Москвы по космическим снимкам. Геодезия и картография, 2018. Т. 79. № 6. С. 14–25. DOI: 10.22389/016-7126-2018-936-6-14-25.
- Borzino N., Chng S., Mughal M. O., Schubert R.* Willingness to Pay for Urban Heat Island Mitigation: A Case Study of Singapore. *Climate*, 2020. V. 8. Iss. 7. P. 82. DOI: 10.3390/cli8070082.
- Cheval S., Micu D., Dumitrescu A., Irimescu A., Frighenciu M., Iojă C., Tudose N. C., Davidescu Ș., Antonescu B.* Meteorological and Ancillary Data Resources for Climate Research in Urban Areas. *Climate*, 2020. V. 8. Iss. 3. P. 37. DOI: 10.3390/cli8030037.
- Choate M. J., Rengarajan R., Storey J. C., Lubke M.* Landsat-9 Geometric Characteristics Using Underfly Data. *Remote Sensing*, 2022. V. 14. Iss. 15. P. 3781. DOI: 10.3390/rs14153781.
- Liu L., Zhang Y.* Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 2011. V. 3. P. 1535–1552.
- Malakar N. K., Hulley G. C., Hook S. J., Laraby K., Cook M., Schott J. R.* An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: Methodology and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018. V. 56. P. 5717–5735.
- Matuzko A. K., Yakubailik O. E.* Urban heat island effects over Krasnoyarsk obtained on the basis of Landsat-8 remote sensing data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2018. V. 211. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012010.
- Oke T. R., Mills G., Voogt J. A.* *Urban Climates*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. 525 p.
- Yakubailik O., Zavorue V., Malimonov M. I., Pushkarev A.* Spatial Analysis of Air Pollution in Krasnoyarsk. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020. V. 2534. P. 84.

Zhou D., Xiao J., Bonafoni S., Berger C., Deilami K., Zhou Y., Frohling S., Yao R., Qiao Z., Sobrino J. A. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges and perspectives. *Remote Sensing*, 2019. V. 11. Iss. 1. P. 48. DOI: 10.3390/rs11010048.

REFERENCES

Borzino N., Chng S., Mughal M. O., Schubert R. Willingness to Pay for Urban Heat Island Mitigation: A Case Study of Singapore. *Climate*, 2020. V. 8. Iss. 7. P. 82. DOI: 10.3390/cli8070082.

Cheval S., Micu D., Dumitrescu A., Irimescu A., Frighenciu M., Iojă C., Tudose N. C., Davidescu Ș., Antonescu B. Meteorological and Ancillary Data Resources for Climate Research in Urban Areas. *Climate*, 2020. V. 8. Iss. 3. P. 37. DOI: 10.3390/cli8030037.

Choate M. J., Rengarajan R., Storey J. C., Lubke M. Landsat-9 Geometric Characteristics Using Underfly Data. *Remote Sensing*, 2022. V. 14. Iss. 15. P. 3781. DOI: 10.3390/rs14153781.

Gosteva A. A., Matuzko A. K., Yakubailik O. E. Algorithm for calculating surface temperature to recover lost Landsat-8–9 Collection 2 Level 2 data. *InterCarto. InterGIS*, 2023. V. 29. No. 1. P. 318–329 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-318-329.

Liu L., Zhang Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 2011. V. 3. P. 1535–1552.

Malakar N. K., Hulley G. C., Hook S. J., Laraby K., Cook M., Schott J. R. An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: Methodology and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018. V. 56. P. 5717–5735.

Matuzko A. K., Yakubailik O. E. Urban heat island effects over Krasnoyarsk obtained on the basis of Landsat-8 remote sensing data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2018. V. 211. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012010.

Oke T. R., Mills G., Voogt J. A. *Urban Climates*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. 525 p.

Samsonov T. E., Trigub K. S. Mapping of local climatic zones of Moscow city from satellite images. *Geodesy and Cartography*, 2018. V. 79. No. 6. P. 14–25 (in Russian). DOI: 10.22389/016-7126-2018-936-6-14-25.

Yakubailik O., Zavorue V., Malimonov M. I., Pushkarev A. Spatial Analysis of Air Pollution in Krasnoyarsk. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020. V. 2534. P. 84.

Zhou D., Xiao J., Bonafoni S., Berger C., Deilami K., Zhou Y., Frohling S., Yao R., Qiao Z., Sobrino J. A. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges and perspectives. *Remote Sensing*, 2019. V. 11. Iss. 1. P. 48. DOI: 10.3390/rs11010048.