

## Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8

Е. А. МАМАШ\*, И. А. ПЕСТУНОВ, Ю. Н. СИНЯВСКИЙ

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Новосибирск, Россия

\*Контактный автор: Мамаш Елена Александровна, e-mail: [elenamamash@gmail.com](mailto:elenamamash@gmail.com)

Поступила 16 мая 2022 г., принята в печать 23 мая 2022 г.

Рассматриваются вопросы оценивания и анализа температурного поля территорий крупных промышленных городов Сибири по спутниковым данным. С помощью системы Google Earth Engine построены температурные карты городских территорий Барнаула, Кемерово, Красноярска, Новосибирска и Омска за бесснежный период с 2013–2021 гг. по разновременным данным Landsat-8. Построенные карты дают возможность выявить закономерности в распределении их температурных полей, что, в свою очередь, может служить источником информации при оценке промышленного развития городов, степени урбанизации и экологического состояния территории. Предложен подход для качественной оценки пространственной дифференциации зеленых зон городов, характеризующей уровень комфортности среды для проживания и досуга, основанный на анализе гистограмм, построенных по многолетним значениям LST Landsat-8. Показано, что величина LST Landsat-8 может быть использована в качестве дополнительного информативного признака при классификации городских территорий.

*Ключевые слова:* температура подстилающей поверхности, LST, Landsat-8, “остров тепла”, Google Earth Engine, крупные города Сибири.

*Цитирование:* Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8. Вычислительные технологии. 2022; 27(3):95–111. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.008.

### Введение

Одним из быстро развивающихся и востребованных направлений в обработке и применении данных дистанционного зондирования (ДДЗ) является исследование данных длинноволнового инфракрасного диапазона (8–15 мкм). Они широко используются для анализа температуры подстилающей поверхности (LST) как природных, так и городских территорий. Анализ температурных полей крупных городов позволяет определить наличие тепловых аномалий, их источники, интенсивность и характер распределения, выделить границы “островов тепла” (Surface Urban Heat Island, SUHI), выявить закономерности в распределении температуры на территории города. Это важно для рационального планирования и развития городской инфраструктуры, предупреждения и

решения возникающих экологических проблем, создания комфортной зоны для проживания. В работах зарубежных авторов температурные поля крупных городов часто используются для анализа землепользования и мониторинга изменений состояния земного покрова, вызванных процессом урбанизации [1].

Для исследования локальных изменений температурного режима на небольших территориях, в том числе городских, чаще всего используются данные спутников серии Landsat. Данные тепловых каналов спутников Landsat-8 имеют пространственное разрешение 100 м (2013 г. — н. в.), Landsat-7 — 60 м (1999 г. — н. в.), Landsat-5 — 120 м (1984–2013 гг.), Landsat-4 — 120 м (1982–1993 гг.). Доступ к этим данным чаще всего осуществляется через сайт Геологической службы США (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). В последние годы все большую популярность приобретает также облачная платформа Google Earth Engine (GEE), обеспечивающая не только доступ к данным, но и обработку их больших временных серий. В GEE появилась коллекция температурных продуктов спутников Landsat уровня обработки L2, что соответствует готовому тематическому продукту. Однако при попытке использования этих данных для анализа температурных полей городов, расположенных на территории Сибири, пришлось решить ряд проблем, таких, например, как наличие больших пробелов в данных и присутствие артефактов на границах снимков, возникающих вследствие того, что параметры расчета температуры для соседних снимков могут различаться.

При расчете LST по данным Landsat нужно учитывать, что не существует как единого общепринятого метода радиометрической и атмосферной коррекции снимков, так и единого алгоритма учета излучательной способности земной поверхности (коэффициента эмиссии). Эта проблема обсуждается во многих публикациях, посвященных использованию температурных данных [2–4]. Чаще всего при проведении атмосферной коррекции используются готовые алгоритмы, представленные в известных пакетах программ для обработки ДДЗ, либо разрабатываются собственные алгоритмы, например, учитывающие количество водяного пара посредством использования данных реанализа [5, 6]. В GEE спутниковые данные сгруппированы в коллекции, в том числе имеется коллекция атмосферно-скорректированных данных Landsat-8 (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>). Данные тепловых каналов спутников Landsat-4, 5, 7, 8 в коллекции GEE представлены в пересчете на разрешение в 30 м, что очень удобно для изучения объектов внутригородских территорий.

Задача определения коэффициента эмиссии решается в основном следующими способами.

1. Для вычисления коэффициента эмиссии используются данные, получаемые с других спутников, например Terra и Aqua [5–8].
2. Коэффициент эмиссии принимает несколько значений в зависимости от типа подстилающей поверхности [9].
3. Коэффициент эмиссии вычисляется на основе индекса NDVI с использованием функции, отражающей соотношение площадей открытой почвы и растительности на исследуемом участке (Fractional Vegetation Cover, FVC [10]) [4, 11], либо на основе регрессионной модели [12]. В первом случае возникает проблема определения пороговых максимальных и минимальных значений NDVI для открытой почвы и растительности. Эти значения в разных работах варьируются и определяются особенностями решаемых задач [8]. Регрессионная модель строится на основе результатов наземных измерений коэффициента эмиссии и тоже может, вообще

говоря, зависеть от количества измерений и свойств подстилающей поверхности. В работе [12] эта модель строится на основе данных, полученных на территории Южной Африки.

Достаточно подробно многие из перечисленных способов обсуждаются в работе [8], посвященной кластерному анализу “островов тепла” на урбанизированных территориях в глобальном масштабе, выполненному с использованием GEE. Статистические оценки результатов вычисления LST различными методами приводятся также в работе [13].

В задачах анализа городских территорий можно выделить несколько направлений. Это решение задач, связанных с построением температурных карт, выделением “островов тепла”, изучением их динамики и сезонной зависимости [14–20], анализом динамики застройки [9, 21–23], построением различных многофакторных моделей, отражающих зависимость LST от разнообразных индексов, например NDVI, NDBI, NDWI, LSWI, NDBaI и др. [1, 15, 18, 19, 22, 24, 25]. В ряде статей приводится результат, указывающий на сильную корреляцию LST с индексом застройки NDBI. Такие оценки получены для некоторых городов Китая, Индии, Эфиопии, Сальвадора, Австралии и др. [1, 15, 22, 25–30]. В большинстве случаев эти результаты базируются на сравнительно небольшом количестве данных за определенные промежутки времени. В работе [31] обсуждается актуальная проблема влияния пандемии COVID-19 на изменение в распределении температурного поля г. Касабланки (Марокко). Однако выводы делаются без учета существующих на исследуемой территории климатических особенностей, что приводит к необходимости использования прогнозных климатических моделей и ставит под сомнение полученные результаты. Ряд работ посвящен валидации данных LST Landsat путем сравнения их с данными MODIS/(Terra+Aqua), ASTER/Terra, а также с данными метеостанций или специальных буев NOAA [2, 7]. Практически во всех этих работах используется сравнительно небольшое количество измерений, полученных по результатам анализа отдельных сцен. На их основе даются статистические оценки и делаются выводы о соответствии наземных и спутниковых данных и ошибках измерений. Недостатком этого подхода является чувствительность метода к выбору анализируемых снимков.

В работе [15] представлены прогнозные модели изменения LST на территории города, основанные на различных методах (регрессионных, нейросетевых и др.). В [20] проводится сопоставление данных LST с основными типами подстилающей поверхности, полученными в результате предварительной классификации территории турецкого г. Нигде по четырем разновременным снимкам и делаются соответствующие выводы о развитии городской территории.

Среди отечественных работ можно выделить [32–36], в которых анализировались городские “острова тепла” Москвы, Нижнего Новгорода и крупнейших городов Заполярья на основе данных MODIS, а также работы [9, 23], в которых опробована методика выявления изменений городской среды Красноярска по спутниковым данным LST Landsat. В работе [23] представлены результаты сравнения температурных данных, полученных на автоматических метеостанциях, с данными спутника Landsat-8 на основе десяти снимков и трех метеостанций.

Современные системы обработки ДДЗ, такие как GEE и BEGA-Science, созданная в ИКИ РАН, позволяют осуществить переход от обработки отдельных сцен к анализу пространственно-временных серий изображений [5, 7, 8, 37]. Такой подход дает возможность проследить динамику происходящих изменений, получить достоверные оценки основных статистических показателей, выявить устойчивые аномалии и обнаружить

закономерности в их пространственно-временном распределении на исследуемых территориях.

Целями данной работы являются построение температурных карт городских территорий наиболее развитых промышленных городов Сибири на основе многовременных серий спутниковых данных Landsat-8, выявление устойчивых тепловых аномалий и особенностей в распределении их температурных полей, а также определение качественных интегральных показателей пространственной дифференциации зеленых зон этих городов, характеризующих степень комфортности среды для проживания и досуга.

Актуальность последней задачи обусловлена тем, что отечественные строительные нормы и правила (СНиП) учитывают при планировании на уровне города такие показатели озеленения, как доля зеленой территории от площади города, душевой показатель обеспеченности зелеными зонами и доступность этих зон. Однако эти показатели не отражают в полной мере пространственную дифференциацию зеленых зон. При выполнении указанных показателей, например, окраины могут утопать в зелени, а жилые кварталы центральных районов испытывать ее острый дефицит [38, 39].

## 1. Метод вычисления LST и сравнение с наземными данными

В качестве исходных данных для обработки использованы серии атмосферно скорректированных изображений из соответствующей коллекции Landsat-8 в системе GEE за 2013–2021 гг. Основные результаты получены с использованием возможностей системы GEE и последующей обработкой данных в геоинформационной системе QGIS.

Для вычисления LST применен традиционный подход [40, 41]:

$$T_{\text{LST}} = \frac{T_{\text{с.я}}}{\left(1 + \lambda \frac{T_{\text{с.я}}}{c_2}\right) \cdot \ln(\varepsilon)} - 273.15.$$

Здесь  $T_{\text{с.я}}$  — температура спектральной яркости (К), которая определяется интенсивностью излучения в спектральном канале спутника;  $\lambda$  — длина волны, для десятого канала Landsat-8 это значение равно 10.8 мкм;  $c_2 = hc/s = 1.4388 \cdot 10^{-2}$  м · К;  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $s = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — константа Больцмана;  $c = 2.998 \cdot 10^8$  м/с — скорость света;  $\varepsilon$  — коэффициент эмиссии, вычисленный на основе NDVI по формуле из [6, 42] ( $\text{NDVI}_{\text{min}} = 0.2$  и  $\text{NDVI}_{\text{max}} = 0.6$  — минимальное и максимальное значения, выбранные как границы значений NDVI для открытой почвы и растительности).

Проводился сравнительный анализ результатов расчетов значений температуры, вычисленных по приведенной выше формуле для коэффициента эмиссии, полученного на основе NDVI, и коэффициента эмиссии, равного 0.98. Разница значений варьировалась в пределах полутора градусов и не влияла как на качественную картину распределения температуры на территории городов, так и на вид гистограмм распределения температуры, что говорит о малой чувствительности результатов подсчета LST к данному параметру.

Валидация спутниковых данных выполнялась двумя способами:

- 1) на основе данных метеостанций, расположенных в черте города Новосибирска;
- 2) с использованием среднемесячных значений температуры воды Обского водохранилища.

Для сравнения использованы данные двух метеостанций: “Огурцово”, расположенной на левом берегу г. Новосибирска, и “Правобережная” ( $55^{\circ}2.472'$  с. ш.,  $82^{\circ}56.058'$  в. д.) — на правом берегу. За период 2013–2019 гг. извлечены архивные данные (сайт <https://rp5.ru>) и получены наборы спутниковых измерений в соответствующих точках. Количество спутниковых измерений за каждый месяц на метеостанциях различно, но в целом наблюдаются общие закономерности, а величина коэффициента корреляции наземных и спутниковых данных превышает значение 0.9. В результате были построены графики, позволяющие сравнить наземные и спутниковые измерения (рис. 1). Среднеквадратическая ошибка в первом случае (рис. 1, а) равна  $4.52^{\circ}\text{C}$ , во втором (рис. 1, б) —  $3.14^{\circ}\text{C}$ . На рис. 2 приведены гистограммы разностей среднемесячных температур, вычисленных по спутниковым данным и данным метеостанций.

Следует отметить, что все графики демонстрируют наличие резко возрастающей ошибки в апреле — мае — июне, что может быть обусловлено тем, что спутник измеряет приземную температуру, а метеостанции — температуру воздуха на высоте 2 м от поверхности Земли. Измерения проводились в 12:00–12:30 местного времени, в эти часы температура воздуха меняется быстрее, чем приземная температура.

На рис. 2 видно, что графики распределения ошибок на метеостанциях визуально похожи (коэффициент корреляции равен 0.89), что может говорить о наличии систематической ошибки, обусловленной природно-климатическими факторами.

Кроме того, выполнено сравнение средних значений температур, полученных на метеостанциях, и спутниковых данных по месяцам. Показано, что в 60 % случаев, в основном в бесснежный период, среднемесячная температура, вычисленная на основе спутниковых данных, превышает температурные данные метеостанций (рис. 3).

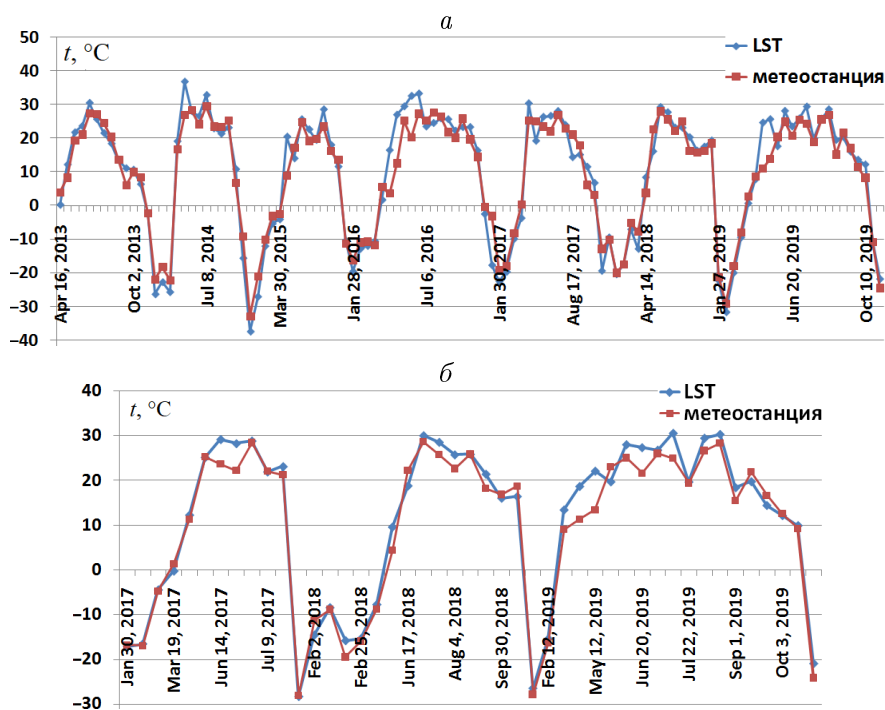


Рис. 1. Графики температур, полученных по наземным измерениям на метеостанциях “Огурцово” (а) и “Правобережная” (б) и по спутниковым данным Landsat-8

Fig. 1. Graphs of temperature obtained from ground-based measurements at weather stations “Ogurtsovo” (a) and “Pravoberezhnaya” (b) and from Landsat-8 satellite data

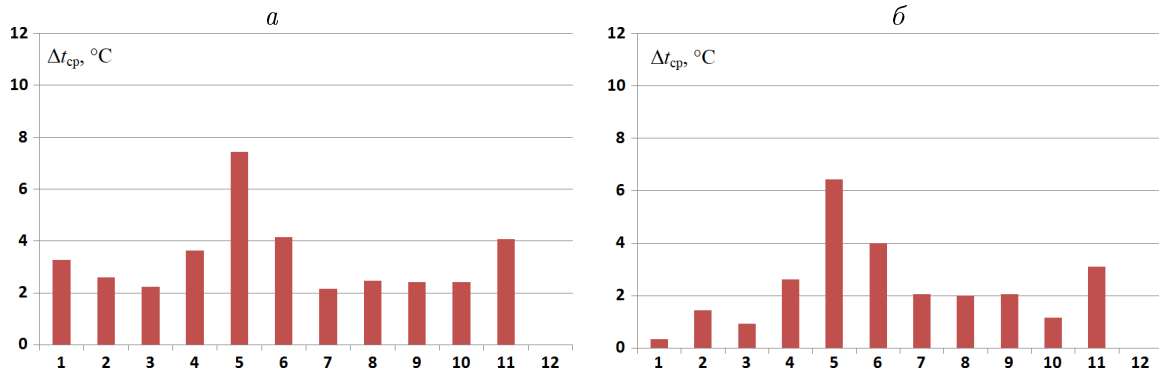


Рис. 2. Гистограммы разностей среднемесячных температур  $\Delta t_{\text{cp}}$ , вычисленных по спутниковым данным и данным метеостанций “Огурцово” (а) и “Правобережная” (б)

Fig. 2. Histograms of differences in mean monthly temperature  $\Delta t_{\text{cp}}$  calculated from satellite data and data from “Ogurtsovo” (a) and “Pravoberezhnaya” (b) weather stations

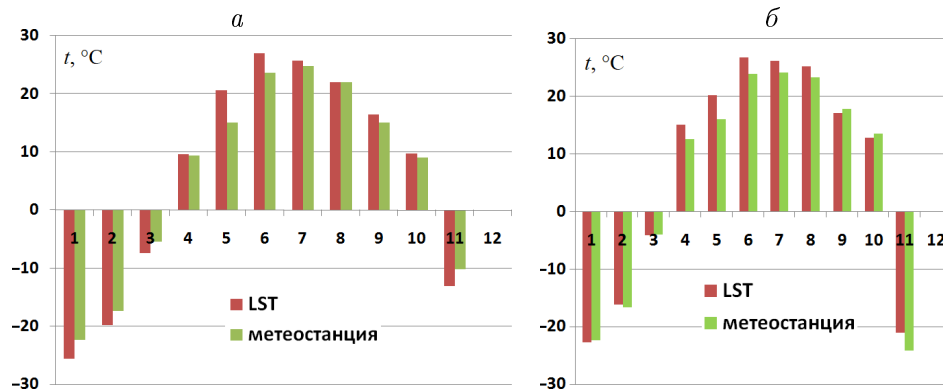


Рис. 3. Средние значения температур по месяцам: метеостанция “Огурцово” (а) и “Правобережная” (б)

Fig. 3. The average temperature values by month: “Ogurtsovo” (a) and “Pravoberezhnaya” (b) weather stations

Т а б л и ц а 1. Наземные измерения температуры, °С

Table 1. Ground-based temperature measurements, °С

	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Сайт 1	13.5	17.6	20.3	19.2	12.9	6.2
Сайт 2	11.2	15.4	20.2	17.9	10.9	7.0

Валидация спутниковых данных с использованием среднемесячных значений температуры Обского водохранилища проводилась на основе данных двух сайтов (табл. 1) — <https://travel.org.ua/water/obskoe-more-temperatura-vody> (сайт 1) и <https://seatemperature.ru/current/russia/ob-novosibirsk-sea-temperature> (сайт 2).

Средневзвешенное значение, вычисленное по данным сайта 1, составило 17.3 °С, по данным сайта 2 — 14.7 °С. В качестве весов выступало количество снимков, сделанных в каждом месяце за исследуемый временной интервал. Результаты наземных измерений сравнивались с данными Landsat-8 (2014–2020 гг.), всего было обработано 359 снимков. Максимальное количество снимков приходится на летние месяцы. Так, средняя многолетняя температура по результатам статистической обработки слоя в границах водо-

хранилища составила  $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что согласуется с результатами, полученными по данным сайта 1 (разница составляет  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), и несколько превышает (на  $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) данные сайта 2.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения данных Landsat-8 для оценки температурного поля подстилающей поверхности.

## 2. Построение и анализ температурных карт

С использованием данных десятого канала спутника Landsat-8 и приведенной выше формулы в системе GEE реализован алгоритм обработки серии спутниковых данных за период 2013–2021 гг., построены карты средних многолетних температур для крупных промышленных городов Сибири (Новосибирска, Красноярска, Кемерово, Омска, Барнаула) в пределах границ их городских территорий (рис. 4). На этих картах хорошо просматриваются устойчивые зоны “аномально” высоких температур, которые соответствуют промышленным зонам, а также сети автомобильных и железных дорог. Для указанных городов построены гистограммы распределения значений температур, посчитаны основные статистические показатели, такие как среднее значение и среднеквадратическое отклонение (табл. 2).

Построение карт средних многолетних температур позволяет не только выявлять области устойчивых аномалий, но и строить и исследовать гистограммы распределений, устанавливать закономерности в распределении температуры исходя из их внешнего вида. Гистограммы, соответствующие картам, представленным на рис. 4, приведены на рис. 5.

На рис. 5 видно, что гистограммы можно разделить на двумодальные (Кемерово, Омск) и трехмодальные (Барнаул, Новосибирск, Красноярск), причем первая мода, соответствующая наиболее низким температурам, это вода. Общим является то, что во всех пяти случаях аномальные значения температур и соответственно “острова тепла” можно получить отсечением всех значений, кроме хвостовой части гистограммы, по пороговым значениям, которые находятся экспериментальным путем. В некоторых работах есть попытки использовать для определения зоны “аномальных” пикселей формулы на основе стандартного отклонения, например  $\mu(t) + 0.5\sigma(t)$ , где  $\mu(t)$  — среднее значение LST, а  $\sigma(t)$  — стандартное отклонение [30, 43], но они также являются эмпирическими. В нашем случае для определения “аномальных” тепловых зон соответствующие пороговые значения представлены в табл. 1. Пороговые значения для городов различаются в пределах  $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что объясняется различием в климатических условиях, рельефом, плотностью застройки, разной степенью промышленного развития. Приведенные в табл. 1 пороговые значения хорошо согласуются

Т а б л и ц а 2. Основные статистические показатели температуры,  $^{\circ}\text{C}$

Table 2. Basic statistical indicators of temperature,  $^{\circ}\text{C}$

Город	$t_{\min}$	$t_{\max}$	Среднее значение $\mu(t)$	Стандартное отклонение $\sigma(t)$	$\mu(t) + 0.5\sigma(t)$
Новосибирск	16	32	22.9	3.1	24.45
Красноярск	9.6	34.9	22.6	3.5	24.35
Барнаул	15.6	36.8	22.6	3.3	24.25
Кемерово	15.7	33.4	22.2	1.9	23.15
Омск	16.9	38.3	25.8	2.31	26.95

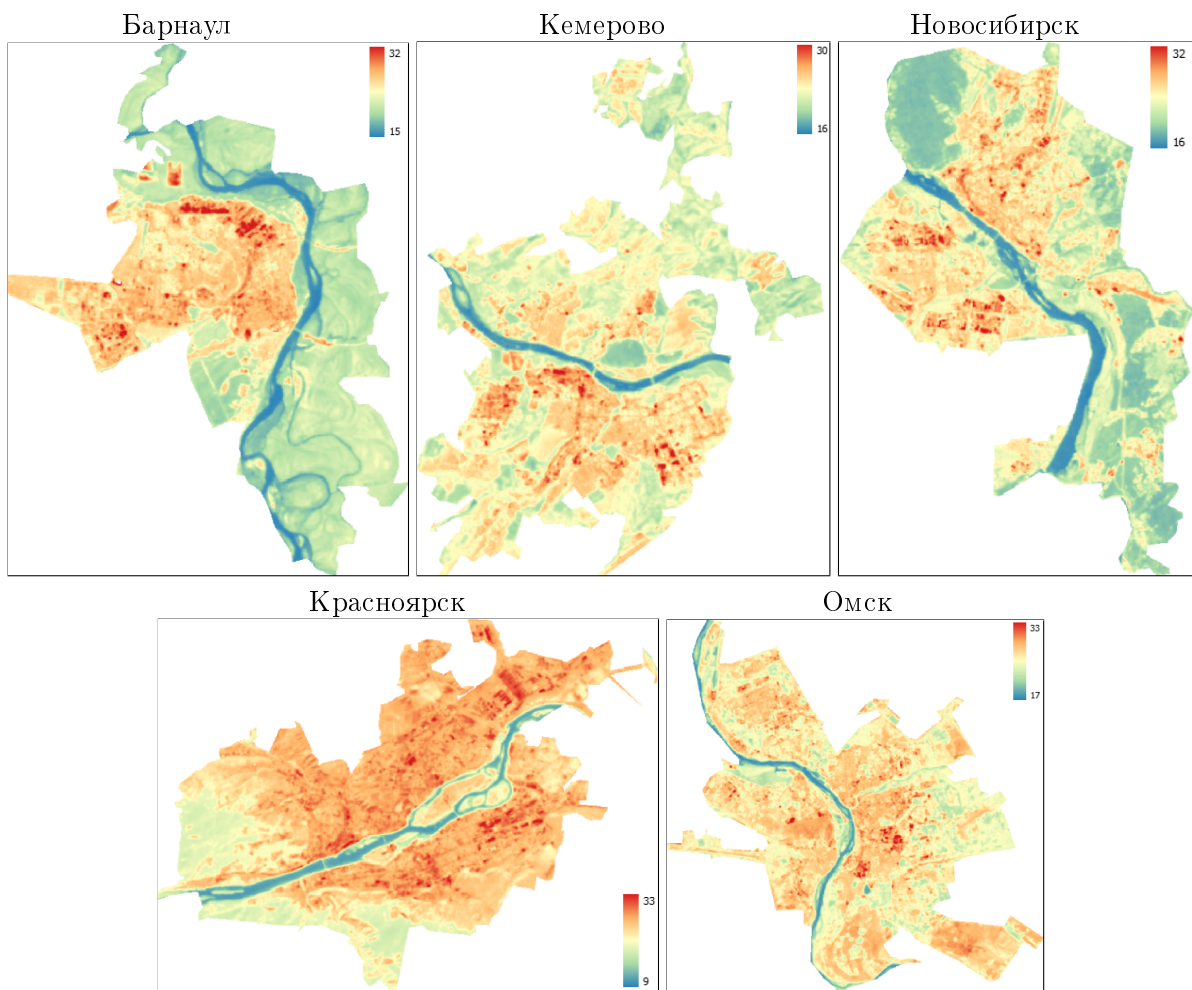


Рис. 4. Карты средних многолетних температур за бесснежный период 2013–2021 гг. в пределах границ наиболее развитых промышленных городов Сибири

Fig. 4. Maps of average multiyear temperatures for the snow-free period 2013–2021 within the boundaries of the most developed industrial cities of Siberia

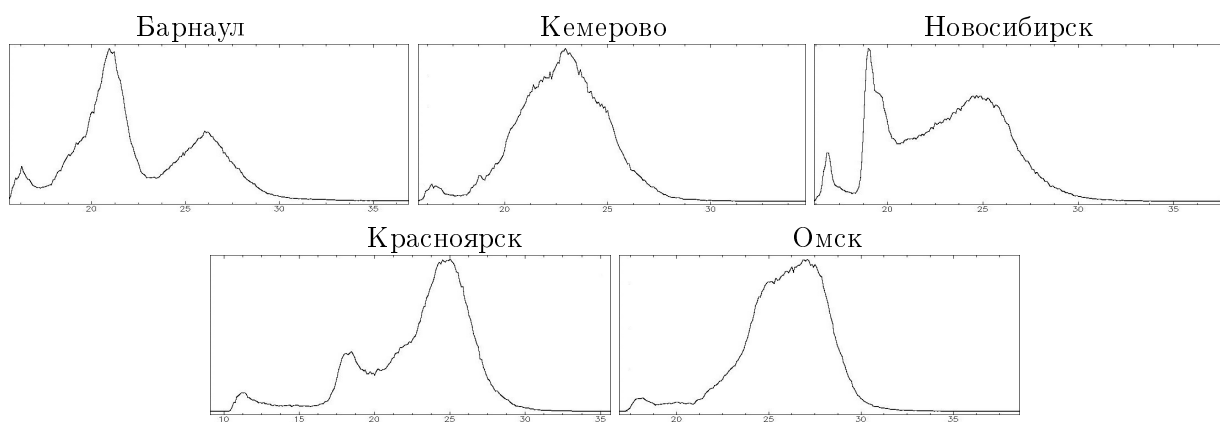


Рис. 5. Гистограммы распределения температур за бесснежный период 2013–2021 гг.

Fig. 5. Temperature distribution histograms for the snow-free period 2013–2021



с экспериментальными данными, полученными в результате наложения на карту LST данных о распределении промышленных зон, железнодорожных путей и сети автодорог на территории городов. На рис. 6 приведен пример покрытия зоны высоких температур векторными данными, представленными на сайте компании NextGIS <https://data.nextgis.com/ru/?lvl=regions&country=RU> для перечисленных выше зон г. Новосибирска, которые позволили получить значение порога для выделения аномалий, близкое к  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [44].

Трехмодальные распределения, соответствующие Барнаулу, Новосибирску и Красноярску, позволяют выделить следующие классы подстилающей поверхности:

- 1) вода;
- 2) растительность;
- 3) строения и открытая почва;
- 4) промышленные зоны, железные и автодороги.

Первые три класса соответствуют трем модам распределения, а четвертый класс — это “хвост” распределения, отвечающий аномальным значениям температуры. Пример температурных зон для г. Новосибирска приведен на рис. 7. Отсутствие разделения на классы “Растительность” и “Жилая застройка, открытая почва” для Кемерово и Омска может говорить о наличии в зоне застройки достаточного количества

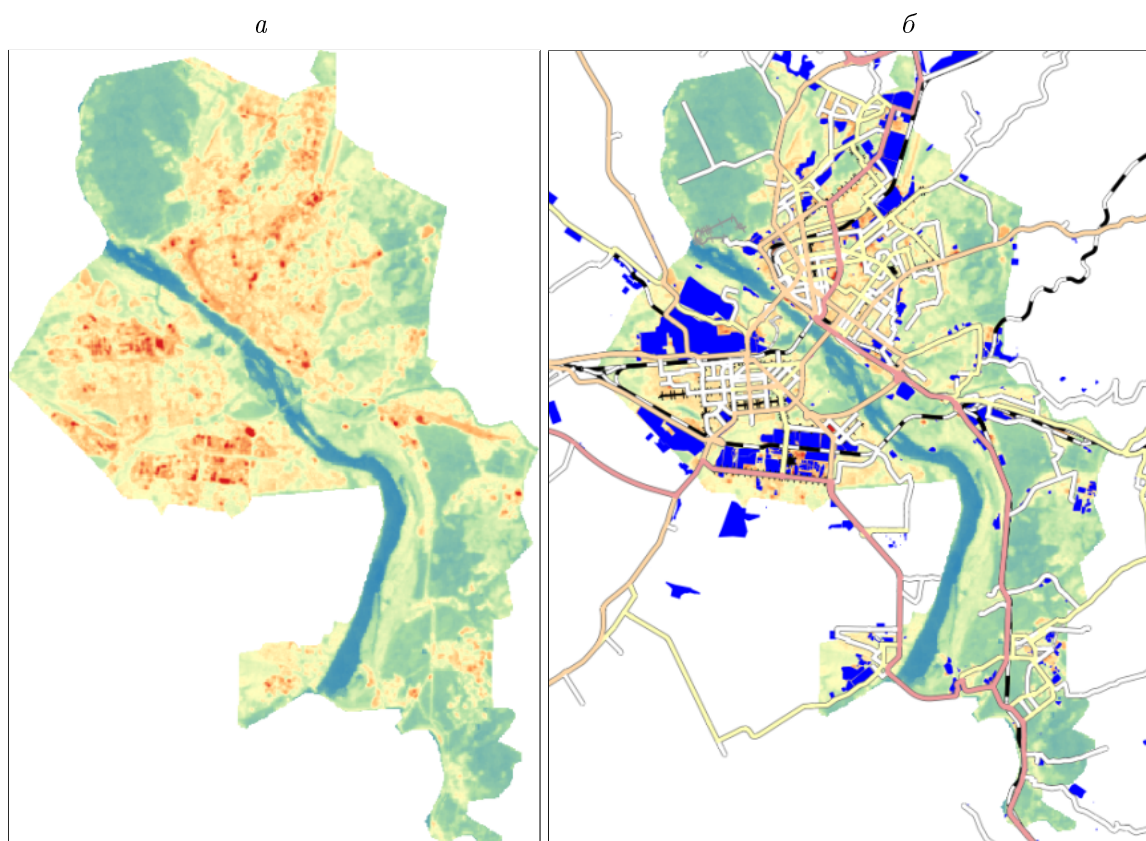


Рис. 6. Локализация областей максимальных температур на примере г. Новосибирска: *a* — исходная карта; *б* — карта с наложением тематических слоев “Промышленные зоны” и “Дорожная сеть” (авто- и железные дороги)

Fig. 6. Localization of maximum temperature areas by the example of Novosibirsk: *a* — original map; *б* — map with overlay of thematic layers “Industrial zones” and “Road network” (roads and railroads)

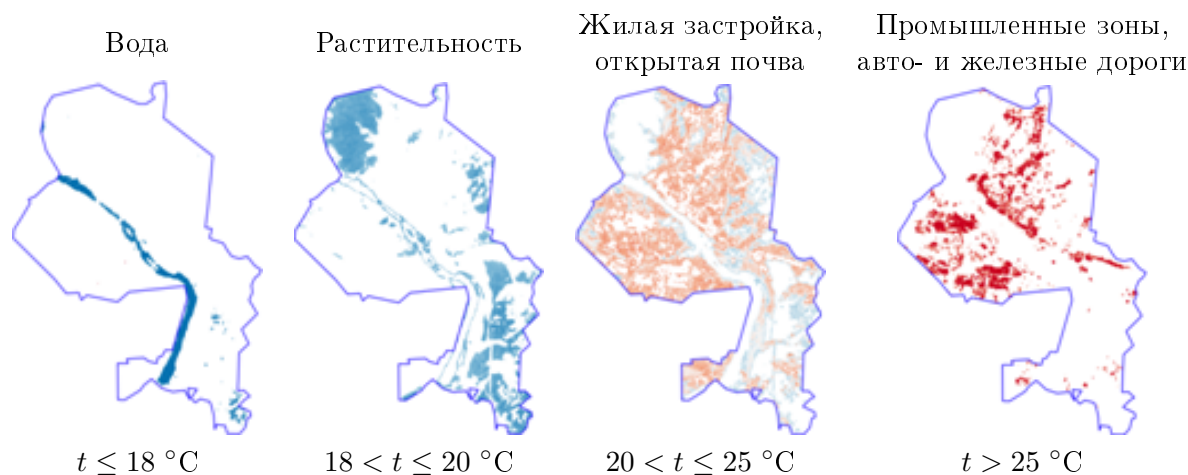


Рис. 7. Пример температурных зон для г. Новосибирска

Fig. 7. Example of temperature zones for Novosibirsk

зеленых насаждений, что подтверждается данными, представленными на сайте <https://ierarp.ru/samye-zelyonye-goroda-rossii>, где Кемерово представлен как один из наиболее “зеленых” городов России. Трехмодальность гистограмм для Барнаула, Новосибирска и Красноярска подтверждает тот факт, что основные площади зеленых насаждений в этих городах расположены вне застроенных жилых кварталов и промышленных зон.

## Выводы

Использование системы Google Earth Engine позволило построить температурные карты подстилающей поверхности крупных городов Сибири за бесснежный период 2013–2021 гг. по разновременным данным Landsat-8. Построенные карты дают возможность выявить области локализации аномально высоких температур, определить пороговые значения аномальных зон, выявить закономерности в распределении температурных полей, что, в свою очередь, может служить источником информации при оценке промышленного развития городов, степени урбанизации и экологического состояния территории.

Предложен подход для качественной оценки пространственной дифференциации зеленых зон городов, характеризующей уровень комфортности среды для проживания и досуга. Подход основан на анализе гистограмм, построенных по многолетним значениям LST Landsat-8. Анализ показал принципиальную возможность их использования для интегральной оценки показателей комфортности городской среды.

Для городов Сибири также подтверждено наличие сильной корреляции между LST Landsat и индексом застройки NDBI, что согласуется с результатами, полученными разными авторами для других городов. Кроме того, величина LST Landsat-8 может быть использована в качестве дополнительного информативного признака при классификации городских территорий.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы фундаментальных научных исследований ФИЦ ИВТ № FWNW-2021-0006 “Разработка и анализ информационных и вычислительных технологий в задачах мониторинга и создания цифровых двойников различных явлений и объектов” (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 122010800028-4).

## Список литературы

- [1] **Sannigrahi S., Bhatt S., Rahmata S., Uniyal B., Banerjee S., Chakraborti S., Jha S., Lahiri S., Santra K., Bhatt A.** Analyzing the role of biophysical compositions in minimizing urban land surface temperature and urban heating. *Urban Climate*. 2018; (24):803–819. DOI:10.1016/j.uclim.2017.10.002. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/320483430\\_Analyzing\\_the\\_role\\_of\\_biophysical\\_compositions\\_in\\_minimizing\\_urban\\_land\\_surface\\_temperature\\_and\\_urban\\_heating](https://www.researchgate.net/publication/320483430_Analyzing_the_role_of_biophysical_compositions_in_minimizing_urban_land_surface_temperature_and_urban_heating).
- [2] **Cook M., Schott J.R., Mandel J., Raqueno N.** Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive. *Remote Sensing*. 2014; (6):11244–11266. DOI:10.3390/rs61111244.
- [3] **Li Z., Tang B., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.** Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*. 2013; (131):14–37.
- [4] **Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.** Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*. 2004; 90(4):434–440. DOI:10.1016/J.RSE.2004.02.003. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425704000574?via%3Dihub>.
- [5] **Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Geöttsche F.M., Trigo I.F.** Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series. *Remote Sensing*. 2020; (12):1471.
- [6] **Nil L., Ullmann T., Kneisel C., Sobiech-Wolf J., Baumhauer R.** Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral indices in the Arctic Mackenzie delta region between 1985 and 2018. *Remote Sensing*. 2019; 11(19):2329. DOI:10.3390/rs11192329. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2329>.
- [7] **Wang M., Zhang Z., Hu T., Wang G., He G., Zhang Z., Li H., Wu Z., Liu X.** An efficient framework for producing Landsat-based land surface temperature data using Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020; (13):4689.
- [8] **Chakraborty T.C., Lee X., Ermida S., Zhan W.** On the land emissivity assumption and Landsat-derived surface urban heat islands: a global analysis. *Remote Sensing of Environment*. 2021; (265):112682.
- [9] **Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э.** Поиск изменений температуры городской среды по спутниковым данным на примере города Красноярска. Труды Всероссийской конференции “Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов” (SDM-2019). 2019: 387–392.
- [10] **Carlson T.N., Ripley D.A.** On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 1997; (62):241–252.
- [11] **Valor E., Caselles V.** Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*. 1996; (57):167–184.
- [12] **Van de Griend A.A., Owe M.** On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993; 14(6):1119–1131.
- [13] **Sekertekin A., Bonafoni S.** Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*. 2020; 12(2):294.

- [14] **Walawender J.P., Szymanowski M., Hajto M.J., Bokwa A.** Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. *Pure and Applied Geophysics*. 2014; (171):913–940.
- [15] **Mustafa E.K., Co Y., Liu G., Kaloop M.R., Beshr A.A., Zarzoura F., Sadek M.** Study for predicting land surface temperature (LST) using Landsat data: a comparison of four algorithms. *Advances in Civil Engineering*. 2020; (3):7363546. DOI:10.1155/2020/7363546 Available at: [https://www.researchgate.net/publication/339149597\\_Study\\_for\\_Predicting\\_Land\\_Surface\\_Temperature\\_LST\\_Using\\_Landsat\\_Data\\_A\\_Comparison\\_of\\_Four\\_Algorithms](https://www.researchgate.net/publication/339149597_Study_for_Predicting_Land_Surface_Temperature_LST_Using_Landsat_Data_A_Comparison_of_Four_Algorithms).
- [16] **Sobrino J.A., Oltra-Carrió R., Sòria G., Jiménez-Muñoz J.C., Julien Y., Cuenca J., Romaguera M.** Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 2013; (34):3177–3192.
- [17] **Fudala J., Nàdudvari À., Bronder J., Fudala M.** Application of satellite images analysis to assess the variability of the surface thermal heat island distribution in urban areas. *E3S Web of Conferences*. 2018; (28):01011. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/03/e3sconf\\_aptp2018\\_01011.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/03/e3sconf_aptp2018_01011.pdf).
- [18] **Twumasi Y.A., Merem E.C., Namwamba J.B., Mwakimi O.S., Ayala-Silva T., Frimpong D.B., Ning Z.H., Asare-Ansah A.B., Annan J.B., Oppong J., Loh P.M., Owusu F., Jeruto V., Petja B.M., Okwemba R., McClendon-Peralta J., Akinrinwoye C.O., Mosby H.J.** Estimation of land surface temperature from Landsat-8 OLI thermal infrared satellite data. A comparative analysis of two cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*. 2021; (10):131–149.
- [19] **Khallef B., Biskri Y., Mouchara N. Brahamia K.** Analysis of urban heat islands using Landsat 8 OLI/TIR data: case of the city of Guelma (Algeria). *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2020; 12(4):42–51.
- [20] **Soydan O.** Effects of landscape composition and patterns on land surface temperature: urban heat island case study for Nigde, Turkey. *Urban Climate*. 2020; (34):100688.
- [21] **Denga C., Zhu Z.** Continuous subpixel monitoring of urban impervious surface using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2020; (238):110929.
- [22] **Balew A., Korme T.** Monitoring land surface temperature in Bahir Dar city and its surrounding using Landsat images. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2020; (23):371–386.
- [23] **Matuzko A.K., Yakubailik O.E.** Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018; 11(8):934–945.
- [24] **Chena X., Zhanga Y.** Impacts of urban surface characteristics on spatiotemporal pattern of land surface temperature in Kunming of China. *Sustainable Cities and Society*. 2017; (32):87–99.
- [25] **Zhang Y., Odeh I.O.A., Han C.** Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a subpixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2009; 11(4):256–264. DOI:10.1016/j.jag.2009.03.001.
- [26] **Guha S., Govil H., Gill N., Dey A.** A long-term seasonal analysis on the relationship between LST and NDBI using Landsat data. *Quaternary International*. 2021; (575–576):249–258. DOI:10.1016/j.quaint.2020.06.041. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040618220303530?via%3Dihub>.

- [27] **Jamei Y., Rajagopalan P., Sun Q.C.** Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of the Total Environment*. 2019; (659):1335–1351.
- [28] **Sekertekin A., Zadbagher E.** Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological Indicators*. 2021; (122):107230.
- [29] **Son N.T., Chen C.F., Chen C.R.** Urban expansion and its impacts on local temperature in San Salvador, El Salvador. *Urban Climate*. 2020; (32):100617. DOI:10.1016/j.uclim.2020.100617.
- [30] **Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y.** Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: a case study in Skopje, Macedonia. *MDPI Proceedings*. 2018; 2(7):358. DOI:10.3390/ecrs2-05171.
- [31] **Taoufik M., Laghlimi M., Fekri A.** Comparison of land surface temperature before, during and after the Covid 19 lockdown using Landsat imagery: a case study of Casablanca city, Morocco. *Geomatics and Environmental Engineering*. 2021; 15(2):105–120.
- [32] **Baldina E.A., Grishchenko M.Y.** Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images. *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*. 2014; 3(2S):415–418.
- [33] **Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A.** Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015; 11(4):329–337.
- [34] **Грищенко М.Ю., Варенцов М.И., Михайлюкова П.Г.** Анализ острова тепла Москвы с использованием космических снимков разного пространственного разрешения и результатов климатического моделирования. Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VI Международной научной конференции. Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. Красноярск: СФУ; 2019: 217–219.
- [35] **Varentsov M.I., Grishchenko M.Yu., Wouters H.** Simultaneous assessment of the summer urban heat island in moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019; 12(4):74–95. DOI:10.24057/2071-9388-2019-10.
- [36] **Грищенко М.Ю., Ермилова Ю.В.** Картографирование застройки крупнейших городов российского Заполярья по космическим снимкам разных спектральных диапазонов. *Геодезия и картография*. 2018; 79(3):23–34.
- [37] **Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А.** Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016; 13(3):9–27.
- [38] **Klimanova O.A., Illarionova O.I.** Green infrastructure indicators for urban planning: applying the integrated approach for Russian largest cities. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020; 13(1):251–259. DOI:10.24057/2071-9388-2019-123.
- [39] **Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А.** Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2018; 63(2):127–146. DOI:10.21638/11701/spbu07.2018.201. Адрес доступа: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/1123>.
- [40] **Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M.** Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sensing*. 2017; (9):1208.

- [41] **Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J.** Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014; (11):1840–1843.
- [42] **Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Member A.** Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008; 46(2):316–327. DOI:10.1109/TGRS.2007.904834. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2219077>.
- [43] **Al-Hattab M., Amany S.M., Lamyaa Gamal El-deen Taha.** Monitoring and assessment of urban heat islands over the Southern region of Cairo Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2018; 21(3):311–323. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/320211208\\_Monitoring\\_and\\_Assessment\\_of\\_Urban\\_Heat\\_Islands\\_over\\_the\\_Southern\\_Region\\_of\\_Cairo\\_Governorate\\_Egypt](https://www.researchgate.net/publication/320211208_Monitoring_and_Assessment_of_Urban_Heat_Islands_over_the_Southern_Region_of_Cairo_Governorate_Egypt).
- [44] **Mamash E.A., Pestunov I.A., Chubarov D.L.** Spatiotemporal analysis of the land surface temperature distribution over the territory of Novosibirsk city based on Landsat data. *E3S Web of Conferences*. 2020; (223):03011.

## **Analysis of patterns in the distribution of the temperature fields for large industrial cities of Siberia according to Landsat-8 data**

MAMASH ELENA A.\*, PESTUNOV IGOR A., SINYAVSKIY YURIY N.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia

\*Corresponding author: Mamash Elena A., e-mail: [elenamamash@gmail.com](mailto:elenamamash@gmail.com)

*Received May 16, 2022, accepted May 23, 2022.*

### **Abstract**

Currently, one of the most rapidly developing and popular directions in remote sensing data processing and application is the analysis of longwave infrared (8–15  $\mu\text{m}$ ) data. These data are widely used to analyze the underlying surface temperature (LST) for both natural and urban areas. Analysis of temperature fields of large cities allows identifying the thermal anomalies, its sources, intensity and character of distribution, defining the boundaries of surface urban heat island, and revealing patterns in temperature distribution within the city territory. It is important for rational planning and development of urban infrastructure, prevention and resolving of environmental problems, and creating a comfortable area for living.

This paper addresses the estimation and analysis of the temperature field of the territories of major industrial Siberian cities by satellite data. The temperature maps of urban areas of Barnaul, Kemerovo, Krasnoyarsk, Novosibirsk, and Omsk for the snow-free period of 2013–2021 were constructed from Landsat-8 multitemporal data with Google Earth Engine system. The resulting maps allow us to identify patterns in the distribution of temperature fields, which, in turn, could provide information for evaluating the industrial development of cities, the degree of urbanization and the ecological state of the territory. An approach to qualitative assessment of the spatial differentiation of urban green areas, characterizing the level of comfort of the living and recreation

environment, based on the analysis of histograms constructed by multi-year Landsat-8 LST data, is proposed.

The analysis of constructed histograms showed the fundamental opportunity of its use for the integral evaluation of the urban environment comfort indices. For Siberian cities, the strong correlation between the Landsat-8 LST and the NDBI building index is also confirmed, which agrees with the results of different authors for other cities. In addition, the value of Landsat-8 LST data can be used as an additional informative feature for the classification of urban areas.

*Keywords:* underlying surface temperature, LST, Landsat-8, heat island, Google Earth Engine, major Siberian cities.

*Citation:* Mamash E.A., Pestunov I.A., Sinyavskiy Yu.N. Analysis of patterns in the distribution of the temperature fields for large industrial cities of Siberia according to Landsat-8 data. Computational Technologies. 2022; 27(3):95–111. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.008. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the FRC ICT Basic Research Theme No. FWNW-2021-0006 “Development and analysis of information and computational technologies in the tasks of monitoring and creating digital twins of various phenomena and objects” (registration No. 122010800028-4).

#### References

1. **Sannigrahi S., Bhatt S., Rahmata S., Uniyal B., Banerjee S., Chakraborti S., Jha S., Lahiri S., Santra K., Bhatt A.** Analyzing the role of biophysical compositions in minimizing urban land surface temperature and urban heating. *Urban Climate*. 2018; (24):803–819. DOI:10.1016/j.uclim.2017.10.002. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/320483430\\_Analyzing\\_the\\_role\\_of\\_biophysical\\_compositions\\_in\\_minimizing\\_urban\\_land\\_surface\\_temperature\\_and\\_urban\\_heating](https://www.researchgate.net/publication/320483430_Analyzing_the_role_of_biophysical_compositions_in_minimizing_urban_land_surface_temperature_and_urban_heating).
2. **Cook M., Schott J.R., Mandel J., Raqueno N.** Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive. *Remote Sensing*. 2014; (6):11244–11266. DOI:10.3390/rs6111244.
3. **Li Z., Tang B., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.** Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*. 2013; (131):14–37.
4. **Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.** Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*. 2004; 90(4):434–440. DOI:10.1016/J.RSE.2004.02.003. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425704000574?via%3Dihub>.
5. **Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Geöttsche F.M., Trigo I.F.** Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series. *Remote Sensing*. 2020; (12):1471.
6. **Nill L., Ullmann T., Kneisel C., Sobiech-Wolf J., Baumhauer R.** Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral indices in the Arctic Mackenzie delta region between 1985 and 2018. *Remote Sensing*. 2019; 11(19):2329. DOI:10.3390/rs11192329. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2329>.
7. **Wang M., Zhang Z., Hu T., Wang G., He G., Zhang Z., Li H., Wu Z., Liu X.** An efficient framework for producing Landsat-based land surface temperature data using Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020; (13):4689.
8. **Chakraborty T.C., Lee X., Ermida S., Zhan W.** On the land emissivity assumption and Landsat-derived surface urban heat islands: a global analysis. *Remote Sensing of Environment*. 2021; (265):112682.
9. **Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E.** Search of changes in the temperature of urban environment with use of satellite data on the example of the Krasnoyarsk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020; (2534):401–405. Available at: [http://ceur-ws.org/Vol-2534/68\\_short\\_paper.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2534/68_short_paper.pdf).

10. **Carlson T.N., Ripley D.A.** On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 1997; (62):241–252.
11. **Valor E., Caselles V.** Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*. 1996; (57):167–184.
12. **Van de Griend A.A., Owe M.** On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993; 14(6):1119–1131.
13. **Sekertekin A., Bonafoni S.** Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*. 2020; 12(2):294.
14. **Walawender J.P., Szymanowski M., Hajto M.J., Bokwa A.** Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. *Pure and Applied Geophysics*. 2014; (171):913–940.
15. **Mustafa E.K., Co Y., Liu G., Kaloop M.R., Beshr A.A., Zarzoura F., Sadek M.** Study for predicting land surface temperature (LST) using Landsat data: a comparison of four algorithms. *Advances in Civil Engineering*. 2020; (3):7363546. DOI:10.1155/2020/7363546 Available at: [https://www.researchgate.net/publication/339149597\\_Study\\_for\\_Predicting\\_Land\\_Surface\\_Temperature\\_LST\\_Using\\_Landsat\\_Data\\_A\\_Comparison\\_of\\_Four\\_Algorithms](https://www.researchgate.net/publication/339149597_Study_for_Predicting_Land_Surface_Temperature_LST_Using_Landsat_Data_A_Comparison_of_Four_Algorithms).
16. **Sobrino J.A., Ultra-Carrió R., Sòria G., Jiménez-Muñoz J.C., Julien Y., Cuenca J., Romaguera M.** Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 2013; (34):3177–3192.
17. **Fudala J., Nàdudvari À., Bronder J., Fudala M.** Application of satellite images analysis to assess the variability of the surface thermal heat island distribution in urban areas. *E3S Web of Conferences*. 2018; (28):01011. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/03/e3sconf\\_aptp2018\\_01011.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/03/e3sconf_aptp2018_01011.pdf).
18. **Twumasi Y.A., Merem E.C., Namwamba J.B., Mwakimi O.S., Ayala-Silva T., Frimpong D.B., Ning Z.H., Asare-Ansah A.B., Annan J.B., Oppong J., Loh P.M., Owusu F., Jeruto V., Petja B.M., Okwemba R., McClendon-Peralta J., Akinrinwoye C.O., Mosby H.J.** Estimation of land surface temperature from Landsat-8 OLI thermal infrared satellite data. A comparative analysis of two cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*. 2021; (10):131–149.
19. **Khallef B., Biskri Y., Mouchara N., Brahamia K.** Analysis of urban heat islands using Landsat 8 OLI/TIR data: case of the city of Guelma (Algeria). *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2020; 12(4):42–51.
20. **Soydan O.** Effects of landscape composition and patterns on land surface temperature: urban heat island case study for Nigde, Turkey. *Urban Climate*. 2020; (34):100688.
21. **Denga C., Zhu Z.** Continuous subpixel monitoring of urban impervious surface using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2020; (238):110929.
22. **Balew A., Korme T.** Monitoring land surface temperature in Bahir Dar city and its surrounding using Landsat images. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2020; (23):371–386.
23. **Matuzko A.K., Yakubailik O.E.** Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018; 11(8):934–945.
24. **Chena X., Zhanga Y.** Impacts of urban surface characteristics on spatiotemporal pattern of land surface temperature in Kunming of China. *Sustainable Cities and Society*. 2017; (32):87–99.
25. **Zhang Y., Odeh I.O.A., Han C.** Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a subpixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2009; 11(4):256–264. DOI:10.1016/j.jag.2009.03.001.
26. **Guha S., Govil H., Gill N., Dey A.** A long-term seasonal analysis on the relationship between LST and NDBI using Landsat data. *Quaternary International*. 2021; (575–576):249–258. DOI:10.1016/j.quaint.2020.06.041. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040618220303530?via%3Dihub>.
27. **Jamei Y., Rajagopalan P., Sun Q.C.** Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of the Total Environment*. 2019; (659):1335–1351.



28. **Sekertekin A., Zadbagher E.** Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological Indicators*. 2021; (122):107230.
29. **Son N.T., Chen C.F., Chen C.R.** Urban expansion and its impacts on local temperature in San Salvador, El Salvador. *Urban Climate*. 2020; (32):100617. DOI:10.1016/j.uclim.2020.100617.
30. **Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y.** Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: a case study in Skopje, Macedonia. *MDPI Proceedings*. 2018; 2(7):358. DOI:10.3390/ecrs2-05171.
31. **Taoufik M., Laghlimi M., Fekri A.** Comparison of land surface temperature before, during and after the Covid 19 lockdown using Landsat imagery: a case study of Casablanca city, Morocco. *Geomatics and Environmental Engineering*. 2021; 15(2):105–120.
32. **Baldina E.A., Grishchenko M.Y.** Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images. *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*. 2014; 3(2S):415–418.
33. **Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A.** Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015; 11(4):329–337.
34. **Grishchenko M.Yu., Varentsov M.I., Mikhailyukova P.G.** Analysis of the heat island of Moscow using space images of different spatial resolution and climate modeling results. *Regional Problems of Remote Sensing of the Earth: Materials of the VI International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, September 10–13, 2019. Krasnoyarsk: SibFU; 2019: 217–219. (In Russ.)
35. **Varentsov M.I., Grishchenko M.Yu., Wouters H.** Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019; 12(4):74–95. DOI:10.24057/2071-9388-2019-10.
36. **Grishchenko M.Yu., Ermilova Yu.V.** Mapping of the built-up areas of Russian Arctic biggest cities using satellite imagery of various spatial resolution. *Geodesy and Cartography*. 2018; 79(3):23–34. (In Russ.)
37. **Proshin A.A., Loupian E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V., Bourtsev M.A.** Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016; 13(3):9–27. (In Russ.)
38. **Klimanova O.A., Illarionova O.I.** Green infrastructure indicators for urban planning: applying the integrated approach for Russian largest cities. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020; 13(1):251–259. DOI:10.24057/2071-9388-2019-123.
39. **Klimanova O.A., Kolbowskiy E.Yu., Illarionova O.A.** The ecological framework of Russian major cities: spatial structure, territorial planning and main problems of development. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2018; 63(2):127–146. DOI:10.21638/11701/spbu07.2018.201. Available at: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/1123>. (In Russ.)
40. **Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M.** Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sensing*. 2017; (9):1208.
41. **Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J.** Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014; (11):1840–1843.
42. **Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Member A.** Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008; 46(2):316–327. DOI:10.1109/TGRS.2007.904834. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2219077>.
43. **Al-Hattab M., Amany S.M., Lamyaa Gamal El-deen Taha.** Monitoring and assessment of urban heat islands over the Southern region of Cairo Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2018; 21(3):311–323. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/320211208\\_Monitoring\\_and\\_Assessment\\_of\\_Urban\\_Heat\\_Islands\\_over\\_the\\_Southern\\_Region\\_of\\_Cairo\\_Governorate\\_Egypt](https://www.researchgate.net/publication/320211208_Monitoring_and_Assessment_of_Urban_Heat_Islands_over_the_Southern_Region_of_Cairo_Governorate_Egypt).
44. **Mamash E.A., Pestunov I.A., Chubarov D.L.** Spatiotemporal analysis of the land surface temperature distribution over the territory of Novosibirsk city based on Landsat data. *E3S Web of Conferences*. 2020; (223):03011.