

Научная статья

УДК 551.584.2:551.501.86

doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98

ОЦЕНКА ЛЕТНЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА ГОРОДА НОВОСИБИРСК ПО ДАННЫМ LANDSAT 8

Тимур Фаискабирович Газимов^{1✉}, Ирина Валерьевна Кужевская²

^{1, 2}Томский государственный национальный исследовательский университет, г.Томск, Россия

¹tf.gazimov@gmail.com✉

²ivk@ggf.tsu.ru

Аннотация. Городской остров тепла представляет собой явление, при котором температура внутри города выше в сравнении с его пригородными районами. Формирование городского острова тепла негативно отражается на здоровье городских жителей и экологической ситуации в городе. В рамках данного исследования была проведена оценка интенсивности поверхностного городского острова тепла в г. Новосибирск в летний период с 2018 по 2020 г. при помощи двух категорий показателей, основанных либо исключительно на отличиях в температуре, либо на данных о типе подстилающей поверхности. Для получения информации о поверхностной температуре привлекались данные космического аппарата Landsat 8. В соответствии с выбранной методикой для расчетов температуры поверхности земли были использованы каналы 4, 5 и 10. Обязательным условием отбора спутниковых данных являлось отсутствие облачности над районом исследования. В работе было выбрано девять буферов с диаметром 1 км вокруг точек наземных метеорологических наблюдений на сети станций Росгидромет. Полученные результаты свидетельствуют о наличии устойчивого острова тепла в г. Новосибирск в период исследования. Максимальное значение среди всех показателей интенсивности поверхностного острова тепла составило 23,0°C для показателя диапазона. Также для нескольких случаев получены отрицательные значения интенсивности (до -1,6 °C), связанные с большим, относительно городских поверхностей, нагревом пахотных земель. Сделан вывод о том, что значения интенсивности поверхностного городского острова тепла зависят от выбора подхода его расчета.

Ключевые слова: городской остров тепла, поверхностный городской остров тепла, температура поверхности земли, дистанционное зондирование Земли, Landsat 8, климат города, тип подстилающей поверхности

Для цитирования: Газимов Т.Ф., Кужевская И.В. Оценка летнего поверхностного городского острова тепла города Новосибирск по данным Landsat 8 // Географический вестник = Geographical Bulletin. 2021. №4(59). С. 84–98. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98.

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98

ESTIMATION OF SUMMER SURFACE URBAN HEAT ISLAND OF NOVOSIBIRSK FROM LANDSAT 8 SATELLITE IMAGES

Timur F. Gazimov^{1✉}, Irina V. Kuzhevskaya²

^{1, 2}National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹tf.gazimov@gmail.com✉

²ivk@ggf.tsu.ru

© Газимов Т.Ф., Кужевская И.В., 2021



Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

Abstract. An urban heat island is a phenomenon which occurs when the temperature in urban areas is higher than that in their rural surroundings. The formation of an urban heat island has a negative impact on the health of urban dwellers and the ecology of the city. We assessed the intensity of the surface urban heat island (UHI_{surf}) in the city of Novosibirsk during the summer period from 2018 to 2020 using two categories of indicators – those based solely on differences in temperature (UHI-driven) and those including land cover type data (land-cover-driven). Data from the Landsat 8 were used to obtain information on land surface temperature. In accordance with the chosen methodology, bands 4, 5 and 10 were taken to calculate the land surface temperature. A prerequisite for satellite data selection was the absence of cloud cover over the study area. In this paper, nine buffers with a diameter of 1 km were selected, each around ground-based meteorological observation points at the Roshydromet network of stations. The results obtained indicate the presence of a stable surface urban heat island in Novosibirsk during the study period. The maximum value among all surface urban heat island intensity indicators was $23,0^{\circ}\text{C}$ for the range indicator. Negative intensity values (up to $-1,6^{\circ}\text{C}$) were also obtained for several cases, which is associated with a larger heating of croplands relative to urban surfaces. It is concluded that UHI_{surf} intensity values depend on the choice of the calculation approach.

Keywords: urban heat island, surface urban heat island, land surface temperature, remote sensing, Landsat 8, urban climate, land cover

For citation: Gazimov, T.F., Kuzhevskaya, I.V. (2021). Estimation of summer surface urban heat island of Novosibirsk from Landsat 8 satellite images. *Geographical Bulletin*. No. 4(59). Pp. 84–98. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98.

Введение

В связи с растущей урбанизацией растет и доля антропогенного влияния на климат городов. Наиболее явным эффектом модификации городского климата является городской остров тепла (urban heat island – УИ). Эффект УИ заключается в формировании тепловой аномалии внутри городской агломерации в сравнении с окружающими её внегородскими территориями [19].

Первым на существование острова тепла обратил внимание британский химик Люк Говард в 1833 г., указав на разницу между температурой в центре Лондона и его окрестностях [13]. С тех пор интерес к изучению климата городов и городского острова тепла многократно вырос.

Актуальность изучения проблемы УИ возрастает вместе с ростом числа городских жителей, на которых возникающие тепловые аномалии внутри города оказывают наибольшее влияние. По данным Фонда Организации Объединенных Наций в области народонаселения [17], начиная с 2008 г. впервые в истории более половины населения Земли проживало в городах. Согласно последней оценке, приведенной в докладе ООН от 2020 г., ожидается, что, несмотря на последствия пандемии Covid-19, тенденция к увеличению числа городского населения сохранится и в течение следующего десятилетия: в мире произойдет дальнейшая урбанизация: от 56,2% по состоянию на сегодняшний день и до 60,4% к 2030 г. [28].

Стоит отметить, что возникновение острова тепла присуще не только крупным населенным пунктам, но и сравнительно небольшим поселениям с населением менее 10 тыс. чел. и даже менее 1 тыс. чел. [30].

Эффект от формирования острова тепла в городе, как правило, связывают с негативными последствиями, которые оказывают значительное влияние на качество жизни городских жителей, а также на окружающую среду. Негативное влияние выражается не только в росте потребления энергии, изменении ареалов патогенных микроорганизмов и вредителей, увеличении количества выпадающих осадков, но и в росте случаев смертности [19; 30].

Рост летальных случаев вследствие экстремально высоких температур среди городских жителей является существенной проблемой. По данным [31], смертность во всем мире, связанная с жарой, выросла на 0,21% за период с 2000 по 2019 г. По оценке, проведенной

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

в работе [12], выявлено, что на долю городского острова тепла приходилось около 50% общей смертности, связанной с жарой, во время волны тепла 2003 г. в Уэст-Мидлендсе, Великобритания. Волны тепла в совокупности с УИ особенно представляют угрозу для жителей городов, вызывая дополнительные тепловые нагрузки. Согласно [24] в Лондоне жертвами жаркой погоды, вызванной волной тепла, стало 274 чел.

В качестве положительного эффекта от УИ можно выделить сокращение расхода энергии в холодные сезоны года, однако не все так однозначно. Указанный эффект вызывает дополнительные расходы при кондиционировании воздуха, в результате сводя на нет выгоды от экономии во время отопительного сезона [4]. При этом в работе [3] авторы указывают на то, что в России энергозатраты на кондиционирование остаются по-прежнему ниже на один-два порядка расходов энергии на отопление, несмотря на увеличение энергозатрат на кондиционирование и уменьшения на отопление.

Традиционно для выявления наличия УИ используются данные о температуре воздуха с метеостанций [25]. Существенным ограничением при использовании данных наземной сети наблюдений является недостаточная плотность пунктов наблюдений, поэтому целесообразно использовать дополнительные источники информации о температуре. В качестве такой информации могут выступать данные о температуре поверхности земли (land surface temperature – LST), получаемые со спутников в каналах теплового инфракрасного диапазона. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) способны предоставлять единовременно информацию о тепловом излучении поверхности земли с большим пространственным охватом, что является полезным при изучении городского острова тепла, а также преимуществом в сравнении с наземными наблюдениями [19].

При наличии предпочтительнее использовать оба типа данных, так как в этом случае предоставляется возможность получить более полную картину об эффекте УИ [25; 27].

Подчеркнем, что в зависимости от исследуемого слоя и типа используемых данных зависит и тип описываемого городского острова тепла. Согласно [19] можно выделить следующие типы городского теплового острова: подповерхностный УИ (Subsurface UHI – UHI_{Sub}), поверхностный УИ (Surface UHI – UHI_{Surf}), УИ городского полога (Urban Canopy Layer – UHI_{UCL}) и УИ городского пограничного слоя (Urban Boundary Layer – UHI_{UBL}) [19].

Следует отметить, что как такового устоявшегося термина «острова тепла городского полога» в русскоязычной литературе авторами данной статьи обнаружено не было, поэтому приводится буквальный перевод.

Подытожив, скажем, что проблема городского острова тепла является актуальной и представляет интерес для исследований. Однако, несмотря на кажущуюся общую изученность данного явления, по-прежнему имеются территории, которые остаются «белыми пятнами», в том числе и крупные города России. Среди таких городов выделяется Новосибирск, который является третьим по численности населения по России и крупнейшим городом за Уралом. В Сибирском федеральном округе сопоставимых по численности населения (более 1 млн чел.) с Новосибирском всего два: Омск и Красноярск [8].

На момент написания работы были найдены исследования городского острова тепла только по Красноярску [2]. При этом Омск является более предпочтительным городом в целях возможного сравнения интенсивности УИ, так как имеет схожий климат, рельеф и ландшафт с Новосибирском.

В настоящей статье, используя данные космического аппарата (КА) Landsat 8, были проведены расчет температуры поверхности земли и последующая оценка интенсивности поверхностного городского острова тепла в летние месяцы за период с 2018 по 2020 г. Для оценки были использованы показатели, основанные на разностях температуры поверхности и типе подстилающей поверхности.

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

Материалы и методы Район исследования

Город Новосибирск (55°01' с.ш. 82°55' в.д.) является административным центром Новосибирской области и Сибирского федерального округа, население составляет 1,6 млн чел., опережая такие города, как Екатеринбург и Казань [8].

Площадь города составляет 502 км², в то время как площадь Новосибирской агломерации (Новосибирск, Бердск, Искитим, Обь, р.п. Краснообск и р.п. Кольцово) составляет около 700 км² [1; 7].

Новосибирск – крупный мегаполис, для которого характерен постоянный рост его территории. Если в 1938 г. эта площадь составляла 35 тыс. га, то в связи со строительством Сибирского научного центра в 1959 г. она увеличилась до 47 тыс. га и достигла 62,7 тыс. га в 2007 г. По отношению к общей территории города на площадь зеленых насаждений приходится 25%, на антропогенные ландшафты (жилая застройка, промышленность, автомобильная сеть и т.д.) ~40% [5].

Новосибирск расположен по обе стороны р. Оби в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины. Левый берег представляет собой район с относительно плоским и ровным рельефом. Максимальная высота левобережья составляет 151 м. Правобережная часть города представляет собой территорию с множеством балок и оврагов, относящихся к периферийной части Салаирского кряжа, а также сильно изрезана долинами рек Обь, Иня и их притоками. Максимально высокое место правого берега составляет 214 м [5].

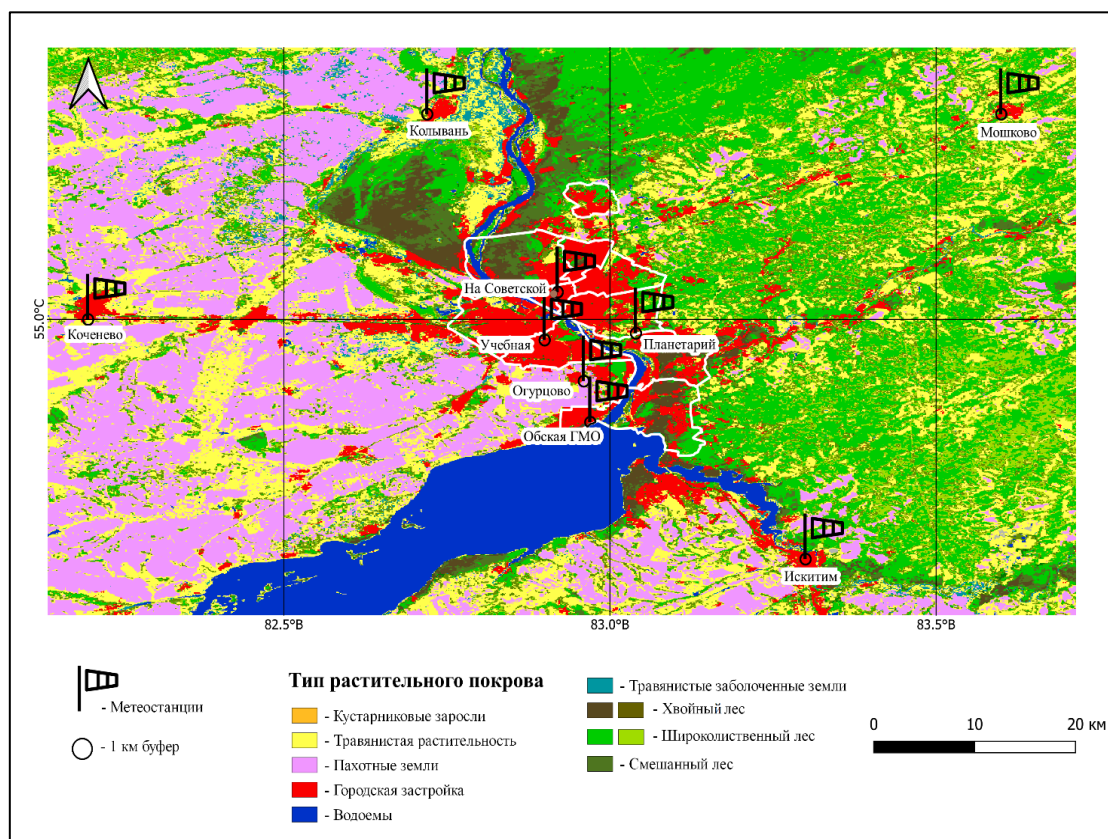


Рис. 1. Расположение метеорологических станций и тип подстилающей поверхности [15]

Fig. 1. Land cover map and location of weather stations [15]

Согласно классификации климатов Кёппена Новосибирск соответствует типу «Dfb» – влажный континентальный климат с тёплым летом [29]. По данным за период 1966–2013 гг., средняя годовая температура воздуха в Новосибирске составляет 1,3°C.

*Метеорология**Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.*

Самым теплым месяцем является июль со среднемесячной температурой 19,3°C (июнь – 17,1°C; август – 16,2°C). Абсолютный максимум зафиксирован в июне 1967 г. и составил 36,6°C [5].

На территории Новосибирска и его окрестностях три метеостанции сети Росгидромета (Учебная, Обская ГМО и Огурцово) проводят наблюдения, а также две автоматические метеорологические станции («На Советской» и «Планетарий»), передающие данные о температуре воздуха. На удалении от города 30–50 км действуют 4 метеорологические станции сети Росгидромета: Колывань, Мошково, Коченево, Искитим. Подобное количество метеостанций выделяет Новосибирск на фоне остальных городов Западной Сибири, где, как правило, число метеостанций в совокупности не превышает четырех. Расположение пунктов наблюдений, а также тип подстилающей поверхности в районе исследования представлены на рис. 1.

Данные дистанционного зондирования

Для расчета температуры подстилающей поверхности применяются данные сенсоров, регистрирующие излучение в каналах термального инфракрасного диапазона (10–15 мкм) в совокупности с ближним инфракрасным и красным каналами (~0,86 мкм, ~0,65 мкм).

Для получения информации о тепловом излучении поверхности многими исследователями [10; 11; 14; 20] используются данные инструмента TIRS (Thermal InfraRed Sensor), установленного на КА Landsat 8. Инструмент предназначен для получения изображений в тепловом инфракрасном диапазоне (10, 11 каналы). Landsat 8 TIRS обладает высоким пространственным разрешением с размером пикселя 100 м, что является преимуществом при изучении тепловых характеристик города.

Согласно рекомендациям геологической службы США (United States Geological Survey – USGS) в работе был использован 10-й канал (10,6–11,9 мкм) вследствие возникающих помех в данных TIRS, которые более значительны в 11-м канале (11,50–12,51 мкм) [9; 10].

Отражающая способность земной поверхности, необходимая для расчета LST, рассчитана на основе вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный относительный индекс растительности), используя ближний инфракрасный канал 5 (0,85–0,88 мкм) и красный канал 4 (0,64–0,67 мкм), получаемые при помощи инструмента OLI (Operational Land Imager) с пространственным разрешением в 30 м, установленного также на спутнике Landsat 8 [16].

Данные КА Landsat 8 доступны в свободном доступе на интернет-ресурсе USGS [26]. Обязательным критерием для выбора спутникового изображения является либо минимальное количество облачности, либо её полное отсутствие над исследуемой территорией. Определенные ограничения также обусловлены периодичностью съёмки, что отражается на количестве доступных данных над исследуемой территорией.

Так, в случае, если один пролет спутника не охватывал территорию исследования полностью, то использовался также и следующий его пролет для получения единого изображения. Таким образом, всего в работе были использованы данные 13 дней за период с 2018 по 2020 г. в летние месяцы. В дальнейшем было составлено 9 изображений температуры поверхности, из которых четыре (10–12 июля 2018 г., 13–15 и 29–31 июля 2019 г., 15–17 июля 2020 г.) были получены путем объединения информации с двух последовательных пролетов, в которые наблюдалась схожая синоптическая ситуация.

Время съёмки района исследования для всех дней приходилось на полуденные часы по местному времени (05:20–05:40 UTC).

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

Расчет температуры поверхности земли по данным спутника Landsat 8

В работе был использован алгоритм получения температуры поверхности земли из тепловых каналов спутника Landsat, описанный в работе [9]. Для автоматизации расчетов температуры поверхности земли вычисления производились с помощью авторского кода на языке программирования Python. Ниже представлены формулы, необходимые для расчета LST:

$$L_{\lambda} = 0,0003342 \cdot DN_{Band_{10}} + 0,1 - 0,29, \quad (1)$$

где L_{λ} – спектральная энергетическая яркость ($Вт/(м^2 \cdot ср \cdot мм)$), DN – значения яркости пикселя 10 канала:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln((K_1/L_{\lambda}) + 1)} - 273,15, \quad (2)$$

где T_B – яркостная температура ($^{\circ}C$), L_{λ} – спектральная энергетическая яркость ($Вт/(м^2 \cdot ср \cdot мм)$), K_1 и K_2 – калибровочные константы. В нашем случае K_1 и K_2 равны 774,89 и 1321,08 соответственно.

Далее необходимо получить индекс NDVI, который может рассчитан с помощью значения ближнего инфракрасного ($NIR_{Band\ 5}$) и красного ($Red_{Band\ 4}$) каналов согласно следующему соотношению:

$$NDVI = \frac{NIR_{Band\ 5} - Red_{Band\ 4}}{NIR_{Band\ 5} + Red_{Band\ 4}}. \quad (3)$$

Вегетационный индекс необходим для расчета параметра P_v , характеризующего долю растительности в каждом пикселе:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2, \quad (4)$$

где $NDVI_S$ – значение NDVI, соответствующее почве, лишенной растительности (0,2), $NDVI_V$ – значение NDVI, соответствующее здоровой растительности (0,5).

Далее вычисляется излучательная способность земной поверхности ε по следующей формуле, приведенной в [23]:

$$\varepsilon = 0,004 \cdot P_v + 0,986. \quad (5)$$

Наконец, LST может быть получено с помощью следующего выражения:

$$LST = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / p) \cdot \ln \varepsilon}, \quad (6)$$

где λ – эффективная длина волны (10,9 мкм для 10-го канала Landsat 8), ε – отражающая способность земной поверхности, p рассчитывается по следующей формуле:

$$p = h \frac{c}{\sigma} = 14388 \text{ мК}, \quad (7)$$

где σ – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), h – постоянная Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), c – скорость света в вакууме ($2,998 \cdot 10^8$ м/с),

Оценка интенсивности городского острова тепла

В качестве простого количественного показателя степени теплового воздействия города на изучаемую территорию и для отражения величины тепловой аномалии может выступать оценка интенсивности УИ, которая может быть определена по следующей формуле:

$$UHI = \Delta T_{U-R} = T_U - T_R, \quad (8)$$

где T_U – максимальная температура внутри города, T_R – репрезентативная температура вне города.

Таким образом, интенсивность УИ определяется как разность температур между городом и окружающей его внегородской территорией [18; 19]. Однако существует неопределенность, связанная с выбором репрезентативных точек, характеризующих температуру города и пригорода.

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

В связи с этим существуют различные показатели, с помощью которых можно оценить интенсивность острова тепла. Обзор этих показателей и их конкретных формул расчета можно найти в работе [21]. В данной работе было использовано 4 показателя из предложенных для оценки интенсивности поверхностного острова тепла, которые также были приведены в работе [22].

Всего, согласно [21], оценка интенсивности УИИ основывается на двух подходах:

1. Простой подход (UHI-driven), при котором оценивается только распределение температур поверхности в районе исследования. По умолчанию, за городские районы принимаются те территории, где наблюдаются более высокие температуры и, как следствие, проявляется эффект УИИ, в то время как внегородские районы демонстрируют более низкие температуры в сравнении с городом, и эффект УИИ не проявляется. Затем, согласно одной из методик, оценивается разность поверхностных температур;

2. Подход (Land-cover-driven), при котором городские и внегородские территории определяются на основе данных о типе подстилающей поверхности, после чего для них вычисляются разности температур поверхности. Городским территориям соответствуют в основном застроенные поверхности, внегородским – естественные или сельскохозяйственные.

Данные о типе подстилающей поверхности (Land Cover – LC) были получены с помощью глобальной карты растительного покрова за 2019 г., составленной в рамках глобальной международной программы «Copernicus»[15].

Ниже представлена таблица, где указана методика расчета. Расчеты производились в геоинформационной системе QGIS 3.16.11.

Таблица 1

Типология показателей УИИ, использованных в работе
Typology of UHI indicators used in the study

| <i>Категория</i> | <i>Показатель</i> | <i>Формула расчета</i> | <i>Применение в работе</i> |
|-------------------|-----------------------------------|--|---|
| UHI-driven | Величина | $LST_{\text{макс}} - LST_{\text{сред}}$ | Используются пиксели внутри 9 буферов |
| | Диапазон | $LST_{\text{макс}} - LST_{\text{мин}}$ | |
| Land-cover-driven | Городские-внегородские территории | LST [пиксели с высокой плотностью непроницаемой поверхности] – LST [пиксели с низкой плотностью непроницаемой поверхности] | $LST_{\text{сред}}$ (буфер м/с На Советской) – $LST_{\text{сред}}$ (буфер м/с Кольвань) |
| | Городские-с/х территории | $LST_{\text{сред}}$ [все городские пиксели] – $LST_{\text{сред}}$ [пиксели с/х территорий] | $LST_{\text{сред}}$ [городские пиксели внутри 9 буферов] – $LST_{\text{сред}}$ [пиксели пахотных земель внутри 9 буферов] |

Для расчета показателей UHI_{surf} вокруг метеостанций были выбраны буферные зоны диаметром в 1 км (рис. 2). Буферная зона для метеостанции «Обская ГМО» была уменьшена согласно границам р. Обь для исключения её влияния на результат расчета интенсивности УИИ. Также в дни, когда облачность закрывала отдельные метеостанции, из анализа исключались пиксели, искажающие значение LST .

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

Выбор буферных зон вокруг метеорологических станций обоснован тем, что значения на метеостанциях используются в качестве реперных точек и верификации результатов расчета LST, в том числе и для возможного сравнения двух видов острова тепла UHI_{UCL} и UHI_{Surf} .

Показатель «городские-внегородские территории» категории land-cover-driven для расчета интенсивности UHI_{Surf} требует отобразить буферы тех метеостанций, которые бы соответствовали максимальному и минимальному количеству пикселей с непроницаемой поверхностью. Буфер метеостанции «На Советской», которая находится в центре города, был принят за зону с наиболее высокой плотностью пикселей непроницаемой поверхности (100% общего числа пикселей), в то время как буфер метеостанции Колывань выбран как соответствующий минимальной плотности пикселей непроницаемой поверхности (количество пикселей городской застройки составляет 45% общего числа пикселей).

Территориально метеорологические станции «На Советской», Обская ГМО, Огурцово, Учебная и Планетарий можно отнести к городским, а Коченево, Колывань, Мошково и Искитим – к внегородским. Тогда для буферов внегородских метеостанций среднее количество пикселей городской застройки составляет 65%, для буферов городских метеостанций – 76%.

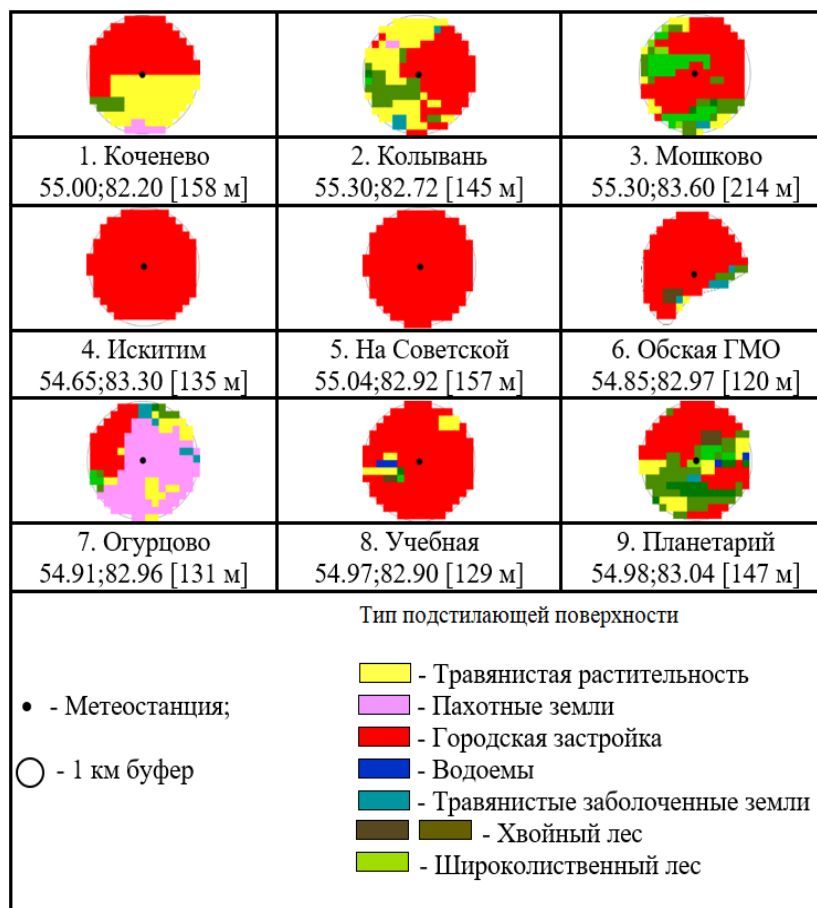


Рис. 2. Тип подстилающей поверхности внутри буферов метеостанций, их географические координаты и высота над уровнем моря

Fig. 2. Land cover inside weather station buffers, their geographical coordinates and elevation above sea level

Результаты

В табл. 2 приведены результаты оценки интенсивности UHI_{Surf} по четырем показателям на основе данных о температуре поверхности земли для каждого из 9 составленных изображений.

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

Большинство показателей демонстрируют сопоставимые между собой результаты и являются положительными, что говорит нам о наличии поверхностного острова тепла в городе Новосибирске в течение исследуемого периода. Исключение составляют отрицательные значения UHI_{Surf} (8 июля 2019 г., 15–17 июля и 24 июля 2020 г.) показателя «городские-сельскохозяйственные территории», что свидетельствует, напротив, об отсутствии городского острова тепла.

Из табл. 2 также видно, что значениям интенсивности UHI_{Surf} для категории UHI-driven соответствуют значения существенно выше, чем для категории Land-cover-driven. Наибольшее отличие в значениях интенсивности можно увидеть для 24 июля 2020 г., где значение показателя диапазона достигает 23°C (рис. 3). Вместе с тем для этого же дня значению показателя «городские-сельскохозяйственные территории» соответствует отрицательное значение интенсивности UHI_{Surf} ($-0,8^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2

Значения показателей интенсивности UHI_{Surf}
 UHI_{Surf} intensity indicators

| Категория | Показатель | Дата | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-------|-----------|--------|--------|
| | | 2018 | | | 2019 | | 2020 | | | |
| | | 10–12 VII | 19 VII | 4 VIII | 13–15 VII | 29–31 VII | 8 VII | 15–17 VII | 24 VII | 9 VIII |
| Значения UHI_{Surf} $^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | |
| UHI-driven | Величина | 7,8 | 9,6 | 10,3 | 9,1 | 10,5 | 11,1 | 9,2 | 11,5 | 8,3 |
| | Диапазон | 13,0 | 17,3 | 15,0 | 15,5 | 18,6 | 17,7 | 16,6 | 23,0 | 12,9 |
| Land-cover-driven | Городские-внегородские территории | 2,4 | 2,6 | 1,9 | 1,9 | 2,8 | 4,1 | 1,8 | 2,3 | 1,7 |
| | Городские-с/х территории | 2,7 | 2,0 | 2,0 | 2,6 | 2,1 | -1,6 | -0,4 | -0,8 | 0,7 |

Подобные противоречивые результаты можно объяснить сравнительно невысокой температурой воздуха в эти дни. По данным Западно-Сибирского УГМС 24 июля 2020 г. максимальная температура воздуха по Новосибирской области не превышала $26,8^{\circ}\text{C}$, минимальные температуры опускались вплоть до $2,5^{\circ}\text{C}$. Среди всех рассматриваемых случаев такие значения температуры воздуха являются самыми низкими.

При расчете показателя диапазона интенсивности UHI_{Surf} используются минимальные и максимальные значения LST внутри буферов метеостанций. Наибольшее влияние оказала минимальная температура поверхности внутри буфера метеостанции Мошково, которая наблюдалась над лесом и составила $11,5^{\circ}\text{C}$, а максимальное значение, составившее $34,5^{\circ}\text{C}$, наблюдалось внутри буфера метеостанции «На Советской».

Непосредственно на метеостанции Мошково 24 июля 2020 г. максимальная температура воздуха, составившая $22,5^{\circ}\text{C}$, а минимальная – $6,3^{\circ}\text{C}$, являются самыми низкими температурами среди всех метеостанций в этот день. Таким образом, разность между максимальным и минимальным значением LST составила 23°C (значение интенсивности UHI_{Surf} показателя диапазона).

Также значения LST в пределах буфера станции Мошково повлияли на значения показателя «городские-сельскохозяйственные территории», при расчете которого используются средние значения LST в пикселях городской застройки и пахотных земель. Внутри буфера станции Мошково присутствуют городские пиксели, что влияет на среднее значение LST. В западной части района исследования ландшафт преимущественно состоит из

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

пахотных земель и травянистой растительности, которые нагреваются быстрее в отличие от западной части, которой присущи скорее лесные ландшафты. Таким образом, более значительный нагрев пахотных земель и меньший нагрев городских земель обусловили отрицательное значение UHI_{Surf} .

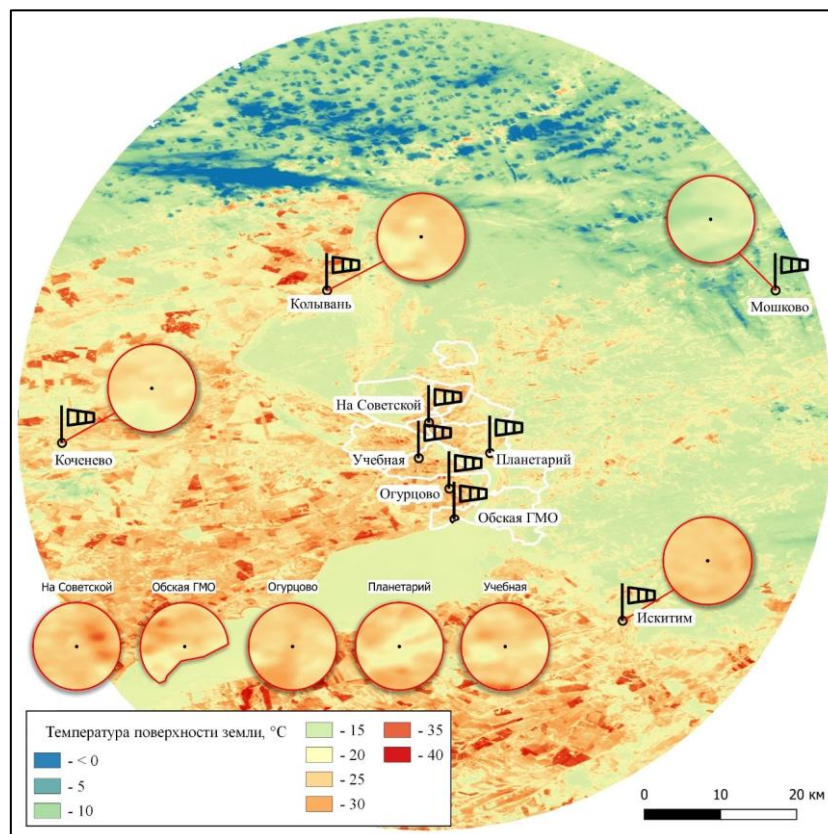


Рис. 3. Пространственное распределение температуры поверхности земли 24 июля 2020 г. по данным КА Landsat 8

Fig. 3. Landsat 8 image of land surface temperature spatial distribution on 24 July 2020

Подобная ситуация, когда температура пахотных земель оказалась выше, чем температура земель городских, сложилась и для случаев 8 июля и 15–17 июля 2020 г.

Рассмотрим случай 29–31 июля 2019 г. (рис. 4), когда все параметры UHI_{Surf} достигают максимальных значений и не наблюдается видимого влияния подстилающей поверхности в значениях интенсивности поверхностного острова тепла. Также этот случай выделяется тем, что в период с 29 июля по 2 августа 2019 г. максимальная температура воздуха на территории Новосибирской области достигала значений более 30 °C, что соответствует критерию аномальной жаркой погоды [6].

Этот случай, наоборот, характеризуется тем, что городские поверхности оказались более нагретыми ($LST_{сред} = 24,8^{\circ}C$) в отличие от сельскохозяйственных ($LST_{сред} = 22,6^{\circ}C$). Максимальные и минимальные значения LST среди всех буферов метеостанций составили 34,4 и 15,8 °C соответственно.

Перегретые искусственные поверхности в городе в совокупности с высокими температурами воздуха создают крайне некомфортные условия для жителей города, и рассматриваемый случай демонстрирует, что разность температуры поверхности земли может достигать 23,0 °C (показатель диапазона UHI_{Surf}).

Метеорология
Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

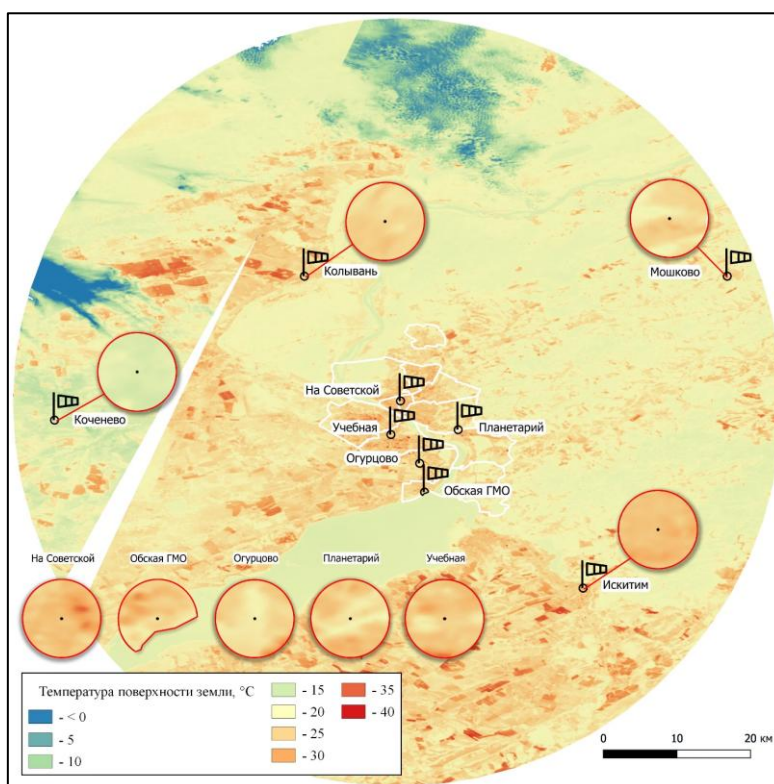


Рис. 4. Пространственное распределение температуры поверхности земли 29–31 июля 2019 г. по данным КА Landsat 8

Fig. 4. Landsat 8 image of land surface temperature spatial distribution on 29–31 July 2019

Выводы

Температура, измеряемая в городской точке, является функцией климата региона, в котором она находится, плюс влияние местных географических факторов и урбанизации, тогда как температура во внегородской точке зависит от самого регионального климата и влияния местных географических факторов. Если локальные географические факторы будут одинаковыми в обеих точках, то разница между обеими температурами будет выражать влияние города, что и составляло нашу цель.

Используя данные дистанционного зондирования Земли, было продемонстрировано различие полей поверхностной температуры между городскими и внегородскими территориями г. Новосибирска. Это подтверждает пригодность использования данных ДЗЗ и LST для определения тепловой аномалии внутри города и, как следствие, оценки интенсивности поверхностного городского острова тепла.

Для оценки использовались две категории параметров, позволяющие при помощи данных о LST и типе подстилающей поверхности получить значения интенсивности UHI_{Surf} . В целом полученные результаты по всем показателям согласованы между собой и свидетельствуют о наличии UHI_{Surf} в течение рассматриваемого периода.

Было обнаружено, что разность между максимальной и минимальной температурами для г. Новосибирск и его окрестностей может достигать $23,0^{\circ}C$ (показатель диапазона UHI_{Surf}). Однако столь высокие значения интенсивности, вероятно, являются завышенными, и в случае использования этого показателя как основного эффект поверхностного острова тепла может быть преувеличен. Показатель «городские-с/х территории», напротив, продемонстрировал минимальные значения интенсивности UHI_{Surf} , искаженные в результате большего нагрева пахотных земель в сравнении с искусственными поверхностями.

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

По всей видимости, наиболее практически полезным показателем является «городские-внегородские территории», при котором сравнивается температура пары станций, выбранных на основе данных о типе подстилающей поверхности.

Вышесказанное указывает на то, что при оценке городского острова тепла важно использовать одновременно несколько показателей, что позволит избежать неполноценных выводов и получить более полную картину о диапазоне возможных значений УНІ. Так, в работе [21] авторы пришли к выводу о том, что значение интенсивности УНІ зависит не только от выбранного показателя, но и типа используемых данных (температура воздуха или температура поверхности земли). Использование нескольких показателей позволяет производить сравнения с большим количеством исследований.

Полученные результаты в данной работе сопоставимы с результатами, опубликованными в работах для городов Лейпциг (Германия) и Ханчжоу (Китай) [21; 22], несмотря на их различия в климате и застройке. Так, в летние месяцы для города Ханчжоу показатели величины и диапазона UHI_{surf} летом составляют 13–15°C и 21–25°C. Для категории land-cover-driven значения показателей несколько отличаются и составили для «городские-внегородские территории» и не превышают ~1,75°C, а интенсивность, рассчитанная для показателя «городские-с/х территории», значительно превышает значения для Новосибирска и составляют 5–9°C. Для Лейпцига значения UHI_{surf} в утренние часы для конца сентября составили 8 и 12 К для показателей величины и диапазона соответственно, а для категории land-cover driven оба показателя равны ~1 К.

В работе проведена оценка влияния г. Новосибирска на местный климат. Значение интенсивности поверхностного острова тепла количественно отражает степень влияния урбанизации, исключая остальные факторы формирования поверхностной температуры, так как рассматриваемые городские и внегородские территории находятся под влиянием одинаковых географических и климатических факторов.

Список источников

1. Администрация рабочего поселка Краснообска. [Электронный ресурс]. URL: <https://krasnoobsk.nso.ru/page/7> (дата обращения: 26.08.21).
2. Гостева А.А., Матушко А.К., Якубайлик О.Э. Дистанционные методы в изучении температуры поверхности земли в городах (на примере г. Красноярска, Россия) // ИнтерКарто.ИнтерГИС. 2018. Т. 24. №. 2. С. 195–205.
3. Клименко В.В., Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. и др. Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. №. 5. С. 519–524.
4. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 243 с.
5. Лучицкая И.О., Белая Н.И., Арбузов С.А. Климат Новосибирска и его изменения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 224 с.
6. Перечень и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ "Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды". [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo-nso.ru/pages/115> (дата обращения: 08.09.21).
7. Правительство Новосибирской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nso.ru/page/2262> (дата обращения: 26.08.21).
8. Федеральная служба государственной статистики. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 19.08.21).
9. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data // Journal of sensors. 2016. Vol. 2016.
10. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J.C., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., Sobrino, J.A. An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. №. 3. P. 431.

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

11. *Guha S., Govil H., Dey A., Gill N.* Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy // *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51. № 1. P. 667–678.
12. *Heaviside C., Vardoulakis S., Cai X.* Attribution of mortality to the Urban Heat Island during heatwaves in the West Midlands, UK // *Environmental Health*. 2016. Vol. 15. P. 49–59.
13. *Howard L.* The Climate of London. London, 1833. Vol. 1. 221 p.
14. *Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y.* Urban heat island analysis using the landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia // *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. 2018. Vol. 2. № 7. P. 358.
15. Land Cover Viewer. [Электронный ресурс]. URL: <https://lcviewer.vito.be/2019> (дата обращения 08.09.21).
16. Landsat 8 Overview. [Электронный ресурс]. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview> (Дата обращения 01.09.21).
17. *Martine G.* State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth // *State of world population*. 2007. 108 p.
18. *Martin-Vide J., Sarricolea P., Moreno-García M.C.* On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference // *Frontiers in Earth Science*. 2015. Vol. 3. P. 24.
19. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 519 p.
20. *Ranagalage M., Estoque R.C., Murayama Y.* An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017) // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017. Vol. 4. № 7. P. 189.
21. *Schwarz N., Schlink U., Franck U., Grossmann K.* Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators-An application for the city of Leipzig (Germany) // *Ecological Indicators*. 2012. Vol. 18. P. 693–704.
22. *Sheng L., Tang X., You H. et al.* Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 72. P. 738–746.
23. *Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sensing of environment*. 2004. Vol. 90. № 4. P. 434–440.
24. *Taylor J., Wilkinson P., Davies M. et al.* Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London // *Urban Climate*. 2015. Vol. 14. № 4. P. 517–528.
25. *Tomlinson C.J., Chapman L., Thornes J.E., Baker C.J.* Derivation of Birmingham’s summer surface urban heat island from MODIS satellite images // *International Journal of Climatology*. 2012. Vol. 32. № 2. P. 214–224.
26. U.S. Geological Survey. EarthExplorer. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 08.09.21).
27. *Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates // *Remote sensing of environment*. 2003. Vol. 86. № 3. P. 370–384.
28. World Cities Report 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://unhabitat.org/wcr/> (дата обращения 10.08.21).
29. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. [Электронный ресурс]. URL: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm> (дата обращения 30.08.21).
30. *Yow D.* Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation // *Geography Compass*. 2007. Vol. 1. № 6. P. 1227–1251.
31. *Zhao Q., Guo Y., Ye T. et al.* Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study // *The Lancet Planetary Health*. 2021. Vol. 5. № 7. P. e415–e425.

Reference

1. Administration of the Krasnoobsk work settlement (2021), available at: <https://krasnoobsk.nso.ru/page/7> (Accessed 26.08.21).

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

2. Gosteva, A.A., Matuzko, A.K. and Yakubailik, O.E. (2018), Remote methods in studying the temperature of the earth's surface in cities (on the example of Krasnoyarsk, Russia), *InterCarto. InterGIS*, vol. 24, no. 2, pp. 195–205.
3. Klimenko, V.V., Ginsburg, A.S., Demchenko, P.F. et al. (2016), The impact of urbanization and climate warming on the energy consumption of large cities, *Doklady earth sciences*, vol. 470, no. 5, pp. 519–524.
4. Landsberg, G.E. (1983), *Klimat goroda* [Climate of the city], Hydrometeoizdat, Leningrad, USSR.
5. Luchitskaya, I.O., Belaya, N.I. and Arbuzov, C.A. (2014), *Klimat Novosibirska i ego izmeneniya* [The climate of Novosibirsk and its changes], Novosibirsk, Russia.
6. List and criteria of natural hazards operating in the territory of activity FSBI "West Siberian Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring", available at: <http://meteo-nso.ru/pages/115> (Accessed 08.09.21).
7. The Government of the Novosibirsk region, available at: <http://www.nso.ru/page/2262> (Accessed 26.08.21).
8. Federal State Statistics Service. The population of the Russian Federation by municipality, available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (Accessed 19.08.21).
9. Avdan, U., Jovanovska, G. (2016), Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data, *Journal of sensors*, vol. 2016.
10. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J.C., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D. and Sobrino, J.A. (2018), An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 3, pp. 431.
11. Guha, S., Govil, H., Dey, A. and Gill, N. (2018), Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy, *European Journal of Remote Sensing*, vol. 51, no. 1, pp. 667–678.
12. Heaviside, C., Vardoulakis, S. and Cai, X. (2016), Attribution of mortality to the Urban Heat Island during heatwaves in the West Midlands, UK, *Environmental Health*, vol. 15, pp. 49–59.
13. Howard, L. (1883), *The Climate of London*, London, UK.
14. Kaplan, G., Avdan, U. and Avdan, Z.Y. (2018), Urban heat island analysis using the landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, vol. 2, no. 7, pp. 358.
15. Land Cover Viewer, available at: <https://lcviewer.vito.be/2019> (Accessed 08.09.21).
16. Landsat 8 Overview, available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview> (Accessed 01.09.21).
17. Martine, G. (2007), *State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth*, State of world population, New York, NY.
18. Martin-Vide, J., Sarricolea, P. and Moreno-García, M.C. (2015), On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference, *Frontiers in Earth Science*, vol. 3, pp. 24.
19. Oke, T., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J. (2017), *Urban climates*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
20. Ranagalage, M., Estoque, R.C. and Murayama, Y. (2017), An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017), *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 4, no. 7, pp. 189.
21. Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U. and Grossmann, K. (2012), Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators-An application for the city of Leipzig (Germany), *Ecological Indicators*, vol. 18, pp. 693–704.
22. Sheng, L., Tang, X., You, H. et al. (2017), Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China, *Ecological Indicators*, vol. 72, pp. 738–746.
23. Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L. (2004), Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of environment*, vol. 90, no. 4, pp. 434–440.

Метеорология

Газимов Т.Ф., Кужевская И.В.

24. Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M. et al. (2015), Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London, *Urban Climate*, vol. 14, no. 4, pp. 517–528.
25. Tomlinson, C.J., Chapman, L., Thornes, J.E. and Baker, C. J. (2012), Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images, *International Journal of Climatology*, vol. 32, no. 2, pp. 214–224.
26. U.S. Geological Survey. EarthExplorer. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed 08.09.21).
27. Voogt, J.A. and Oke, T.R. (2003), Thermal remote sensing of urban climates, *Remote sensing of environment*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384.
28. World Cities Report 2020, available at: <https://unhabitat.org/wcr/> (Accessed 10.08.21).
29. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, available at: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm> (Accessed 30.08.21).
30. Yow, D. (2007), Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation, *Geography Compass*, vol. 1, no. 6, pp. 1227–1251.
31. Zhao, Q., Guo, Y., Ye, T. et al. (2021), Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study, *The Lancet Planetary Health*, vol. 5, no. 7, pp. e415–e425.

Поступила в редакцию: 14.10.21; одобрена после рецензирования: 01.11.2021; принята к опубликованию: 08.11.2021.

The article was submitted: 14 October 21; approved after review: 01 November 2021; accepted for publication: 08 November 2021

Информация об авторах

Information about the authors

Тимур Фаискабирович Газимов

аспирант кафедры метеорологии и климатологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет;

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

e-mail: tf.gazimov@gmail.com

Timur F. Gazimov

Postgraduate Student, Department of Meteorology and Climatology, National Research Tomsk State University;

36, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia

Ирина Валерьевна Кужевская

доцент, доцент кафедры метеорологии и климатологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет;

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Irina V. Kuzhevskaya

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, National Research Tomsk State University;

36, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia

e-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Вклад авторов

Газимов Т.Ф. – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Кужевская И.В. – написание статьи, научное редактирование текста.

Конфликт интересов. У авторов отсутствует конфликт интересов по отношению к результатам, полученным в ходе исследовательской работы.

Contribution of the authors

Gazimov T.F. – the idea; collection and processing of materials and data; writing of the paper.

Kuzhevskaya I.V. – writing of the paper; scientific editing of the paper.

The authors declare no conflicts of interest in relation to the results obtained in the research work.