



Research Article

Received: September 06, 2022

Accepted: November 28, 2022

Published: December 06, 2022

ISSN 2304-6295

# Optical Remote Sensing for Urban Heat Islands Identification

Korniyenko, Sergey Valeryevich<sup>1\*</sup> Dikareva, Ekaterina Aleksandrovna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; [svkorn2009@mail.ru](mailto:svkorn2009@mail.ru) (K.S.V.); [ea.dikareva@gmail.com](mailto:ea.dikareva@gmail.com) (D.E.A.);

Correspondence: \* email [svkorn2009@yandex.ru](mailto:svkorn2009@yandex.ru); contact phone [+79884912459](tel:+79884912459)

## Keywords:

Urban Planning; Land Cover; Urban Thermal Environment; Urban Heat Island; Urban Thermal Environment Index; Land Surface Temperature; Remote Sensing; Landsat 8; Atmospheric Urban Heat Island; Surface Urban Heat Island

## Abstract:

The relevance of the problem of studying the mechanisms of urban heat island (UHI) formation is confirmed by a large number of studies around the world. The research demonstrates the identification of UHI by remote sensing (RS) method. The object of research is city of Volgograd (48°42'42", 44°30'50"); a metropolis located in the southeast of the European part of Russia. Volgograd is a linear city located along the Volga 65–70 km long and about 5 km wide. The climate is temperate continental, arid (according to the International climate classification Köppen — type «Dfa»). Analysis of climate data highlights the need to study UHI during the summer period. Data from the Landsat 8 satellite was used to measure the temperature of the land cover (LC). Satellite images were purchased for various calendar dates: 28.07.2015, 05.08.2018 and 06.08.2021 (about 10 a.m.). The land surface temperature (LST) was calculated in various territorial zones of the city: residential and public-business (mid-rise and multi-storey buildings), residential low-rise buildings, industrial, recreational. Analysis of thermal images is performed by the method of cross-sections. A relative temperature index is proposed, on the basis of which gradations of UHI intensity and ecological qualities of urban environment (UE) are established. According to the results of statistical processing, it was found that the experimental data of satellite thermal images are generally adequate and the conclusions obtained from the results of a small sample can be extended with a probability of 0.95 to the entire hypothetical population. The UHI was identified (with temperature difference about 8.5 K) for the study object. The LC emissivity has been shown to be crucial for determining of LST. The choice of effective building materials, structures and technologies, for example, white and green roofs, play an important role in reducing temperature and mitigation the UHI. The production area gives maximum thermal pollution. The increase in temperature in the mid-storey and multi-storey buildings is explained by the higher heat storage capacity of multi-storey buildings and adjacent areas. Verification of the obtained results demonstrated their consistency with the data available in the scientific literature that confirms the reliability of the present studies. The urbanization process increases the intensity of the UHI and reduces the ecological quality of the UE. UHI mitigation strategies should include a set of architectural, planning, structural and engineering measures. Further research will be devoted to mathematical modeling of simultaneous processes of transient heat and mass exchange of urban areas, taking into account various meteorological parameters (solar radiation, temperature, wind speed, etc.) to assess the UHI and its mitigation during the summer period.

## 1 Introduction / Введение

Численность населения нашей планеты неуклонно растет [1]. Миграция жителей из сельских населенных пунктов в города приводит к увеличению площади урбанизированных



территорий [2]. Сегодня более половины населения мира живет в городах [3]. Ожидается, что к середине 21 века доля городского населения достигнет 70 % [4] при существенной урбанизации в странах Азии и Африки [5]–[10]. Рост численности городского населения увеличивает спрос на предметы быта, дорожную инфраструктуру, строительство зданий и сооружений [4], [11], [12], в результате чего меняется почвенный покров [13]–[15]. В последние десятилетия площадь зеленых насаждений в городах значительно сократилась во всем мире [16], [17].

Рост населения и урбанизация вызывают значительные изменения в городской тепловой среде [18]. Строительство высотных зданий, уплотнение застройки, устройство дорожных покрытий могут значительно изменить температуру мегаполиса. По сравнению с природным ландшафтом здания, расположенные в густонаселенных городских районах, поглощают большее количество солнечного излучения [19]. Уплотнение городской застройки блокирует процесс лучистого и конвективного теплообмена с окружающей средой [20]–[22]. Большое количество теплоты, аккумулированной в каменных стенах зданий, существенно влияет на баланс тепловой энергии, а выбросы токсичных газов загрязняют воздух, воду, почву [17], [23], [24].

Существует феномен городского теплового острова [10], [25]. Этот феномен заключается в повышении температуры городских территорий по сравнению с сельскими населенными пунктами. Городской тепловой остров можно легко обнаружить по тепловизионной съемке [21]: разность температур может достигать 5 K и выше [26]. Городской тепловой остров напрямую влияет на выбросы парниковых газов, высокий уровень потребления энергии, здоровье людей [7], [15], [22]. В докладе Межправительственной группы по проблемам изменения климата особо отмечается, что воздействие высоких температур на человека летом приводит к нарушению сна и усиливает сердечнососудистые заболевания, а тепловые удары могут привести к смертельному исходу [27]. Городской тепловой остров является фактором, снижающим устойчивое развитие города и усиливает эффект глобального потепления [28], [29].

Эффект городского теплового острова может быть количественно определен на основе измерений температуры воздуха или почвенного покрова [30]. В связи с этим следует различать атмосферный и поверхностный городские тепловые острова [31].

Атмосферный городской тепловой остров определяется как разность температур воздуха в городе и за его пределами. Он позволяет достаточно точно оценить характер тепловой аномалии в городе с учетом воздействия различных метеорологических факторов: температуры воздуха, влажности, скорости ветра и др. Однако отсутствие достаточного количества метеорологических станций в городских и сельских районах затрудняет точную количественную оценку атмосферного городского острова теплоты [32]. Кроме того, натурные измерения этого теплового острова требуют большого количества материальных затрат и временных ресурсов [15].

Поверхностный городской тепловой остров представляет собой разность температур почвенного покрова в черте города и за его пределами. Температура почвенного покрова может быть достаточно точно определена на основе тепловой полосы, полученной с помощью спутника [33]. Имея тепловые изображения, можно получить температуры растительного покрова, построить тепловое поле города, а, следовательно, оценить эффект городского теплового острова [13].

Эффективным методом получения тепловых изображений является дистанционное зондирование. Этот метод позволяет достаточно быстро и точно определить тепловое поле растительного покрова, не прибегая к сложным и трудоемким измерениям и вычислениям метеорологических параметров.

Для получения тепловых изображений используют различные искусственные спутники Земли [14], [15], [24]: спектрометр с умеренным разрешением MODIS, Landsat (5–8), радиометр с очень высоким разрешением AVHRR, усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения ASTER. Пространственная разрешающая способность этих спутников колеблется от 30 м до 1 км, временная разрешающая способность — от суток до месяца. Спутники MODIS и AVHRR имеют низкую пространственную и высокую временную разрешающую способность, поэтому они эффективны для исследования больших территорий в динамическом режиме; для оценки городских тепловых островов они почти не применяются [34]. Тепловая полоса Landsat имеет хорошее пространственное разрешение в интервале от 30 до 120 м и временное разрешение 16 суток, поэтому эти спутники широко



применяют для изучения городских тепловых островов [6], [26], [34].

Исследование характеристик городского климата было впервые выполнено Люком Говардом (Luke Howard) в 1833 году [35]. Влияние урбанизации на процесс формирования городского теплового острова было впервые изучено Ньюолтом (Nieuwolt) в начале 60-х годов прошлого века.

В настоящее время проводятся обширные исследования городских тепловых островов с помощью спутников.

В работе [5] (авторы R.C. Estoque и др.) исследован тепловой режим растительного покрова в районах Бангкока (Таиланд), Джакарты (Индонезия) и Манилы (Филиппины) с помощью данных, полученных спутником Landsat 8. Показано, что среднее значение температуры непроницаемого покрытия примерно на 3 К выше, чем озелененных участков, что подчеркивает важность роли зеленых насаждений в смягчении городского теплового острова.

На основе систематизации данных [10] авторы С.В. Ким (S.W. Kim) и Р.Д. Браун (R.D. Brown) показали важность точного определения городского острова теплоты. Быстрые темпы урбанизации, наряду с изменением климата, все больше влияют на местные климатические условия городских поселений.

А. Аслам (A. Aslam) и др. [20] выполнили анализ характеристик городских территорий в Исламабаде (Пакистан) с помощью данных дистанционного зондирования. Полученные результаты показывают значительный прирост урбанизированных территорий (113 %) в период с 2013 и 2019 год, что является основным фактором, усиливающим рост городского острова теплоты.

Г. Тепанозян (G. Terapozyan) и др. [36] показали, что соотношение между озелененными и застроенными территориями является основным фактором, влияющим на изменение температуры почвенного покрова в Ереване (Армения).

А. Мэтью (A. Mathew) и др. [8] на основе экспериментальной оценки теплового режима индийских городов Ахмадабад и Джайпур пришли к выводу о том, что наиболее сильный эффект образования поверхностных городских тепловых островов наблюдается в ночное время.

Таким образом, актуальность проблемы изучения механизмов формирования, развития и смягчения городских тепловых островов подтверждается большим количеством зарубежных исследований. В России этот вопрос исследован недостаточно. Практически отсутствуют данные по влиянию объектов градостроительной деятельности на тепловое поле города. Отсутствует количественная оценка этого влияния на окружающую среду.

Целью данной работы является исследование поверхностного городского теплового острова методом оптического дистанционного зондирования земной поверхности.

## 1.1 The object of research / Объект исследования

Объектом исследования является Волгоград (48°42'42" с. ш. 44°30'50" в. д.) — мегаполис, расположенный на юго-востоке европейской части России. Волгоград представляет собой линейный город, расположенный вдоль Волги длиной 65–70 км и шириной около 5 км. Для сохранения статуса города-миллионника к городу были присоединены 28 населенных пунктов и остров Сарпинский. Это поменяло на бумаге естественную конфигурацию города, включив в нее незаселенные территории, но город остался линейным в своей основе (рис. 1).

Площадь города составляет 859,3 км<sup>2</sup>, население — 1001183 чел. Плотность населения — 1165 чел./км<sup>2</sup>.

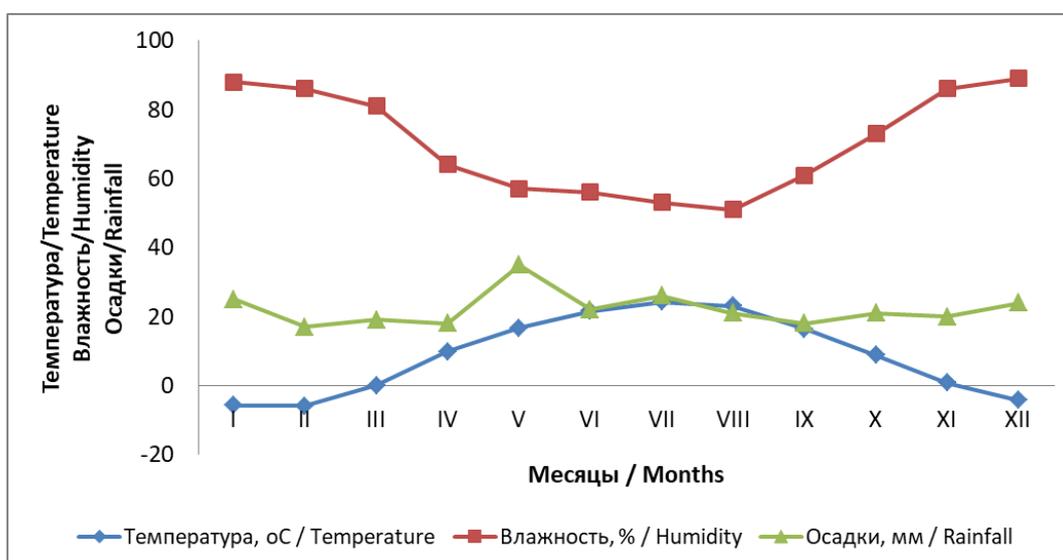
Самая высокая точка расположена на северо-западе города на одном из куполообразных возвышений. Прилегающая к Волге часть города — низменная, с высотой 0–40 м над уровнем моря; на удалении 1–3 километра от Волги находится цепь пологих холмов с высотой 50–140 метров.

Климат умеренно-континентальный, засушливый (согласно международной классификации климата Köppen — тип «Dfa»). Среднее количество осадков — 267 мм в год. Зима мягкая, с частыми оттепелями, лето жаркое и долгое, во все времена года возможны резкие перепады температуры.



**Fig. 1 – Visual image of the study object according to the Landsat 8 data (dotted line shows the administrative border of the city)**

**Рис. 1 – Визуальное изображение объекта исследования, полученное с помощью спутника Landsat 8 (пунктиром показана граница города)**



**Fig. 2 – Air temperature, relative humidity and rainfall for the study object (according to archival climatic data)**

**Рис. 2 – Температура воздуха, относительная влажность и количество осадков для исследуемого объекта (согласно архивным климатическим данным <https://rp5.ru/>)**

Анализ представленных климатических данных (рис. 2) показывает, что согласно данным многолетних наблюдений максимальная среднемесячная температура наружного воздуха для исследуемого объекта отмечается в июле (24,2 °С). Относительная влажность наружного воздуха достигает минимальных значений в июле — августе (51...53 %). Количество осадков небольшое (21...26 мм). Интенсивное воздействие солнечного излучения приводит к интенсивному нагреву открытых городских территорий. Комбинация максимальной температуры

и минимальной относительной влажности наружного воздуха при небольшом количестве осадков, очевидно, создает максимальные риски образования городского теплового острова в жаркий период года, что требует проведения детальных исследований. Изучение климатических данных позволяет выбрать моменты времени для получения наиболее точных данных оптического дистанционного зондирования.

## 2 Materials and Methods / Материалы и методы

Для идентификации городского теплового острова был использован метод визуального и теплового «прослушивания» на основе оптического дистанционного зондирования поверхности Земли.

Подробная методическая основа данного исследования наглядно представлена на рис. 3.

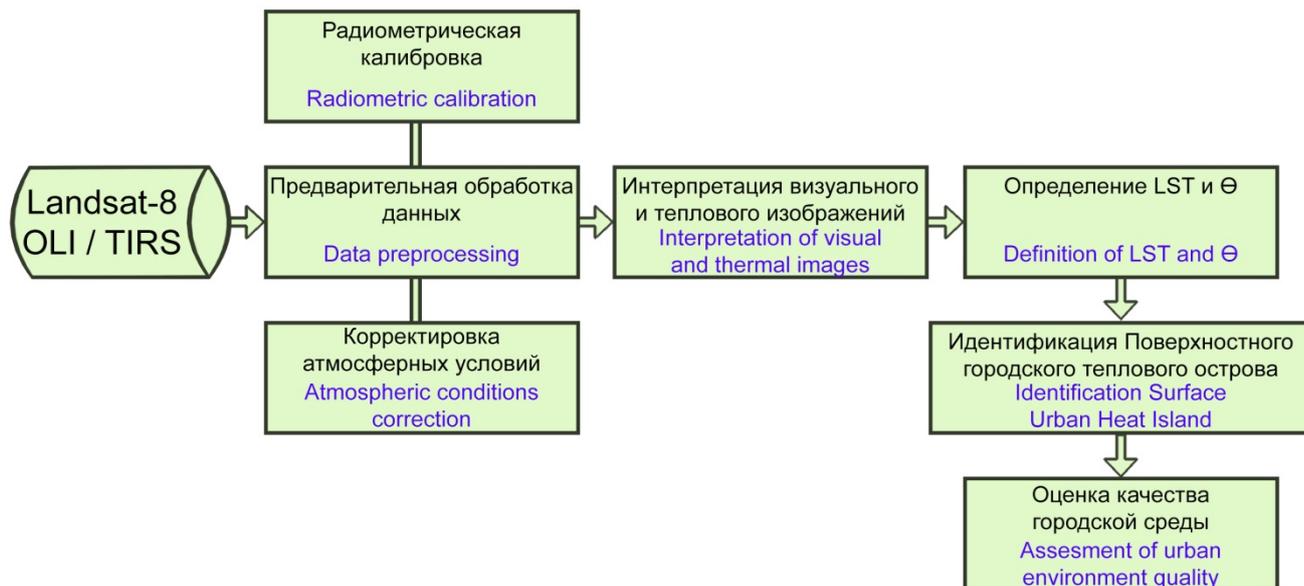


Fig. 3 – Research methodology

Рис. 3 – Методика исследования

Как видно из рис. 3, полученные данные со спутника сначала подвергаются предварительной обработке. При этом для повышения точности тепловых изображений осуществляется радиометрическая калибровка и корректировка атмосферных условий. После предварительной обработки данных визуальные и тепловые изображения интерпретируются, что позволяет выявить ряд характерных особенностей территории города (наличие озелененных участков, открытые грунтовые поверхности, зоны городской застройки). Наличие тепловых изображений позволяет определить температуру почвенного покрова (Land Surface Temperature, LST). Данные LST дают возможность идентифицировать поверхностный городской тепловой остров и выполнить оценку качества городской среды.

Ниже дано подробное описание процедур, необходимых для проведения исследования.

### 2.1 Landsat performance analysis / Анализ характеристик спутников Landsat

50 лет серия высокотехнологичных спутников Landsat обеспечивает дистанционное зондирование земной поверхности. Landsat 1 был запущен в 1972 году; за ним последовала серия спутников (Landsat 2, 3, 4, 5 и 7), которые обеспечили практически непрерывное визуальное и тепловое «прослушивание» при увеличении спектральной точности и пространственного разрешения.

Спутник Landsat 8 оборудован двумя датчиками: OLI (Operational Land Imager), позволяющим получать видимые изображения поверхности, и TIRS (Thermal Infrared Sensor) для получения тепловых (инфракрасных) изображений (табл. 1).



**Table 1. Comparison of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) bands with the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) bands [34]**

**Таблица 1. Сравнение диапазонов OLI/ TIRS Landsat 8 с диапазоном ETM+ Landsat 7 [34]**

| Landsat 8                                 |                 | Landsat 7                                |                                        |
|-------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| Характеристики полос (разрешение 30 м)    | Длина волны, нм | Характеристики полос (разрешение 30 м)   | Длина волны, нм                        |
| Полоса 1 – синяя                          | 430–450         | Полоса 1 – голубая                       | 450–520                                |
| Полоса 2 – голубая                        | 450–510         | Полоса 2 – зеленая                       | 520–600                                |
| Полоса 3 – зеленая                        | 530–590         | Полоса 3 – красная                       | 630–690                                |
| Полоса 4 – красная                        | 640–670         | Полоса 4 – ближняя инфракрасная          | 770–900                                |
| Полоса 5 – ближняя инфракрасная           | 850–880         | Полоса 5 – коротковолновая инфракрасная  | 1550–1750                              |
| Полоса 6 – коротковолновая инфракрасная   | 1570–1650       | Полоса 7 – коротковолновая инфракрасная  | 2090–2350                              |
| Полоса 7 – коротковолновая инфракрасная   | 2110–2290       | Полоса 8 – панхроматическая (15 м)       | 520–900                                |
| Полоса 8 – панхроматическая (15 м)        | 500–680         | Полоса 61 – тепловая инфракрасная (60 м) | 10400–12500 (высокое усиление сигнала) |
| Полоса 9 – перистые облака (cirrus)       | 1360–1380       | Полоса 62 – тепловая инфракрасная (60 м) | 10400–12500 (низкое усиление сигнала)  |
| Полоса 10 – тепловая инфракрасная (100 м) | 10600–11190     |                                          |                                        |
| Полоса 11 – тепловая инфракрасная (100 м) | 11500–12510     |                                          |                                        |

Из табл. 1 видно, что в целом спектральные диапазоны OLI и TIRS Landsat 8 сопоставимы с диапазонами ETM+ Landsat 7, однако имеют ряд дополнительных функциональных возможностей, в частности, наличие тепловых диапазонов TIRS позволяет обеспечить коррекцию длины волны в атмосфере, что повышает точность определения поверхностной температуры и излучательной способности поверхности. Радиометрическая калибровка обеспечивает воспроизводимость результатов дистанционного зондирования.

Landsat 8 является современным высокотехнологичным спутником, позволяющим определить такие характеристики как [34]: излучательная способность поверхности, альbedo, температура поверхности, тип растительного покрова и др.

## 2.2 Determination of Land Surface Temperature (LST) / Определение температуры растительного покрова

Для определения температуры растительного покрова на основе тепловых полос Landsat 8 мы использовали метод, описанный Артисом (Artis) и Карнаханом (Carnahan) [24]. Этот метод заключается в преобразовании теплового диапазона, имеющего цифровой номер (Digital Number, DN), в температуру поверхности (LST). Расчет производится в два этапа. На первом этапе значения DN преобразуются в спектральное излучение. На втором этапе вычисляется температура поверхности по формуле

$$LST = \frac{T}{1 + \left( \lambda \frac{T}{\rho} \right) \ln(\varepsilon)}, \quad (1)$$

где  $T$  — яркостная температура;  $\lambda$  — длина излучаемой волны;  $\rho = hc/k$  ( $1,438 \cdot 10^{-2}$  м·К);  $h$  — постоянная Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $c$  — скорость света в вакууме ( $2,998 \cdot 10^8$  м/с);  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $\varepsilon$  — спектральная излучательная способность поверхности.

В формуле (1) излучательную способность поверхности суши можно достаточно точно вычислить, используя формулу



$$\varepsilon = 0,004P_v + 0,986, \quad (2)$$

где  $P_v$  — доля озеленения поверхности.

Доля озеленения поверхности в формуле (2) может быть достаточно точно вычислена по спутниковым изображениям на основе распознавания поверхности с помощью различных эффективных алгоритмов [37].

### 2.3 Thermal Imaging control and analysis / Получение и анализ тепловых изображений

Для определения температуры почвенного слоя объекта исследования мы использовали данные спутника Landsat 8. Спутниковые снимки были приобретены на различные календарные даты: 28.07.2015, 05.08.2018 и 06.08.2021 (около 10 ч 00 мин). Согласно архивным данным погоды в указанные календарные даты облачность минимальная или отсутствует (табл. 2), что повышает качество получаемых тепловых изображений.

Table 2. Optical Remote Sensing performances  
Таблица 2. Характеристики оптического дистанционного зондирования

| Спутник   | Сенсор   | Календарная дата | Пространственное разрешение, м | Временное разрешение, сут | Облачность, % |
|-----------|----------|------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------|
| Landsat 8 | OLI/TIRS | 28.07.2015       | 30×30                          | 16                        | 5             |
|           |          | 05.08.2018       | 30×30                          | 16                        | 0             |
|           |          | 06.08.2021       | 30×30                          | 16                        | 0             |

Данные Landsat были загружены с сайта <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Спутник Landsat дает снимки с пространственным разрешением 30×30 м и временным разрешением 16 сут (средний период повторной съемки). Для расчета температуры поверхности были использованы полосы красного, зеленого, синего, ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) излучения для получения мультиспектральных полос с использованием слоя [34]. Граница объекта исследования была определена с помощью сайта <https://www.naturalearthdata.com/features/>. Значения температуры поверхности были рассчитаны с использованием тепловой полосы Landsat для соответствующего момента времени.

Расчет температуры поверхности выполнен в различных территориальных зонах города: жилой и общественно-деловой (малоэтажной, среднеэтажной и многоэтажной застройки), производственной, рекреационной. В каждой из рассматриваемых зон выбран ряд характерных точек, необходимых для усреднения температур. Оценка точности определения температур на основе тепловых изображений выполнена по стандартной методике [38]. Анализ тепловых изображений выполнен методом сечений (рис. 4).

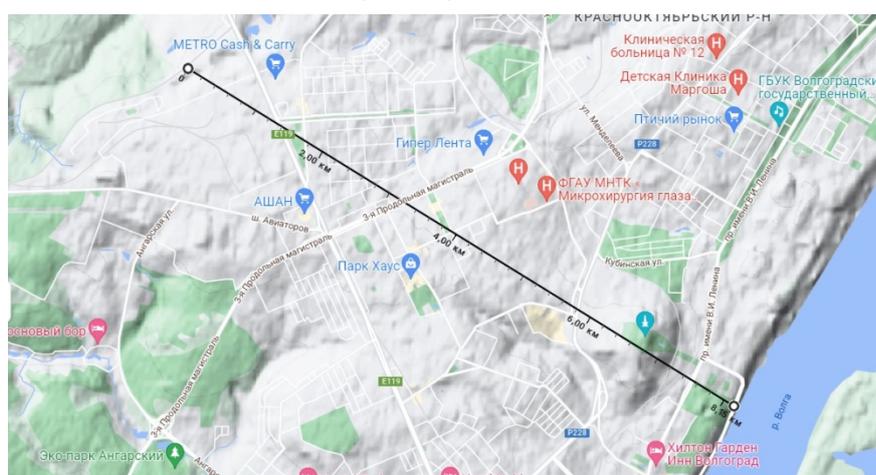


Fig. 4 – Fragment of the study object (cross-section is shown by thickened line)  
Рис. 4 – Фрагмент объекта исследования (сечение показано утолщенной линией)



## 2.4 Urban Heat Island evaluation / Оценка городского теплового острова

В общем случае, как показано выше, поверхностный городской тепловой остров определяют как разность между средней температурой почвенного покрова в границах города ( $T_{urb}$ ) и за его пределами ( $T_{rur}$ ), т.е.

$$\Delta T = T_{urb} - T_{rur}. \quad (3)$$

Формула (3) дает общую оценку городского теплового острова, однако не позволяет определить тепловые аномалии в различных точках города. Удобным показателем для оценки степени выраженности городского теплового острова в различных точках города является показатель относительной температуры  $\Theta$ , также называемый индексом городской тепловой среды (Urban Thermal Environment Index, UTEI) и определяемый по формуле

$$\Theta = \frac{T_s - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (4)$$

где  $T_s$  — температура рассматриваемого участка поверхности;  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  — соответственно минимальное и максимальное значения температуры поверхности.

Значения  $T_s$ ,  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$ , входящие в формулу (4), определяют по тепловым изображениям. Из формулы (4) следует, что  $0 \leq \Theta \leq 1$ . В зависимости от показателя  $\Theta$  на территории города можно условно выделить следующие тепловые зоны:

- очень низкой температуры ( $0 \leq \Theta < 0,2$ );
- низкой температуры ( $0,2 \leq \Theta < 0,4$ );
- умеренной температуры ( $0,4 \leq \Theta < 0,6$ );
- высокой температуры ( $0,6 \leq \Theta < 0,8$ );
- очень высокой температуры ( $0,8 \leq \Theta \leq 1$ ).

В работе [24] предложено участки поверхности, на которых  $0,6 < \Theta \leq 1$ , относить к тепловым островам.

Выделенные тепловые зоны позволяют установить градации выраженности городского теплового острова, необходимые для поэлементной оценки теплотехнического качества городской среды (табл. 3).

**Table 3. Assessment of urban thermal quality**  
**Таблица 3. Оценка теплотехнического качества городской среды**

| Тепловая зона            | Выраженность городского теплового острова | Теплотехническое качество городской среды |
|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $0 \leq \Theta < 0,2$    | Очень слабая                              | Очень высокое                             |
| $0,2 \leq \Theta < 0,4$  | Слабая                                    | Высокое                                   |
| $0,4 \leq \Theta < 0,6$  | Умеренная                                 | Умеренное                                 |
| $0,6 \leq \Theta < 0,8$  | Сильная                                   | Низкое                                    |
| $0,8 \leq \Theta \leq 1$ | Очень сильная                             | Очень низкое                              |

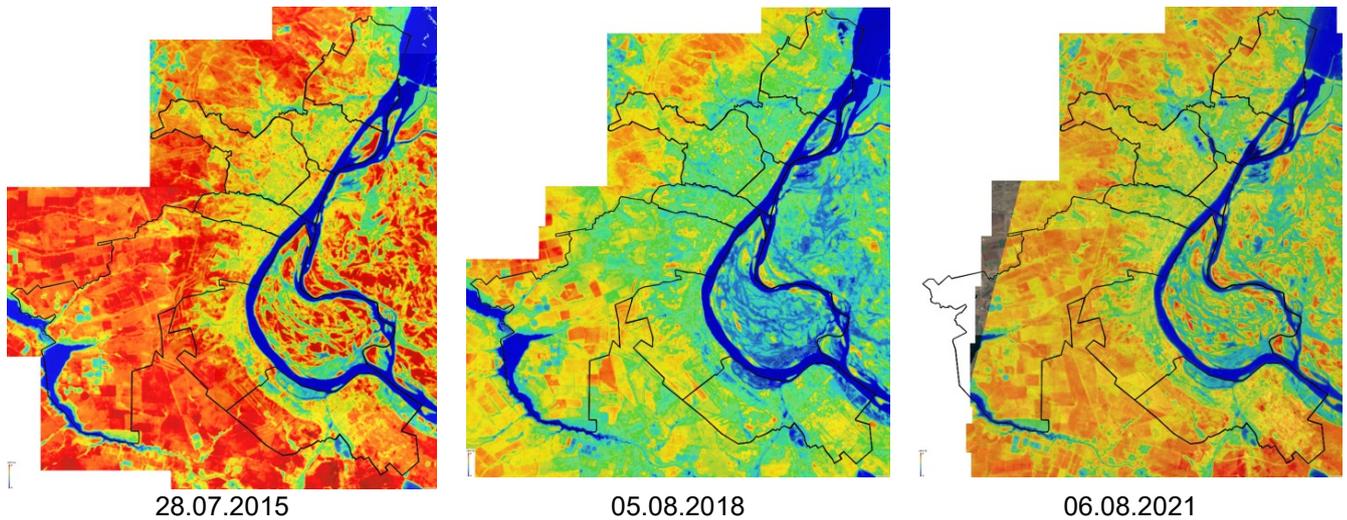
Как видно из табл. 3, повышение показателя  $\Theta$  указывает на формирование более выраженного городского теплового острова, что приводит к ухудшению теплотехнического качества городской среды вследствие высокой теплопоглощающей способности почвенного покрытия. Красным колером выделена тепловая зона с очень низким теплотехническим качеством городской среды, зеленым колером — с очень высоким качеством.

Таким образом, имея тепловое изображение территории города можно определить тепловые зоны, выполнить анализ городского теплового острова и оценить теплотехническое качество городской среды.

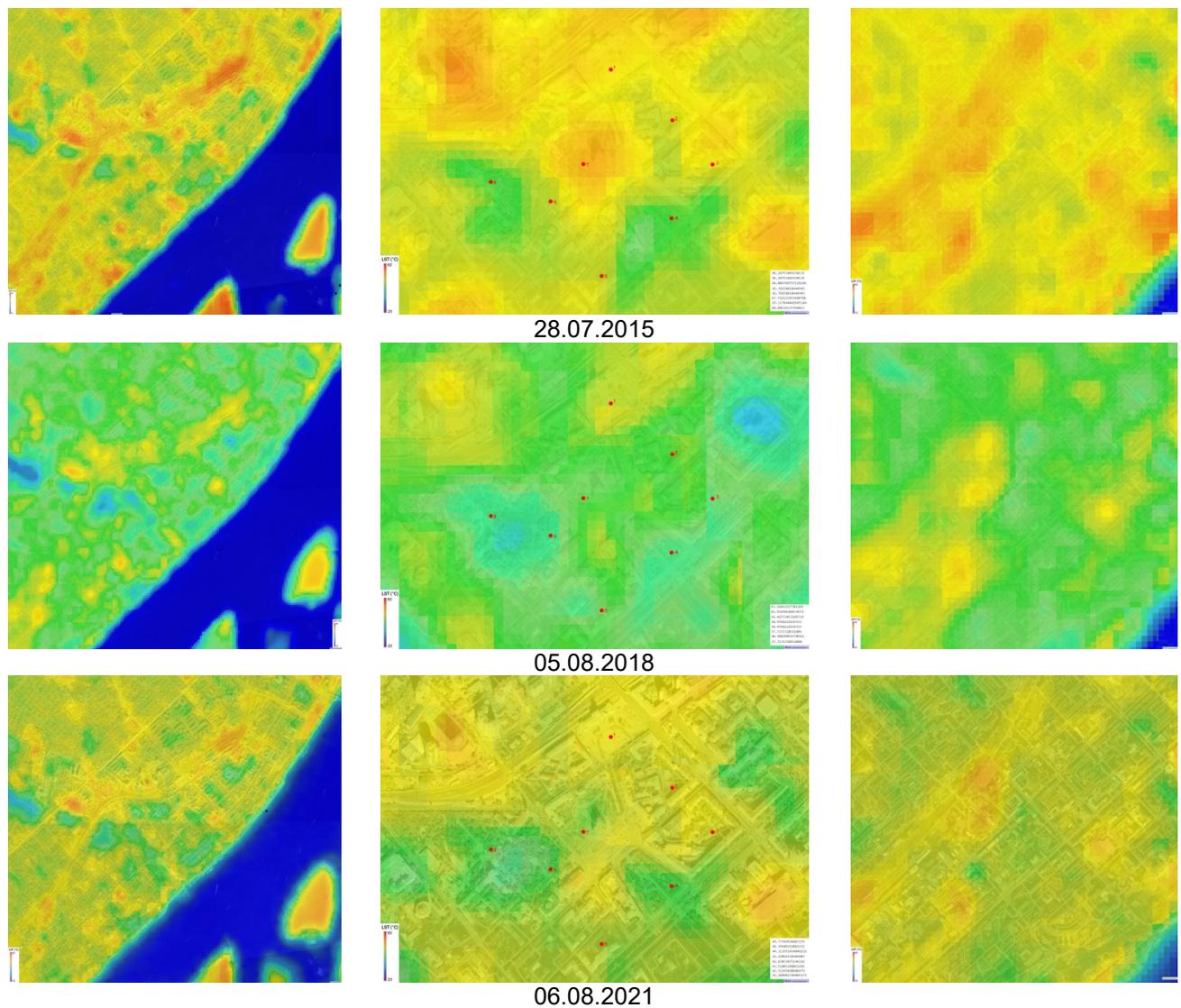
## 3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

### 3.1 Thermal Imaging analysis / Анализ тепловых изображений

Тепловые изображения города и его фрагментов в различные моменты времени представлены на рис. 5, 6.



**Fig. 5 – Thermal images of the study object (general view)**  
**Рис. 5 – Тепловые изображения объекта исследования (общий вид)**



**Fig. 6 – Thermal images of different territorial areas of the study object**  
**Рис. 6 – Тепловые изображения различных территориальных зон объекта исследования**

Анализ общих тепловых изображений показывает их высокую неоднородность.

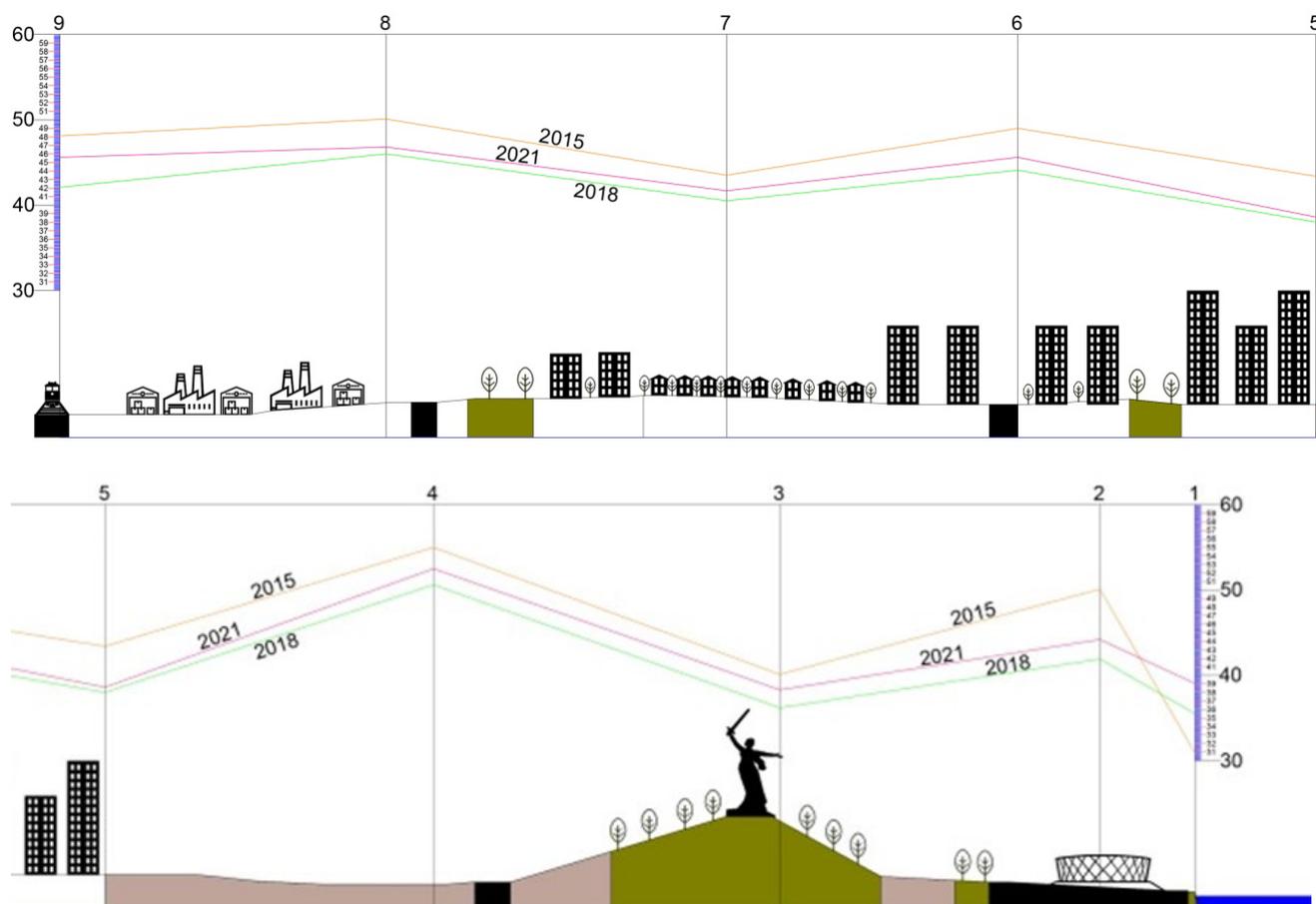


Минимальные значения температуры поверхности характерны для водных объектов (синий колер на рис. 5). Температура суши выше, чем водных поверхностей. Максимальные значения температуры характерны для открытых грунтовых поверхностей (красно-оранжевый колер на рис. 5), что можно объяснить высокой излучающей и поглощающей способностью грунта, а также его теплоаккумулирующими свойствами. Следовательно, открытые грунтовые поверхности могут внести значительный вклад в формирование городского теплового острова. Для смягчения теплового острова необходимы благоустройство и озеленение урбанизированных территорий. Поскольку городской тепловой остров определяется по суши, водные объекты в дальнейшем исключены из расчета.

Анализ детальных тепловых изображений позволяет конкретизировать температурный режим отдельных территориальных зон города (рис. 6).

Максимальные значения температуры отмечаются в общественно-деловых и производственных зонах, минимальные — в озелененных зонах. Озеленение территории смягчает тепловой режим вследствие солнцезащиты, транспирации и других факторов [16]. Из рис. 6 видно, что возможна локализация температуры на отдельных участках городской территории с образованием так называемых «тепловых фокусов». Тепловые фокусы повышают неоднородность температурного поля и усиливают эффект городского теплового острова.

На рис. 7 показаны температурные профили, построенные по линии сечения (см. рис. 4), в различные моменты времени. Температурные профили характеризуют тепловой ландшафт городской территории.



**Fig. 7 – Temperature profiles for the fragment of the study object**

**Рис. 7 – Температурные профили для фрагмента объекта исследования**

Из рис. 7 видно, что профили температур имеют характерные «впадины» и «холмы». Минимальные значения температуры характерны для прибрежных и озелененных частей города: набережной, Мамаева кургана, городского парка. Максимальные значения температуры отмечаются в зонах многоэтажной жилой застройки, промышленных предприятий, размещенных вдоль Волги, автомобильных дорог и магистралей, а также открытых грунтовых поверхностей.



Урбанизация может создавать не только тепловые острова, но и острова холода.

Известно, что к чемпионату мира по футболу 2018 года на берегу Волги был построен футбольный стадион международного класса «Волгоград Арена». Вместимость стадиона составляет 45 тыс. мест. В настоящее время сооружение является многофункциональным комплексом для проведения различных массовых мероприятий.

Размещение стадиона, как показывает анализ теплового ландшафта, создает «прохладную долину» (островок холода), поскольку фактическая спектральная излучательная способность бело-голубой вантово-мембранной кровли значительно меньше соответствующего значения, равного 0,97 для открытого грунта (рис. 8).



Fig. 8 – Volgograd Arena Stadium (general view)  
Рис. 8 – Стадион «Волгоград Арена» (общий вид)

Таким образом, излучательная способность почвенного покрытия имеет решающее значение для определения температуры земной поверхности. Выбор эффективных строительных материалов, конструкций и технологий, например, белых и зеленых крыш, играют важную роль при снижении температуры и смягчении городского острова теплоты.

### 3.2 Statistical analysis / Статистический анализ

По результатам статистической обработки определены минимальные ( $T_{\min}$ ), максимальные ( $T_{\max}$ ), средние ( $T_m$ ) значения температуры почвенного покрова в рассматриваемых территориальных зонах города в различные моменты времени и за весь период наблюдения. На основании смещенной оценки дисперсии вычислены значения стандартного отклонения ( $SD$ ) по формуле (5):

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}, \quad (5)$$

где  $n$  — объем выборки;  $x_i$  —  $i$ -й элемент выборки;  $x$  — среднее арифметическое выборки.

Результаты статистической обработки представлены в табл. 4.

Table 4. Statistical analysis  
Таблица 4. Статистический анализ

| Параметр | 28.07.2015 | 05.08.2018 | 06.08.2021 | За весь период |
|----------|------------|------------|------------|----------------|
|----------|------------|------------|------------|----------------|

|                                                                           | наблюдения |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|
| Жилая и общественно-деловая зоны (среднеэтажная и многоэтажная застройка) |            |       |       |       |
| $n$                                                                       | 12         | 12    | 12    | 36    |
| $T_{\min}$                                                                | 43,70      | 38,54 | 40,20 | 38,54 |
| $T_{\max}$                                                                | 47,49      | 44,80 | 46,43 | 47,49 |
| $T_m$                                                                     | 45,91      | 40,44 | 43,99 | 43,44 |
| $SD$                                                                      | 1,24       | 1,70  | 1,64  | 2,74  |
| Жилая зона малоэтажной застройки                                          |            |       |       |       |
| $n$                                                                       | 16         | 16    | 16    | 48    |
| $T_{\min}$                                                                | 39,60      | 35,30 | 39,50 | 35,30 |
| $T_{\max}$                                                                | 46,41      | 41,40 | 43,86 | 46,41 |
| $T_m$                                                                     | 43,57      | 39,37 | 42,38 | 41,77 |
| $SD$                                                                      | 1,40       | 1,37  | 1,25  | 2,22  |
| Производственная зона                                                     |            |       |       |       |
| $n$                                                                       | 18         | 18    | 18    | 54    |
| $T_{\min}$                                                                | 47,65      | 42,90 | 42,78 | 42,78 |
| $T_{\max}$                                                                | 54,55      | 51,40 | 53,94 | 54,55 |
| $T_m$                                                                     | 51,84      | 46,84 | 48,94 | 49,21 |
| $SD$                                                                      | 1,97       | 0,68  | 0,55  | 3,18  |
| Рекреационная зона                                                        |            |       |       |       |
| $n$                                                                       | 15         | 15    | 15    | 45    |
| $T_{\min}$                                                                | 37,43      | 30,13 | 35,99 | 30,13 |
| $T_{\max}$                                                                | 52,10      | 42,80 | 47,70 | 52,10 |
| $T_m$                                                                     | 44,56      | 37,10 | 41,92 | 41,19 |
| $SD$                                                                      | 4,01       | 2,87  | 3,21  | 4,59  |

Используя закон нормального распределения случайных величин (распределение Гаусса), функцию плотности вероятности можно определить по формуле (6):

$$F(T) = \frac{1}{(SD)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T - T_m)^2}{2(SD)^2}\right]. \quad (6)$$

Данные табл. 4 были использованы при вычислении функции плотности вероятности для рассматриваемых территориальных зон города за весь период наблюдения (рис. 9).

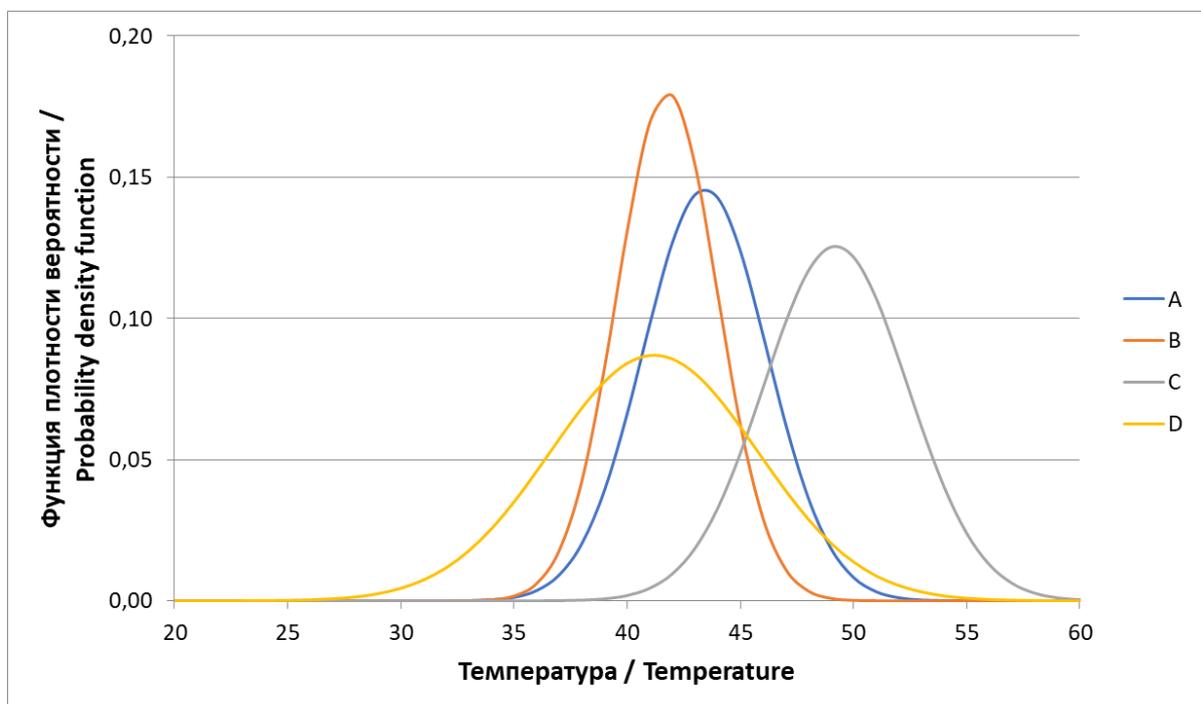


Fig. 9 – The probability density function with normal distribution for territorial zones of the city: A – mid-rise and high-rise buildings; B – low-rise buildings; C – industrial buildings; D – recreation



**Рис. 9 – Функция плотности вероятности при нормальном распределении для территориальных зон города: А – жилая и общественно-деловая зоны; В – жилая зона малоэтажной застройки; С – производственная зона; D – рекреационная зона**

Зависимость  $F(T)$ , определяемая формулой (6), имеет вид кривой хорошо известной колоколообразной формы (рис. 9). Острота пика определяется значением стандартного отклонения, при уменьшении  $SD$  пик сужается. Так, кривая  $B$  с более острым пиком для жилой зоны малоэтажной застройки, соответствует распределению температур с меньшим разбросом, чем кривая  $D$  для рекреационной зоны. Следовательно, максимальные вариации температуры имеют место в рекреационной зоне ( $41,19 \pm 9,18$  °С), минимальные вариации температуры — в жилой зоне малоэтажной застройки ( $41,77 \pm 4,44$  °С). Максимальный разброс значений температур для рекреационной зоны обусловлен применением различных видов деревьев, особенностями их посадки, плотностью кроны и другими факторами. Из рис. 9 видно, что заметный разброс температуры отмечается в интервале  $T_m - 2(SD) \leq T \leq T_m + 2(SD)$ , т.е. в пределах двух стандартных отклонений от среднего значения температуры в каждую сторону, при этом вероятность составляет около 95 %.

Таким образом, экспериментальные данные спутниковых тепловых изображений в целом адекватны и выводы, полученные по результатам малой выборки, можно с вероятностью 0,95 распространить на всю гипотетическую генеральную совокупность.

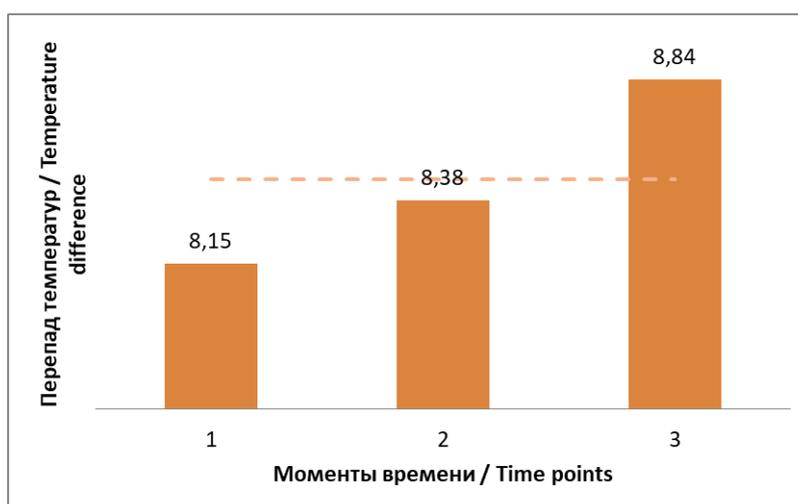
### 3.3 Identification of Urban Heat Island / Выявление городского теплового острова

На основании анализа тепловых изображений определены средние значения температуры исследуемой городской территории и за пределами города и по формуле (3) вычислена разность температур, характеризующая городской тепловой остров. Средняя температура городской территории определена в границах города (см. рис. 1). Средняя температура территории за пределами города найдена в зеленой зоне (пункт Краснослободск,  $48^{\circ}42'$  с. ш.  $44^{\circ}34'$  в. д.). Результаты расчета приведены в табл. 5.

**Table 5. Urban heat island performances for the object of research**  
**Таблица 5. Характеристики городского теплового острова объекта исследования**

| Календарная дата          | $T_{urb}$ , °С | $T_{rur}$ , °С | $\Delta T$ , К | Отклонение от среднего, % |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|
| 28.07.2015                | 46,35          | 38,20          | 8,15           | -3,76                     |
| 05.08.2018                | 39,62          | 31,24          | 8,38           | -0,95                     |
| 06.08.2021                | 43,74          | 34,90          | 8,84           | +4,42                     |
| За весь период наблюдения | 43,23          | 34,77          | 8,46           | 0,00                      |

Результаты табл. 5 наглядно представлены с помощью столбчатой диаграммы (рис. 10).



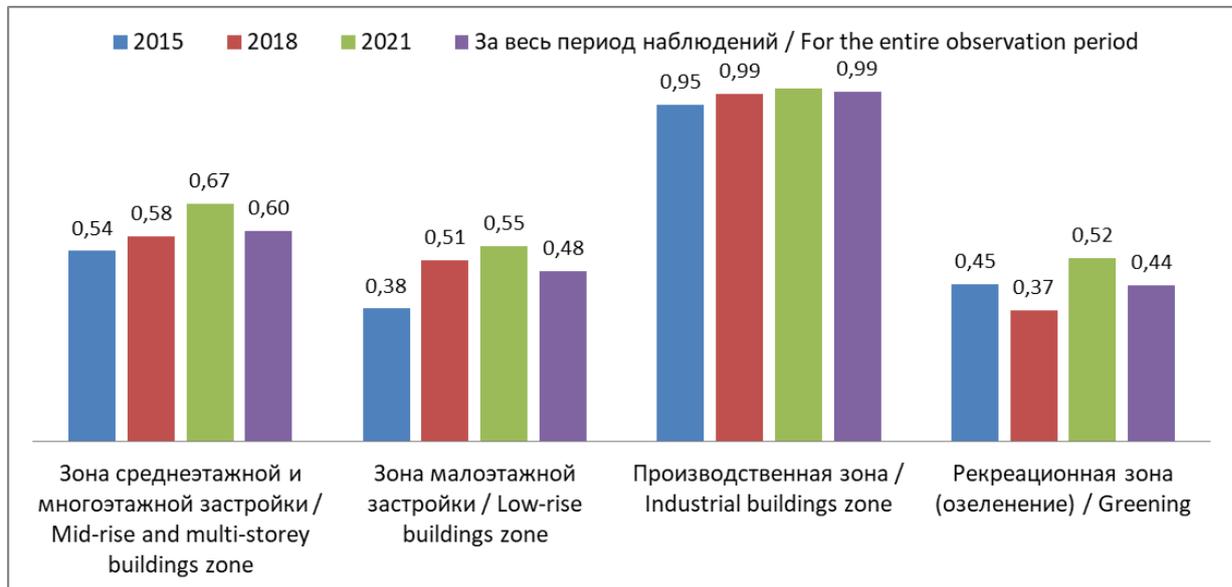
**Fig. 10 – Urban heat island ( $\Delta T$ , K): 1 – 28.07.2015; 2 – 05.08.2018; 3 – 06.08.2021 (the average value of  $\Delta T_m = 8.5$  K for the entire observation period is shown in dashed lines)**

**Рис. 10 – Городской тепловой остров ( $\Delta T$ , K): 1 – 28.07.2015; 2 – 05.08.2018; 3 – 06.08.2021 (пунктиром показано среднее значение  $\Delta T_m = 8,5$  К за весь период наблюдения)**



Из рис. 10 видно, что минимальное значение  $\Delta T_{\min} = 8,15$  К отмечается 28.07.2015, максимальное значение  $\Delta T_{\max} = 8,84$  К — 06.08.2021. Иными словами, в течение наблюдаемого периода происходит некоторый рост теплового острова города. Этот факт обусловлен, главным образом, урбанизацией и полностью согласуется с физикой процесса.

Для анализа теплового режима различных территориальных зон воспользуемся показателем относительной температуры  $\Theta$ . Этот показатель дает возможность уточнить и конкретизировать тепловой режим в отдельных точках города. Результаты расчета показателя  $\Theta$  представлены на рис. 11.



**Fig. 11 – Values of the relative temperature indicator for various territorial zones of the city**

**Рис. 11 – Значения показателя относительной температуры  $\Theta$  для различных территориальных зон города**

Согласно расчетам, проведенным по формуле (4), показатель  $\Theta$  варьируется в интервалах: 0,54–0,67 (зона среднеэтажной и многоэтажной застройки), 0,38–0,55 (зона малоэтажной застройки), 0,95–0,99 (производственная зона), 0,45–0,52 (рекреационная зона), при средних значениях 0,60, 0,48, 0,99 в 2015, 2018 и 2021 г.г. соответственно (см. рис. 11). Наименьшее значение  $\Theta_{\min} = 0,37$  отмечается для рекреационной зоны в 2018 г. В целом минимальные значения  $\Theta$  характерны для озелененной части города, максимальные — для производственной зоны. Следовательно, производственная зона дает максимальное тепловое загрязнение. Показатели  $\Theta$  зоны малоэтажной застройки и рекреационной зоны близки между собой, что указывает на некоторое сходство теплотехнических показателей этих территорий. Показатель относительной температуры для зоны среднеэтажной и многоэтажной застройки выше, чем для малоэтажной застройки, что объясняется более высокой теплоаккумулирующей способностью многоэтажных зданий и прилегающих к ним территорий.

Для верификации полученных результатов воспользуемся данными [39]. В этой работе по результатам прямых натурных измерений в климатических условиях г. Гетеборга (Швеция) установлена линейная регрессионная зависимость между перепадом температур  $\Delta T$  и коэффициентом видимости небосвода SVF [39]:

$$\Delta T(\text{SVF}) = -10,462 \cdot \text{SVF} + 11,155. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что при  $\text{SVF} = 0,3$  (плотная городская застройка)  $\Delta T_s = 8,0$  К. Следовательно, полученные значения  $\Delta T$  хорошо согласуются с данными работы [39] (относительное отклонение +4,9%), что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Согласно имеющимся данным [24] для г. Гуанчжоу (Южный Китай) средние значения показателя, аналогичного  $\Theta$ , равны 0,38, 0,39, 0,43, 0,46 в 1990, 2000, 2005, и 2009 г.г. соответственно. Следовательно, полученные в данном исследовании результаты и данные



китайских ученых Y. Xiong и др. [24] также хорошо согласуются между собой.

### 3.4 Assessment of urban thermal quality / Оценка теплотехнического качества города

Используя рассмотренную выше методику, оценим теплотехническое качество города (табл. 6).

**Table 6. Element-by-element evaluation of urban thermal quality (before the line – severity of the thermal island, after the line – urban zone thermal quality)**  
**Таблица 6. Поэлементная оценка теплотехнического качества города (до черты – выраженность теплового острова, после черты – теплотехническое качество территориальной зоны)**

| Зона                                        | 28.07.2015 | 05.08.2018 | 06.08.2021 | За весь период наблюдения |
|---------------------------------------------|------------|------------|------------|---------------------------|
| Зона среднеэтажной и многоэтажной застройки | У/У        | У/У        | В/Н        | В/Н                       |
| Зона малоэтажной застройки                  | Н/В        | У/У        | У/У        | У/У                       |
| Производственная зона                       | ОВ/ОН      | ОВ/ОН      | ОВ/ОН      | ОВ/ОН                     |
| Рекреационная зона                          | У/У        | Н/В        | У/У        | У/У                       |

Из табл. 6 видно, что указанные характеристики меняются с течением времени. Поэтому полученные результаты позволяют определить влияние урбанизации на процесс образования локальных тепловых островов и выполнить поэлементную оценку теплотехнического качества города. Например, если в 2015 и 2018 г.г. в зоне среднеэтажной и малоэтажной застройки тепловой остров был выражен умеренно («У»), умеренное теплотехническое качество городской среды («У»), то в 2021 году — соответственно «С» (сильная выраженность теплового острова) и «Н» (низкое теплотехническое качество). В зоне малоэтажной застройки в 2015 году тепловой остров имел слабую выраженность («СЛ»), высокое теплотехническое качество («В»), однако в 2018 и 2021 г.г. соответствующие характеристики несколько ухудшились до умеренных («У»). Следовательно, процесс урбанизации привел к некоторому росту тепловых аномалий и ухудшению теплотехнического качества в данной территориальной зоне. Для производственных территорий, имеющих низкую степень благоустройства, большую долю темных поверхностей и высокую теплоаккумулирующую способность ограждающих конструкций зданий, в течение всего периода наблюдения характерно сохранение негативных показателей: очень высокой («ОС») выраженности городского теплового острова и очень низкого («ОН») теплотехнического качества городской среды. Сравнительно высокая изменчивость характеристик с течением времени для рекреационной зоны связана, главным образом, с изменением доли озеленения городской территории.

Стратегии смягчения городского теплового острова включают комплекс архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерно-технических мер [2]. Город должен иметь гуманную планировку, исключая образование тепловых ловушек — городских каньонов и «человейников». Конфигурация здания в плане, ориентация и взаимное расположение строений должны обеспечивать требуемую продолжительность инсоляции, а также надежную защиту от светового и теплового дискомфорта в условиях жаркого климата. Для улучшения городского микроклимата рекомендуется озеленение и обводнение внутриквартальных территорий и скверов в виде газонов, кустарников, вьющихся деревьев с густыми широкими кронами, фонтанов. Помещения зданий должны иметь наружную регулируемую солнцезащиту. Для снижения воздействия солнечной радиации на городской микроклимат, строительную оболочку и помещения эффективно применение белых и особенно зеленых крыш [16], [40].

## 4 Conclusions / Заключение

По результатам проведенного исследования сформулированы следующие **выводы**:

1. Объектом исследования является г. Волгоград (48°42'42" с. ш. 44°30'50" в. д.) — мегаполис, расположенный на юго-востоке европейской части России. Волгоград представляет собой линейный город, расположенный вдоль Волги длиной 65–70 км и шириной около 5 км. Климат умеренно-континентальный, засушливый (согласно



- международной классификации климата Köppen — тип «Dfa»). Анализ климатических данных подчеркивает необходимость изучения проблемы идентификации городского теплового острова в летний период.
2. Для измерения температуры растительного покрытия были использованы данные спутника Landsat 8. Спутниковые снимки были приобретены на различные календарные даты: 28.07.2015, 05.08.2018 и 06.08.2021 (около 10 ч 00 мин утра). Расчет температуры растительного покрытия выполнен в различных территориальных зонах города: жилой и общественно-деловой (среднеэтажной и многоэтажной застройки), жилой малоэтажной застройки, производственной, рекреационной. Анализ тепловых изображений выполнен методом сечений. Предложен показатель относительной температуры, на основе которого установлены градации степени выраженности городского теплового острова, необходимые для поэлементной оценки теплотехнического качества городской среды.
  3. По результатам статистической обработки установлено, что экспериментальные данные спутниковых тепловых изображений в целом адекватны и выводы, полученные по результатам малой выборки, можно с вероятностью 0,95 распространить на всю гипотетическую генеральную совокупность.
  4. Идентифицирован городской тепловой остров (перепад температуры 8,5 К) для рассматриваемого объекта исследования. Показано, что излучательная способность почвенного покрытия имеет решающее значение для определения температуры поверхности. Выбор эффективных строительных материалов, конструкций и технологий, например, белых и зеленых крыши, играют важную роль при снижении температуры и смягчении городского теплового острова. Производственная зона дает максимальное тепловое загрязнение. Повышение температуры в зоне среднеэтажной и многоэтажной застройки объясняется более высокой теплоаккумулирующей способностью многоэтажных зданий и прилегающих к ним территорий.
  5. Верификация полученных результатов показала их согласованность с имеющимися в научной литературе данными, что подтверждает достоверность проведенных исследований.
  6. Процесс урбанизации усиливает эффект образования городского теплового острова и снижает теплотехническое качество городской среды. Стратегии смягчения городского теплового острова должны включать комплекс архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерно-технических мер. Дальнейшие исследования будут посвящены вопросам математического моделирования сложных процессов нестационарного тепло- и массообмена городских территорий с учетом различных метеорологических параметров (солнечного излучения, температуры, скорости ветра и др.) для оценки феномена городского теплового острова и разработки конкретных предложений по его смягчению в жаркий период года.

## References

1. Kalamees, T., Jylhä, K., Tietäväinen, H., Jokisalo, J., Ilomets, S., Hyvönen, R., Saku, S. Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the en ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings*. 2012. 47. Pp. 53–60. DOI:10.1016/j.enbuild.2011.11.031.
2. Korniyenko, S., Dikareva, E. Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review. 2021. (1605). DOI:10.34910/ALF.16.5.
3. Souch, C., Grimmond, S. Applied climatology: Urban climate. *Progress in Physical Geography*. 2006. 30(2). Pp. 270–279. DOI:10.1191/0309133306pp484pr. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1191/0309133306pp484pr> (date of application: 4.06.2021).
4. Tian, P., Li, J., Cao, L., Pu, R., Wang, Z., Zhang, H., Chen, H., Gong, H. Assessing spatiotemporal characteristics of urban heat islands from the perspective of an urban expansion and green infrastructure. *Sustainable Cities and Society*. 2021. 74(August). Pp. 103208. DOI:10.1016/j.scs.2021.103208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103208>.
5. Estoque, R.C., Murayama, Y., Myint, S.W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*. 2017. 577. Pp. 349–359. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.10.195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195>.



- <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195>.
6. Hassan, T., Zhang, J., Prodhan, F.A., Pangali Sharma, T.P., Bashir, B. Surface urban heat islands dynamics in response to lulc and vegetation across south asia (2000–2019). *Remote Sensing*. 2021. 13(16). Pp. 1–24. DOI:10.3390/rs13163177.
  7. Dewan, A., Kiselev, G., Botje, D., Mahmud, G.I., Bhuian, M.H., Hassan, Q.K. Surface urban heat island intensity in five major cities of Bangladesh: Patterns, drivers and trends. *Sustainable Cities and Society*. 2021. 71(March). Pp. 102926. DOI:10.1016/j.scs.2021.102926. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102926>.
  8. Mathew, A., Khandelwal, S., Kaul, N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. *Energy and Buildings*. 2018. 159. Pp. 271–295. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.10.062. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062>.
  9. Choudhury, D., Das, K., Das, A. Assessment of land use land cover changes and its impact on variations of land surface temperature in Asansol-Durgapur Development Region. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2019. 22(2). Pp. 203–218. DOI:10.1016/j.ejrs.2018.05.004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.004>.
  10. Kim, S.W., Brown, R.D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of the Total Environment*. 2021. 779. Pp. 146389. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.146389. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>.
  11. Vatin, N., Korniyenko, S. V. Magazine of Civil Engineering Energy performance of buildings made of textile-reinforced concrete (TRC) sandwich panels. 2022. 113(11303). DOI:10.34910/MCE.113.3.
  12. Santamouris, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*. 2014. 103. Pp. 682–703. DOI:10.1016/j.solener.2012.07.003.
  13. Bokaie, M., Zarkesh, M.K., Arasteh, P.D., Hosseini, A. Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society*. 2016. 23. Pp. 94–104. DOI:10.1016/j.scs.2016.03.009. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.009>.
  14. Stević, D., Hut, I., Dojčinović, N., Joković, J. Automated identification of land cover type using multispectral satellite images. *Energy and Buildings*. 2016. 115. Pp. 131–137. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.011.
  15. Qin, L., Yan, C., Yu, L., Chai, M., Wang, B., Hayat, M., Shi, Z., Gao, H., Jiang, X., Xiong, B., Mao, P., Qiu, G.Y. High-resolution spatio-temporal characteristics of urban evapotranspiration measured by unmanned aerial vehicle and infrared remote sensing. *Building and Environment*. 2022. 222(July). Pp. 109389. DOI:10.1016/j.buildenv.2022.109389. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109389>.
  16. Korniyenko, S. Advantages, limitations and current trends in green roofs development . A review. 2021. (2002). DOI:10.57728/ALF.20.2.
  17. Ayanlade, A. Seasonality in the daytime and night-time intensity of land surface temperature in a tropical city area. *Science of the Total Environment*. 2016. 557–558. Pp. 415–424. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.03.027. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.027>.
  18. Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjosif, A., Comby, J. Evaluation of the effect of urban redevelopment on surface urban heat islands. *Remote Sensing*. 2019. 11(3). Pp. 1–31. DOI:10.3390/rs11030299.
  19. Oke, T.R. Urban climates and global environmental change. *Applied Climatology: Principles and Practice*. Taylor and Francis, 2013. Pp. 273–287.
  20. Aslam, A., Rana, I.A., Bhatti, S.S. The spatiotemporal dynamics of urbanisation and local climate: A case study of Islamabad, Pakistan. *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. 91(August). Pp. 106666. DOI:10.1016/j.eiar.2021.106666. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106666>.
  21. Dochev, I., Gorzalka, P., Weiler, V., Estevam Schmiedt, J., Linkiewicz, M., Eicker, U., Hoffschmidt, B., Peters, I., Schröter, B. Calculating urban heat demands: An analysis of two modelling approaches and remote sensing for input data and validation. *Energy and Buildings*. 2020. 226. Pp. 110378. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110378. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110378>.



22. Wang, Y., Berardi, U., Akbari, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*. 2016. 114. Pp. 2–19. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.046. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>.
23. Chakraborty, T., Lee, X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. 74(May 2018). Pp. 269–280. DOI:10.1016/j.jag.2018.09.015. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>.
24. Xiong, Y., Huang, S., Chen, F., Ye, H., Wang, C., Zhu, C. The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment: A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China. *Remote Sensing*. 2012. 4(7). Pp. 2033–2056. DOI:10.3390/rs4072033.
25. Al-Obaidi, I., Rayburg, S., Pórolniczak, M., Neave, M. Assessing the Impact of Wind Conditions on Urban Heat Islands in Large Australian Cities. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. 22(11). Pp. 1–15. DOI:10.12911/22998993/142967.
26. Despini, F., Ferrari, C., Bigi, A., Libbra, A., Teggi, S., Muscio, A., Ghermandi, G. Correlation between remote sensing data and ground based measurements for solar reflectance retrieving. *Energy and Buildings*. 2016. 114. Pp. 227–233. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.018. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.018>.
27. Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I.R., Powell, F.E., Geronimo, R.C., Bielecki, C.R., Counsell, C.W.W., Dietrich, B.S., Johnston, E.T., Louis, L. V., Lucas, M.P., Mckenzie, M.M., Shea, A.G., Tseng, H., Giambelluca, T.W., Leon, L.R., Hawkins, E., Trauernicht, C. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*. 2017. 7(7). Pp. 501–506. DOI:10.1038/nclimate3322.
28. Halder, B., Bandyopadhyay, J., Banik, P. Monitoring the effect of urban development on urban heat island based on remote sensing and geo-spatial approach in Kolkata and adjacent areas, India. *Sustainable Cities and Society*. 2021. 74(March). Pp. 103186. DOI:10.1016/j.scs.2021.103186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103186>.
29. Korniyenko, S. V. The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 114(11412). DOI:10.34910/MCE.114.12.
30. Oke, T.R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere*. 1976. 14(4). Pp. 268–277. DOI:10.1080/00046973.1976.9648422.
31. Farhan, M., Moazzam, U., Hoi, Y., Gul, B. Impact of urbanization on land surface temperature and surface urban heat Island using optical remote sensing data : A case study of Jeju Island , Republic of Korea. *Building and Environment*. 2022. (July). Pp. 109368. DOI:10.1016/j.buildenv.2022.109368. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109368>.
32. Oke, T.R. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*. 1988. 12(4). Pp. 471–508. DOI:10.1177/030913338801200401.
33. Avdan, U., Jovanovska, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*. 2016. 2016. DOI:10.1155/2016/1480307.
34. Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., C.E., W., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z.P., Lymburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H., Zhu, Z. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*. 2014. 145. Pp. 154–172. DOI:10.1016/j.rse.2014.02.001. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
35. Howard, L. *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations*. 2012. DOI:10.1017/CBO9781139226905. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-of-london/24712EF9A0B8911D896CAF0CC5224269> (date of application: 5.06.2021).
36. Tepanosyan, G., Muradyan, V., Hovsepyan, A., Pinigin, G., Medvedev, A., Asmaryan, S. Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia. *Building and Environment*. 2021. 187(October 2020). Pp. 107390. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107390>.
37. Rehan, R.M. Cool city as a sustainable example of heat island management case study of the coolest city in the world. *HBRC Journal*. 2016. 12(2). Pp. 191–204. DOI:10.1016/j.hbrj.2014.10.002. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.10.002>.



38. Priyadarsini, R., Hien, W.N., Wai David, C.K. Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar Energy*. 2008. 82(8). Pp. 727–745. DOI:10.1016/j.solener.2008.02.008.
39. Svensson, M.K. Sky view factor analysis - Implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*. 2004. 11(3). Pp. 201–211. DOI:10.1017/S1350482704001288.
40. Korniyenko, S. Progressive Trend in Adaptive Façade System Technology . A Review. 2021. (1902). DOI:10.57728/ALF.19.2.