

Проблемы выявления теплового острова в крупнейшем городе (пример Екатеринбурга)*

Гущин А.Н., Дивакова М.Н.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный архитектурно-художественный университет им. Н.С. Алфёрова»
г. Екатеринбург, Российская Федерация
alexanderNG@yandex.ru, divakovamar@yandex.ru

Аннотация. Проблема теплового острова становится все более актуальной по мере обострения климатической повестки. Более того, проблема уже вышла на уровень нормативных документов. Авторы рассматривают проблему на примере одного из крупнейших городов – Екатеринбурга. Вначале авторы проводят критический анализ существующих методик и наборов данных для выявления теплового острова. В результате критического анализа авторы приходят к выводу о том, как само понятие теплового острова, так и методы его локализации в настоящее время не достаточны для выполнения нормативных требований. По мнению авторов необходимо решать задачу проектирования системы постов наблюдений для мониторинга теплового острова.

Ключевые слова: тепловой остров, данные дистанционно-зондирования, крупнейший город.

ВВЕДЕНИЕ

Городской остров тепла (UHI - Urban Heat Island, часто SUHI -Surface Urban Heat Island) - явление, при котором температура в городских зонах превышает температуру в окружающих негородских районах, есть результат антропогенных изменений окружающей среды. В практическом плане проблема особенно сильно проявилась в быстро растущих городах Индии, Китая, Нигерии на долю которых, по прогнозам, придется 35% мирового прироста городского населения в период с 2018 по 2050 год [1]. Китай имеет вообще самый высокий процент урбанизированных территорий. Данные обстоятельства обусловили и интенсивность научного изучения феномена теплового острова.

Целью настоящей статьи является критический анализ данных и выявления особенностей расчета пространственной конфигурации теплового острова на примере крупнейшего города.

СОСТОЯНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ ТЕПЛОвого Острова

Строгое определение понятия «тепловой остров» на сегодняшний день не существует. Обычно под тепловым островом понимают пространственно локализованную территорию в районе городского центра, в которой наблюдается более высокая температура по сравнению с окраинами города.

Обзор научных работ в данной области можно найти в обзоре D. Zhou с соавторами [2]. Основные механизмы формирования тепловых островов выявлены в работе T.R. Oke [3]. В этой работе описывается энергетический баланс городских территорий, объясняется, как замена естественных поверхностей на искусственные материалы (асфальт,

бетон) приводит к увеличению поглощения и удержания тепла. В исследовании A.J. Arnfield обобщаются результаты исследований за 20 лет, при этом уделяя внимание роли турбулентности, энергообмена и влажности в формировании UHI [4]. Влияние тепловых островов на здоровье человека исследовано в работах J.A. Patz с соавторами [5] и S.L. Harlan с соавторами [6]. В первом исследовании авторы изучают как UHI усиливает риски для здоровья, включая тепловые удары и обострение сердечно-сосудистых заболеваний. Во втором исследовании авторы показывают, как социально-экономические факторы влияют на подверженность населения тепловому стрессу в условиях UHI. В отечественной литературе одно из наиболее подробных и тщательных исследований проведено Н.И. Кузнецовой с соавторами [7].

В России проблема теплового острова из теоретической плоскости перешла в практическую. Переход связан с внедрением новых методов территориального планирования – с переходом к мастер-планированию. В национальном стандарте по разработке мастер-планов тепловой остров указан как проблема такой категории городов как межрегиональные центры [8]. Даже указывается конкретное значение - 1,3 °C как средняя разница температур между самым жарким сектором города и ближайшим за городом. В стандарте указано, что расчет сделан КБ Стрелка по методике Йельского университета [9].

МЕТОДИКИ И НАБОРЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Наиболее распространенный способ изучения теплового острова заключается в анализе и изучении данных дистанционного зондирования. (космических снимков в определенных диапазонах спектра). Для Екатеринбурга пространственную локализацию теплового острова на основе влияния растительности выполняли авторы [10].

Отметим, что непосредственно спутник температуру поверхности измерять не может, он измеряет интенсивность теплового излучения (яркостную температуру). Для пересчет яркостной температуры в температуру реальную используется модель черного тела. Яркостная температура – температура абсолютно чёрного тела, при которой для данной длины волны (частоты, волнового числа) оно имеет ту же спектральную плотность энергетической яркости, что и рассматриваемый тепловой излучатель [11]. Абсолютно чёрное тело (АЧТ) – идеализированный объект, под которым понимается гипотетическое тело, способное полностью поглощать всё падающее на него излучение, какова бы ни была длина волны этого излучения.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Экология и техноферная безопасность", <https://rusecocon.ru>

Безусловно, что материал реальной поверхности в городе не является абсолютно черным телом в силу наличия альbedo – отражательной способности. Следовательно, материалы дистанционного зондирования необходимо корректировать. Корректировка также происходит для удаления атмосферных эффектов и отраженных от других предметов тепловых лучей.

Наборы данных дистанционного зондирования доступны для широкого круга пользователей. Первый из общедоступных наборов данных поддерживается Европейским космическим агентством (ESA) и доступен с помощью браузера EO Browser [12].

Набор данных браузера содержит коллекцию снимков спутников Sentinel-3. Спутник имеет на борту комбинацию различных приборов, в числе которых радиометр температуры поверхности моря и суши (SLSTR). Доступность данных: с мая 2016 года и далее. Прибор измеряет глобальную и региональную температуру поверхности моря и суши. SLSTR охватывает видимую, коротковолновую инфракрасную и тепловую инфракрасную области электромагнитного спектра. Пространственное разрешение 1 км для теплового инфракрасного диапазона (то есть видны только детали размером более 500 м и 1 км соответственно). Прибор использует два канала измерения температуры поверхности (F1 и F2) Канал F1 используется во многих приложениях, в частности, для измерения температуры поверхности земли [13], в том числе для климатических данных.

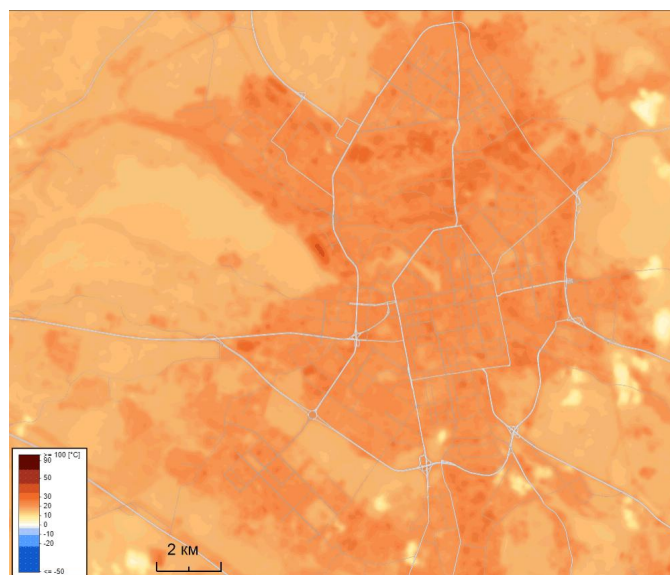
В наборе данных также содержится коллекция снимков Landsat 8-9, которая содержит снимки с двух самых последних запущенных спутников Landsat (Landsat 8 и Landsat 9). На спутниках установлены оперативный наземный тепловизор (OLI) и тепловой инфракрасный датчик (TIRS) с 9 оптическими и 2 тепловыми диапазонами. Эти два датчика обеспечивают сезонный охват всей территории земного шара. Пространственное разрешение в тепловых диапазонах 100 м. Коллекция снимков L2 предоставляет результаты глобальной оценки коэффициента отражения поверхности и температуры поверхности (готовые данные для анализа CEO). Снимки подвергаются дополнительной обработке и включают необходимые для создания научно обоснованного продукта. На рис. 1 видны лакуны – места, где невозможно установить точное значение температуры поверхности. В пространственном отношении рис. 1, а и рис. 1, б имеют схожую конфигурацию.

Еще один набор спутниковых данных содержится в наборе данных портала Google Earth Engine [14]. Портал содержит разнообразные наборы данных, а также набор скриптов для анализа.

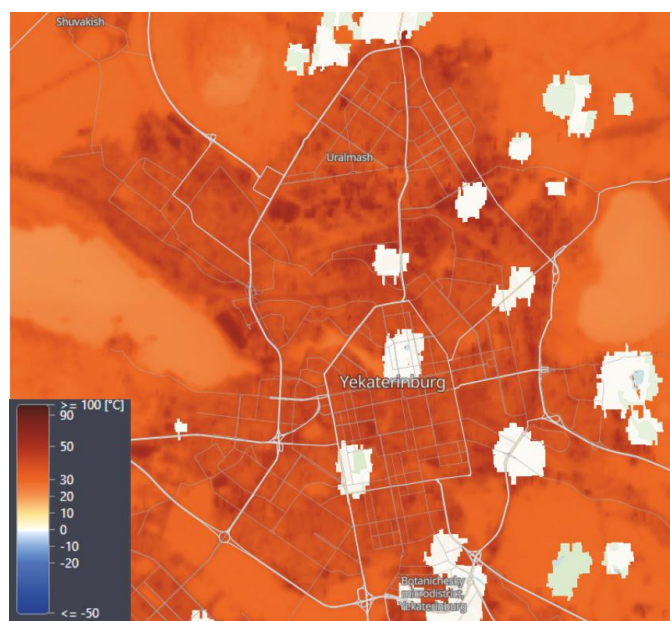
КАЛИБРОВКА С ПОМОЩЬЮ МЕТЕОДАНЫХ

Как правило, крупнейшие города имеют расположенную в городе метеостудию (сеть метеостудий). Метеостудии представляют прямые данные по температуре, погоде и климату. В Екатеринбурге имеется единственная метеостудия, расположенная в районе «метеогорка».

Метеостудия основана знаменитым немецким ученым Александром фон Гумбольдтом, посетившим Екатеринбург в 1829 году. Метеостанция производит наблюдения за климатом, изучает режим рек, проводит актинометрические и аэрологические исследования в Екатеринбурге и его окрестностях [15].



а



б

Рис. 1. Температура поверхности Екатеринбурга на 08.03.2024, измеренная:

а – прибором SLSTR (канал F1);

б – прибором TIRS (канал L2).

Прямые данные по температуре удобно использовать для сравнения и калибровки спутниковых данных. Прямые данные по температуре удобно использовать для сравнения и калибровки спутниковых данных. На рис. 2 представлена температура за всю историю наблюдений на метеостанции. На рисунке видно отчетливо выраженный тренд на повышение температуры. Учитывая наличие линейного тренда на повышение температуры, рис. 2 можно рассматривать как предпосылку (косвенное подтверждение) тенденции к образованию теплового острова. Оцененная скорость повышения температуры 0,004 градуса в год. Следует также отметить высокую вариативность данных по температуре, которая показывает сложность проблемы определения и фиксации теплового острова. Дан-

ные метеостанции будут служить опорными данными для сравнения с данными по температуре поверхности, получаемых со спутника.

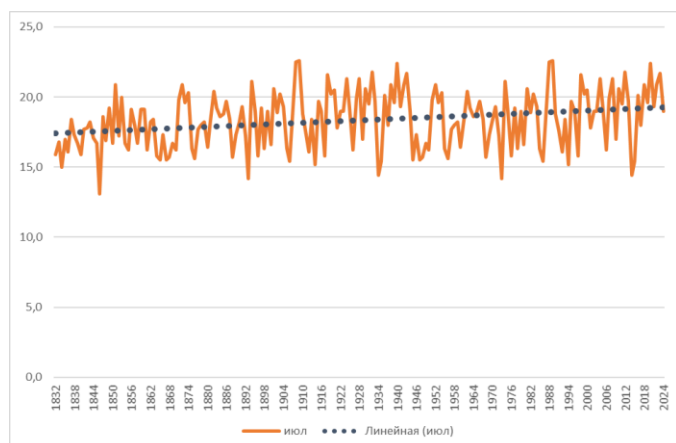


Рис. 2. Температура в городе по данным метеостанции

Сравнение данных дистанционного зондирования выполнялось следующим образом: в интерактивном режиме в браузере EO Browser была установлена точка отсчета – наблюдательный пост метеостудии (620990, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Народной Воли, 64). Был выбран спутник Sentinel-8 и набор данных для измерения температуры поверхности моря и суши (SLSTR). Далее по датам выбиралось локальное значение температуры поверхности. В результате получена следующая таблица. Расшифровка граф:

F1 – температура поверхности по данным прибора SLSTR, канал F1 (град С.);

MU – утренняя температура по данным метеостанции;

F1 – MU – разность температур;

MB – вечерняя температура по данным метеостанции;

F1 – MB – разность температур.

Таблица 1

Даты наблюдений	Данные по температуре (град С)				
	F1	MU	F1-MU	MB	AI-BB
01.07.2024	36,07	33	3,07	22	14,07
02.07.2024	28,89	28	0,89	25	3,89
03.07.2024	37,4	26	11,40	27	10,40
04.07.2024	38,8	29	9,80	28	10,80
05.07.2024	42,4	31	11,40	28	14,40
06.07.2024	31,3	25	6,30	21	10,30
07.07.2024	41,15	27	14,15	25	16,15
08.07.2024	38,72	29	9,72	28	10,72
09.07.2024	32,46	33	-0,54	31	1,46
10.07.2024	37	34	3,00	36	1,00
11.07.2024	25	35	-10,00	36	-11,00
12.07.2024	11,59	34	-22,41	25	-13,41
13.07.2024	23,81	21	2,81	22	1,81
14.07.2024	36,74	15	21,74	16	20,74
15.07.2024	25,25	14	11,25	13	12,25
16.07.2024	31,54	16	15,54	16	15,54
17.07.2024	34,91	20	14,91	15	19,91
18.07.2024	0,52	20	-19,48	17	-16,48

Как показывают данные табл. 1 имеется существенная разница между температурой поверхности и температурой, измеряемой метеостанцией. Источник разности понятен: измеряется температура разных объектов – температура поверхности и температура воздуха, прилежащего к поверхности. Физика процесса заключается в том, нагретая поверхность нагревает воздух путем теплообмена и конвекции. Имеется значительная изменчивость – разница температур может достигать 20 градусов. Далее была выполнена проверка нормальности распределения разности температур между температурой канала F1 и утренней температурой по данным местостанции. Проверка проводилась с помощью критерия асимметрии и эксцесса [16]. Расчетное значение асимметрии -1,13, ошибка репрезентативности асимметрии 0,56. Расчетное значение эксцесса распределения 1,09, ошибка репрезентативности эксцесса распределения 1,12. Распределение разности температур канала F1 и утренней температуры удовлетворяет критерию нормальности. Аналогичная проверка была сделана для разности температур канала F1 и вечерней температуры. Нормальность распределения является признаком того, что отклонения от среднего значения обусловлены случайными процессами. Среднее значение разности температур для первого распределения 4,64 С, для второго 6,81. Ненулевое среднее значение является признаком наличия систематических различий. Причем величина любого из средних больше, чем оценка разницы температур между центром и окраинами, приводящаяся в стандарте мастер-плана от ВТБ (1,5 град).

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО ОСТРОВА

Пространственную локализацию теплового острова можно получить несколькими способами.

На рис. 3 и 4 приведены карты теплового острова, выполненные сервисом The Global Surface UNI Explorer, работающего по методике Йельского университета. На рис. 3 представлена конфигурация «летний день», на рис. 4 – конфигурация «летняя ночь». Слева внизу – температурная шкала в градусах Цельсия. Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что пространственная конфигурация теплового острова может достаточно сильно отличаться между собой.

Сравнивая между собой три представленных рисунка, убеждаемся, что точная локализация теплового острова – вопрос открытый. Локализация зависит от использованного набора данных дистанционного зондирования, от методики обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящее время под тепловым островом понимают достаточно неопределенный феномен: когда температура в городской местности значительно выше, чем в окружающих сельских районах. Как видим из представленных результатов следует, что на современном этапе невозможно выполнить нормативные требования, заложенные в стандартах по созданию мастер-плана. В приведенных примерах авторы хотели показать, что требования слишком размыты для того, чтобы приступить к мероприятиям по устранению теплового острова.

Для управления тепловым островом существует несколько проблем.

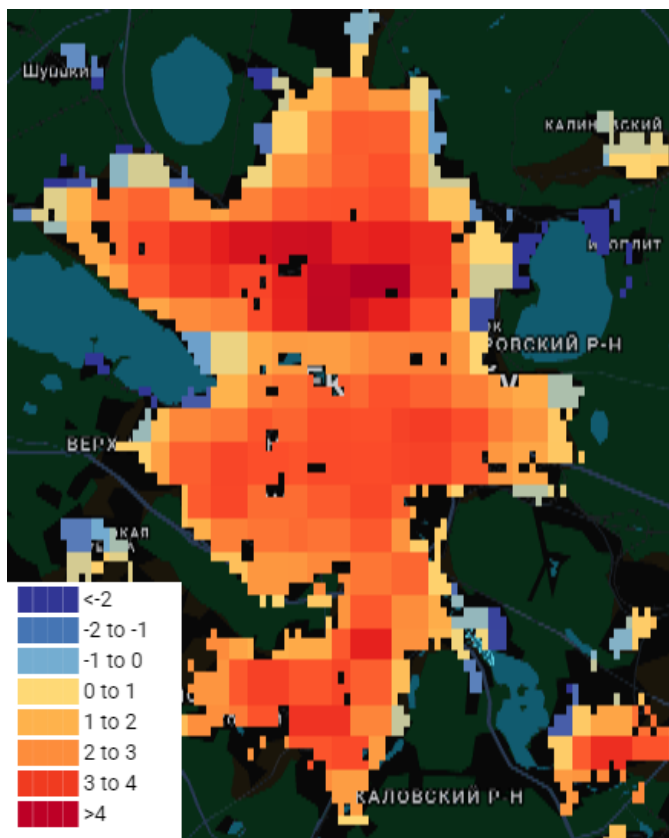


Рис. 3. Конфигурация теплового острова «Летний день»

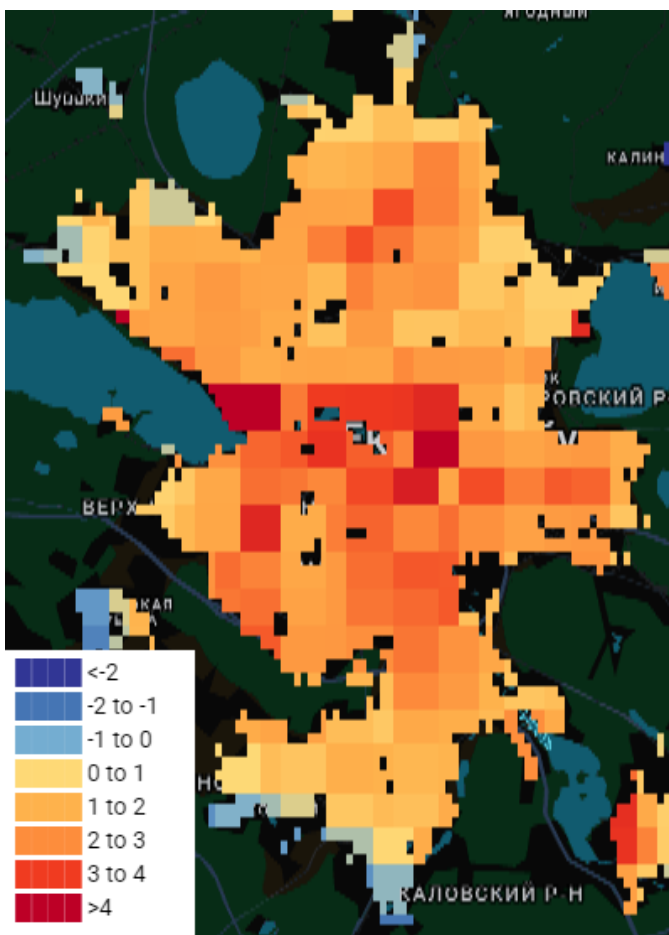


Рис. 4. Конфигурация теплового острова «Летняя ночь»

Проблема первая – индикация теплового острова

Для корректного определения теплового острова необходима надежная индикация. Существует по крайней мере три температуры, которые можно использовать для индикации теплового острова:

- температура поверхности земли, замеряемая по данным дистанционного зондирования; недостатки данного подхода авторы отмечали выше – спутник не может непосредственно измерять температуру, фактически он измеряет интенсивность теплового излучения от поверхности, поэтому расчеты температуры будут иметь модельный характер;
- температура воздуха, замеряемая постами метеонаблюдений; этот метод также не свободен от недостатков, например, согласно детальному исследованию, проведенному И.Н.Кузнецовой с соавторами по городу Москве, часть постов метеонаблюдений расположена в зоне локальных микроклиматических особенностей, влияющих на результаты наблюдений [7];
- эффективная (ощущаемая) температура, которая вычисляется по метеорологическим данным, использующим температуру, давление и влажность [17]; ощущаемая температура — это климатический индекс, который описывает, как человек воспринимает температуру окружающей среды с учетом дополнительных факторов, таких как влажность, скорость ветра и солнечная радиация; проблема в том, что результирующая конфигурация теплового острова будет зависеть от этих характеристик;
- комплексный подход, который заключается в построении совокупного индекса на основе всех вышеприведенных температур.

Проблема вторая – локализация теплового острова

Распространенным методом оценки локализации теплового острова является усреднение данных. Поставить под сомнение усреднение как методику можно на основании рис. 2. Если усреднить имеющиеся данные, мы получим некое среднее, но для изменения климата важно не среднее, а **тренд** – тенденция. Для временных рядов – данных на рис. 2 – методики определения трендов хорошо известны, это линейная регрессия. В случае пространственно локализованных данных необходимы сложные методы анализа:

- пространственно-временная регрессия (Spatio-Temporal Regression);
- пространственно-временные нейронные сети (Spatio-Temporal Neural Networks);
- пространственно-временная кластеризация (Spatio-Temporal Clustering);
- пространственно-временные байесовские модели (Spatio-Temporal Bayesian Models).

Для решения поставленных задач необходимо создание специализированной специальной сети наблюдений для наблюдения теплового острова. Необходимость такой сети можно обосновать следующими факторами: разнородность городской среды, обуславливающая высокую вариативность данных, различия в способах индексации температурного режима, динамика температурного режима города. Примеры специальных сетей для наблюдения термического режима уже имеются в городах:

- Нью-Йорк (США) действует сеть метеорологических станций для мониторинга теплового острова;

- Токио (Япония) используются мобильные датчики для измерения температуры в разных районах города;
- Москва (Россия) также ведутся исследования теплового острова с использованием данных метеостанций и спутников.

Для уменьшения эффекта теплового острова (Urban Heat Island, UHI) необходимы комплексные меры ландшафтного планирования, которые направлены на снижение температуры в городских районах, улучшение микроклимата и повышение устойчивости городов к изменению климата. Ниже приведены ключевые меры, которые могут быть реализованы в рамках ландшафтного планирования:

1) Увеличение площади зеленых насаждений; включает мероприятия по созданию новых парков, скверов и зеленых зон в городской среде, высадку деревьев вдоль улиц и тротуаров, создание зеленых коридоров;

2) Использование зеленых крыш и вертикального озеленения, включая следующие меры устройство растительного покрова на крышах зданий, вертикальное озеленение.

3) Создание водных объектов, включая следующие меры: создание фонтанов и водоемов, создание дождевых садов;

4) Применение "холодных" материалов: светлые покрытия, проницаемые покрытия;

5) Оптимизация городской структуры, включая создание компактной застройки и планирование компактных районов с высокой плотностью застройки позволяет сократить площадь нагреваемых поверхностей, обеспечение аэрации, создание теневых зон;

6) Восстановление естественных экосистем, включая сохранение природных территорий, защиту существующих лесов, лугов и водно-болотных угодий в городской черте, рекультивацию.

7) Интеграция климатических данных в планирование, включая микроклиматическое моделирование, адаптивное планирование;

8) Общественные инициативы и образовательные программы, включая стимулирование озеленения, образование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives // UN. United Nations Department of Economic Social Affairs Population Division. World Urbanization Prospects. The 2018 Revision. Online Edition Available from: https://www.researchgate.net/publication/329982638_Satellite_Remote_Sensing_of_Surface_Urban_Heat_Islands_Progress_Challenges_and_Perspectives (дата обращения 02.02.2025).

2. Zhou D. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives / D. Zhou et al. // Remote Sensing. – 2018. – Т. 11, № 1. – P. 48.

3. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1982. – 108(455). – P.1-24.

4. Arnfield A.J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // International Journal of Climatology. – 2003. – 23(1). – P.1-26.

5. Patz J.A. Impact of regional climate change on human health / J.A. Patz et al. // Nature. – 2005. – 438(7066). – P.310-317.

6. Harlan S.L. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress / S.L. Harlan et al. // Social Science & Medicine. – 2006. – 63(11), – P. 2847-2863

7. Кузнецова И.Н. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость / И.Н. Кузнецова, Н.Е. Бруслова, М.И. Нахаев // Метеорология и гидрология. – 2017. – №. 5. – С. 49-61.

8. Видение российского города будущего. Книга 1 // Национальный стандарт мастер-планов. ВЭБ.РФ – URL: <https://вэб.рф/files/?file=ad49ea162346d03c0eb14fc9c630d7ae.pdf>

9. <https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer> (дата обращения 02.02.2025).

10. Гущин А.Н. Зеленая инфраструктура Екатеринбурга. современное состояние и пути развития / А.Н. Гущин, М.Н. Дивакова // Архитектон: известия вузов. – 2022. – №4(80). – URL: http://archvuz.ru/2022_4/23/

11. Белоусов Ю.И. Инфракрасная фотоника. Часть I. Особенности формирования и распространения ИК излучения. Учеб. Пособие / Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 82 с.

12. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата обращения 02.02.2025).

13. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/slstr-applications> (дата обращения 02.02.2025).

14. <https://earthengine.google.com/> (дата обращения 02.02.2025).

15. Екатеринбург: Энциклопедия / гл. ред. В.В. Маслаков. – Екатеринбург: Издательство Академкнига, 2002. – 728 с.

16. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 464 с.

17. Ткачук С.В. Сравнительный анализ биоклиматических индексов для прогноза с использованием мезомасштабной модели // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – №.20. – С. 109-118.

Problems of heat island identification in the largest city (example of Yekaterinburg)

Gushchin A.N., Divakova M.N.

Department of Urban Planning and Landscape Architecture
Ural State University of Architecture and Art named for N.S. Alferov
Yekaterinburg, Russia Federation
alexanderNG@yandex.ru, divakovamar@yandex.ru

Abstract. The heat island problem is becoming more and more urgent as the climate agenda worsens. Moreover, the problem has already reached the level of regulatory documents. The authors examine the problem on the example of one of the largest cities - Yekaterinburg. First, the authors critically analyze existing methodologies and datasets to identify the heat island. As a result of the critical analysis, the authors come to the conclusion that both the concept of heat island and methods of its localiza-

tion are currently not sufficient to meet the regulatory requirements. In the authors' opinion, it is necessary to solve the problem of designing a system of observation posts for heat island monitoring.

Keywords: heat island, remote sensing data, largest city

Библиографическое описание статьи

Гущин А.Н. Проблемы выявления теплового острова в крупнейшем городе (пример Екатеринбурга) / А.Н. Гущин, М.Н. Дивакова // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2026. – Т.13, №1. – С. 86-91. DOI: 10.24892/RIJIE/20260114

Reference to article

Gushchin A.N., Divakova M.N. Problems of heat island identification in the largest city (example of Yekaterinburg), *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.1, pp. 86-91. DOI: 10.24892/RIJIE/20260114
