

УДК: 911.9

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-196–209

В.А. Добрякова¹, Л.Д. Сулкарнаева²

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМНОЙ УСЛУГИ «ОХЛАЖДАЮЩИЙ ЭФФЕКТ» НА ПРИМЕРЕ Г. ТЮМЕНЬ

АННОТАЦИЯ

Главной задачей данной статьи является выявление основных факторов, влияющих на предоставление важной для создания комфортной городской среды, экосистемной услуги «Охлаждающий эффект».

Для построения математической регрессионной модели изучаемого процесса, параметры экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» (спрос и предложение) выражены количественно как разность температур поверхности и максимальной температуры комфорта для летнего периода (23 °С).

По результатам полевых наблюдений и анализа космоснимков была верифицирована картографическая основа Open Street Map, организованы тематические данные для моделирования: природные объекты отсортированы по площади (выбраны с площадью не менее 1 га), здания по критерию многоэтажности, дороги – по критерию количества полос. Для определения зависимости температур от выбранных показателей городская территория была накрыта гексагональной сеткой, с радиусом шестиугольника 500 м. Операционными единицами исследования выбраны ячейки (бины) построенной гексагональной сетки. Показатели площади рассчитаны в процентах в пределах бина, расстояния – как ближайшие в метрах от бина до указанных объектов по прямой.

Вычисления выполнены в программном комплексе ArcGIS Pro с помощью инструментов из набора «Пространственная статистика – Моделирование пространственных отношений». Алгоритм построения модели включает последовательный запуск двух инструментов анализа: «Исследовательская регрессия» и «Метод наименьших квадратов» (МНК).

По результатам работы инструментов выполнены: интерпретация и анализ отчетов, сообщений и карт. В результате проведенного исследования определены основные факторы, влияющие на распределение температуры. Самые «сильные» переменные – площадь многоэтажных зданий и расстояние до основных автодорог. Третий по значимости фактор – площадь лесов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской остров тепла, экосистемные услуги, пространственный анализ, географические информационные системы.

¹ Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, Володарского, д.6, 625003, Тюмень, Россия, *e-mail*: v.a.dobryakova@utmn.ru

² Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, Володарского, д.6, 625003, Тюмень, Россия, *e-mail*: sulkarnaeva1992@mail.ru

Valentina A. Dobryakova¹, Liliia D. Sulkarnaeva²

MODELLING OF ECOSYSTEM SERVICES «COOLING EFFECT» SUPPLY IN THE CITY OF TYUMEN

АННОТАЦИЯ

This article aims to identify the main factors influencing the supply of the “Cooling Effect” ecosystem service, which is important for creating a comfortable urban environment. The parameters of the ecosystem service “Cooling effect” (supply and demand) are expressed quantitatively as the difference between the surface temperatures and the maximum comfort temperature for the summer period (23 °C) for the mathematical regression model of the process.

The results of field observations and analysis of space images allowed us to verify the cartographic basis of the Open Street Map and organize thematic data for modeling: we sorted natural objects by area (selected with an area of at least 1 hectare), buildings by the criterion of multi-story, roads by the criterion of the number of lanes. To determine the dependence of temperatures on the selected indicators, the urban area was covered with a hexagonal grid with a hexagon radius of 500 m. The cells (bins) of the constructed hexagonal grid were selected as the operational research units. Areas are calculated as a percentage within the bin, distances – as the nearest in meters from the bin to the specified objects in a straight line.

Calculations were performed in ArcGIS Pro software using tools from the Spatial Statistics – Spatial Relationship Modeling toolbox. The model building algorithm includes sequential launch of two analysis tools: Exploratory Regression and Ordinary Least Squares (OLS).

Based on the results of the work of the tools, the following were performed: interpretation and analysis of reports, messages and maps. As a result of the study, the main factors influencing the temperature distribution have been identified. The strongest variables are the area of multi-storey buildings and the distance to major roads. The third most important factor is the forest area.

KEYWORDS: urban heat island, ecosystem services, spatial analysis, geographic information systems.

ВВЕДЕНИЕ

Городские территории характеризуются особыми климатическими условиями, формирующими городской остров тепла: более низкой влажностью и силой ветра, более высокой температурой по сравнению с неурбанизированными территориями [Arnfield, 2003; Kuttler *et al.*, 2007].

Городская среда представляет собой сочетание водно-зеленой (леса, парки, аллеи, водные объекты, водно-болотные угодья, болота и прочие природные объекты городской среды) и серой (территории с твердым покрытием, жилые и административные здания, промышленные зоны, торговые центры, теплоэлектростанции, дорожная и инженерная инфраструктура) инфраструктуры [Mell *et al.*, 2013]. Городской остров тепла зависит главным образом от характеристик водно-зеленой инфраструктуры (влияние на альbedo, транспирацию и направление потоков воздуха), характеристик серой инфраструктуры (плотность и цвет материалов, использованных для зданий и твердых покрытий,

¹ University of Tyumen, Institute of Earth Sciences, Volodarsky str., 6, 625003, Tyumen, Russia, e-mail: v.a.dobryakova@utmn.ru

² University of Tyumen, Institute of Earth Sciences, Volodarsky str., 6, 625003, Tyumen, Russia, e-mail: sulkarnaeva1992@mail.ru

конфигурация и высота зданий и прочие антропогенные источники теплового загрязнения) [Larsen, 2015].

Объекты серой инфраструктуры (территории с твердым покрытием, жилые и административные здания, промышленные зоны, торговые центры, теплоэлектростанции), как правило, приводят к повышению температуры воздуха и усилению городского острова тепла, в то время как объекты водно-зеленой инфраструктуры (леса, парки, аллеи, водные объекты, водно-болотные угодья, болота и прочие природные объекты городской среды)¹ предоставляют экосистемную услугу «Охлаждающий эффект» [Kowarik et al., 2016].

Процессы урбанизации – роста и развития городов – вместе с глобальным изменением климата усиливают эффект городского острова тепла [Oke, 1973], [Streutker, 2003], что может существенно ухудшить качество городской среды [Stocker et al., 2013; Kowarik et al., 2016]: увеличение продолжительности и частоты (почти в два раза) волн жары, числа дней теплового стресса, вероятности чрезвычайных ситуаций [Schär et al., 2004; Schär, Jendritzky, 2004].

Тепловой стресс и волны жары приводят к росту числа смертей и обострений заболеваний сердечно-сосудистой системы. Так называемые «тропические ночи» с температурой воздуха выше 20 °С приводят к недостаточному восстановлению после дневного теплового стресса [Höppe, 1999], что еще больше обостряет медицинскую ситуацию, особенно среди людей с хроническими заболеваниями и пожилых [Burkart et al., 2013; Scherber et al., 2013]. Данный факт особенно важен в условиях современной демографической ситуации в России (рост среднего возраста и рост продолжительности жизни)².

Оценка «Охлаждающего эффекта» для городской среды проводится, как правило, методами, доказывающими, что объекты водно-зеленой инфраструктуры способствуют смягчению городского острова тепла: измерением разницы температур между температурой воздуха или поверхности на территории объектов водно-зеленой инфраструктуры и соседних участках [Chang et al., 2007]. Однако, вклад различных типов объектов водно-зеленой инфраструктуры в предоставление экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» почти не рассматривается.

Таким образом была поставлена следующая цель: провести регрессионный анализ спроса и предложения экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» в зависимости от конфигурации, характеристик и расположения объектов водно-зеленой и серой инфраструктуры города Тюмени.

Водно-зеленая и серая инфраструктура города Тюмени была выбрана в качестве объекта исследования в связи с 1) ростом населения города, 2) активным строительством новых жилых кварталов и увеличением площадей с твердым покрытием, 3) продолжительным периодом (более двух недель) высокой суточной температурой и теплового стресса в июле-августе 2020 года.

Оценка вклада объектов водно-зеленой инфраструктуры разного типа (парки, леса, водные объекты, болота) будет востребована для целей городского планирования с целью повышения качества жизни жителей города.

¹ Сайт проекта “Связность зеленой и синей инфраструктур: сосулы для биоразнообразия” (Web-site of the Project “Connectivity of green and blue infrastructures: living veins for biodiversity”). Электронный ресурс: <http://bioveins.eu/> (дата обращения 02.04.2021).

² Щербакова Е.М. Старшие поколения населения России. Демоскоп Weekly. 2019. № 797-798. Электронный ресурс: <http://demoscope.ru/weekly/2019/0797/barom01.php> (дата обращения 02.04.2021).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографическая основа: векторные слои Open Street Maps (слои административные границы, здания, дороги, леса и т.д.) за сентябрь 2016 года. Данные векторные слои были верифицированы с использованием космических снимков Landsat-8 (от 08.06.2016 и 03.09.2016) и полевых наблюдений, проведённых летом (июль и август) 2016 года.

Тематические данные:

1. Зависимая переменная: параметры экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» (Разность температур поверхности и максимальной комфорта для летнего периода (23 °C)).

Данные получены в результате агрегирования значений температуры поверхности, определённых на основе обработки космических снимков Landsat-8 (в данном исследовании мы использовали снимки Landsat-8, сделанные 22.06.2015, 10.07.2016, 14.08.2017, 16.07.2018, 19.07.2019). Выбор изображений основывался на критериях минимальной облачности (до 5%) и наличия пройденной геометрической и радиометрической коррекции.

Извлечение из космических снимков температур земной поверхности проводилась по алгоритму «одного канала» (single-channel method)¹. Для извлечения температуры земной поверхности был выбран десятый канал (Band 10). Расчет температуры земной поверхности выполнялся по формуле²:

$$T = \frac{TB}{1 + \frac{\lambda \cdot TB}{h \cdot \frac{c}{s}} \cdot \ln(e)} - 273,15 \quad (1)$$

где TB – температура чёрного тела на поверхности атмосферы (top of atmosphere brightness temperature);

λ – длина волны излучаемого излучения (для 10 канала составляет 10,8);

h – постоянная Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж с);

s – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

c – скорость света ($2,998 \cdot 10^8$ м/с);

e – излучательная способность земной поверхности (emissivity), в данном случае была использована константа 0,98);

273,15 – коэффициент для перевода из Кельвинов в градусы Цельсия.

2. Независимые переменные включённые в модель для выявления характера влияния на температуру поверхности, делятся на два типа: «площади» и «расстояния».

2.1. Тип переменных «площади» включает данные по площадям:

- лесов;
- зелёных насаждений;
- лесопарков и парков;
- водных объектов (открытая вода);

¹ Практический алгоритм «одного канала» для определения температуры поверхности земли : применение к данным серии Landsat (A Practical Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Application to Landsat Series Data) [https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JD029330#:~:text=The%20single%E2%80%90channel%20\(SC\),Planck's%20function%20and%20atmospheric%20correction.](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JD029330#:~:text=The%20single%E2%80%90channel%20(SC),Planck's%20function%20and%20atmospheric%20correction.)

² Документация плагина полуавтоматической классификации 5.3.6.1. (Semi-Automatic Classification Plugin 5.3.6.1 Documentation) <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/re mote sensing.Html #conversion-to-temperature.>

- болот;
- зданий (всего);
- многоэтажных зданий.

2.2. В тип «расстояния» входят данные о расстояниях до:

- автодорог;
- основных автодорог;
- водных объектов (всего);
- водных объектов (открытая вода);
- болот.

Исследуемая территория: г. Тюмень в границах городского округа.

Городская территория была накрыта гексагональной сеткой, с радиусом шестиугольника 500 м. Операционными единицами исследования являются ячейки (бины) построенной гексагональной сетки.

Перечисленные выше показатели площади рассчитывались в процентах в пределах бина, расстояния – как ближайшие в метрах от бина до указанных объектов по прямой.

Анализ температуры поверхности с использованием спутниковых снимков LANDSAT 8 позволил выделить области с более высокими температурами (области с тепловым стрессом) и с температурами ниже максимальной комфортной температуры (области с «охлаждающим эффектом»).

В качестве основного инструмента для расчётов, анализа и визуализации результатов использовалась программа ArcGIS Pro.

Исходные данные распределения температур на исследуемой территории представлены на рис. 1.

«Остров тепла» формируется из-за неоднородности городских поверхностей, что приводит к изменению энергетического баланса. Изменения в энергетическом балансе вызваны различием теплоёмкости и теплопроводности и радиационных свойств поверхностей (альbedo, излучательная способность): например, тёмные поверхности поглощают значительно больше солнечного излучения (городские дороги, заасфальтированные автостоянки вблизи офисов, торговые центры, жилые дома) положительные аномалии температуры отмечаются над многоэтажными жилыми домами, промышленными и энергетическими объектами, плоскими крышами торговых центров. Температура над этими поверхностями выше 23 °С. В целом поверхности над зелёными насаждениями (парки, скверы, зелёные зоны малоэтажных частных жилых домов) и водные поверхности (объекты) остаются «холодными». Эти территории обеспечивают «Охлаждающий эффект»; температура над этими поверхностями ниже 23 °С.

Бины с отрицательными значениями предоставляют услугу «Охлаждающий эффект» в достаточном объеме, а бины с положительным – в недостаточном.

На карте (рис. 1) заметны выраженные и хорошо локализуемые 4 зоны с повышенной температурой:

1. Самая большая и горячая область, на высоком правом берегу протянувшаяся в длину от ул. Перекопская до ул. Воровского и в ширину от реки до объездной дороги. Это область плотной городской застройки с минимумом зеленых зон.

2. Вторая по размеру область на левом низком берегу соответствует зоне интенсивно застраивающихся старых и новых заречных микрорайонов от ул. Луговая 2-я

до ул. Алебашевская у самой реки. На удалении от реки эта зона сужается и вытягивается по ул. Дружбы в обход Алебашевского болота до объездной дороги. Это также область плотной городской застройки, но более узкая и вытянутая вдоль реки с прилегающими объектами водно-зеленой инфраструктуры большой площади: Алебашевское болото, парк им. Гагарина.

3. Третья область продолжает вторую и начинается за объездной дорогой на левом берегу Туры. Это поля и кустарник, причина перегрева не выяснена.

4. Наиболее удаленная от других западная зона, которая накрывает аэропорт Рошино с прилегающим поселком и большой площадью полей. Во многом соответствует области 3.

Подбор модели проводился инструментами из набора «Пространственная статистика – Моделирование пространственных отношений».

Алгоритм построения модели включает последовательный запуск двух инструментов анализа:

1. «Исследовательская регрессия». Инструмент позволяет изучить большое число линейных моделей, описывая отношения и определяя комбинации потенциальных независимых переменных.

Для каждой комбинации переменных рассчитываются статистические показатели: выровненный R^2 ($AdjR^2$), информационный критерий Акаике (AICc), р-значение Жака-Бера (JB), статистическое р-значение Кенкера $K(BP)$, максимальный фактор увеличения дисперсии (VIF), глобальное р-значение Морана I (SA). Первые два оценивают эффективность модели, статистика Жака-Бера (JB) и глобальное р-значение Морана I – распределение невязок, т. е. отклонений исходных данных от значений, рассчитанных по модели.

Поиск комбинации независимых переменных, соответствующей заданным критериям (минимальный допустимый скорректированный R^2 , максимальное предельное р-значение коэффициента, максимальный порог значения VIF и минимально допустимое р-значение Жака-Бера) выполняется методом наименьших квадратов (МНК), оценка невязок модели – с помощью глобального индекса Морана I.

Если ни одна из моделей не соответствует указанным критериям, тестирование с помощью глобального индекса Морана I применяется к невязкам для трех моделей с наибольшими скорректированными значениями R^2 и трем моделям с наибольшими р-значениями Жака-Бера.

В результате работы инструмента мы должны получить описания корректных моделей МНК. Если проходящие модели отсутствуют, в отчете будут представлены результаты диагностических тестов, по результатам которых можно определить стратегию работы над улучшением модели.

2. «Метод наименьших квадратов» (МНК). Наиболее известный метод регрессионного анализа. В результате работы инструмента получаем: слой объектов-невязок МНК, уравнение регрессии, оценки каждой независимой переменной, диагностику модели (производительность, значимость, стационарность и смещение)¹.

Далее, выполнялись интерпретация и анализ отчетов, сообщений и карт, использовались дополнительные инструменты для корректировки, выбранной модели.

¹ Сайт компании ESRI. Как работает регрессия МНК. Электронный ресурс: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/how-ols-regression-works.htm> (дата обращения 03.04.2021).

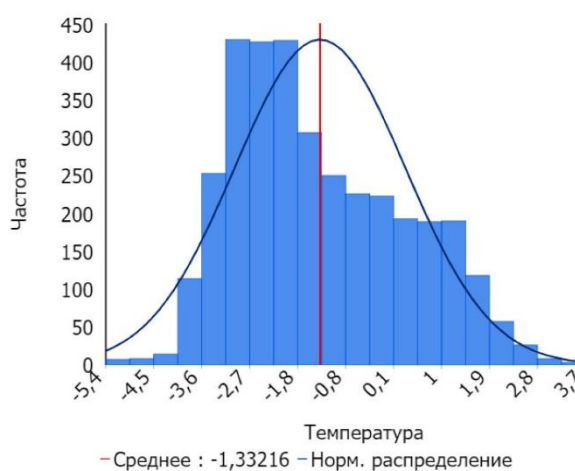
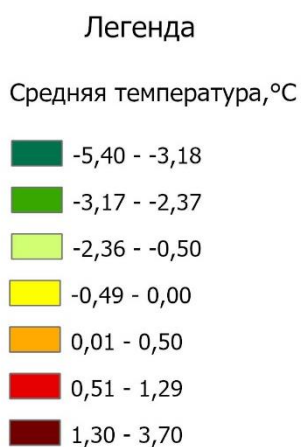
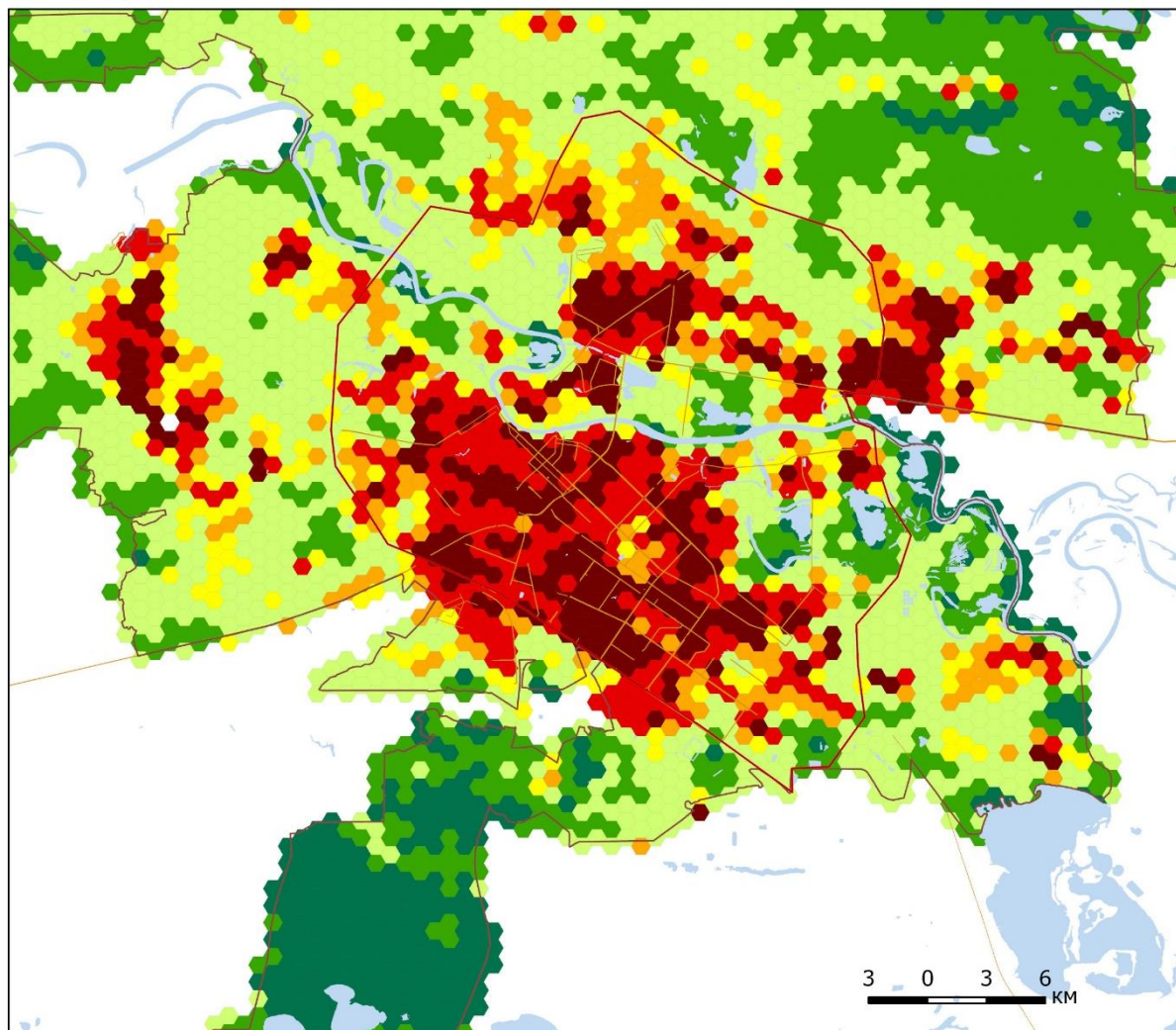


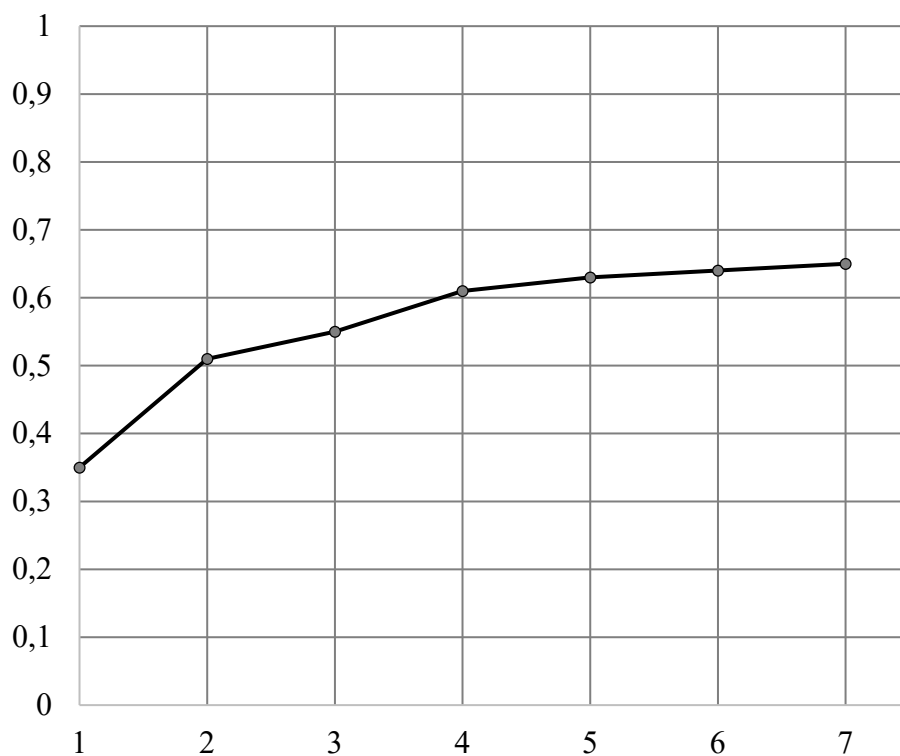
Рис. 1. Распределение расчетной разницы температур от максимальной комфортной температуры (23 °C)

Fig. 1. Distribution of the calculated temperature difference from the maximum comfortable temperature (23 °C)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По наибольшему показателю выровненный R^2 , с учетом его изменений при увеличении количества переменных (рис. 2) принято решение остановиться на 7 независимых переменных.

R^2



Количество независимых переменных

Рис. 2. Изменение R^2 при увеличении количества независимых переменных

Fig. 2. Dependence of R^2 from independent variables

По результатам работы инструмента «Исследовательская регрессия» корректных моделей МНК, соответствующих заданным на входе критериям (максимальное число независимых переменных равно 7, минимальный допустимый скорректированный R^2 – 0,5, максимальное предельное р-значение коэффициента – 0,05, максимальный порог значения $VIF < 7,5$ и минимально допустимое р-значение Жака-Бера (JB) – 0,1) не найдено.

Не пройдены диагностические тесты глобального индекса Морана I для пространственной автокорреляции (SA) и Жака-Бера (JB).

Причина связана с выявлением высокой кластеризации невязок и проблемой со смещенностью модели.

Реализована следующая последовательность действий:

1. По наибольшему показателю выровненный R^2 , с учетом его изменений при увеличении переменных (рис. 2), с исключением мультиколлинеарности, были отобраны комбинации независимых переменных (табл. 1).

Табл. 1. Отобранные комбинации независимых переменных по результатам работы инструмента «Исследовательская регрессия»

Table 1. Selected combinations of independent variables based on the Exploratory Regression tool results

№	Модель	Кол-во переменных	Выровненный R^2 (Adj R^2)	Критерий Акаике (AICc)
1.	Площади (%) лесов, рек и озер, многоэтажных зданий; расстояние до основных автодорог	4	0,6	9988,42
2.	Площади (%) лесов, рек и озер, зданий (всего); расстояние до основных автодорог	4	0,61	9948,06
3.	Площади (%) лесов, рек и озер, болот, многоэтажных зданий; расстояние до основных автодорог	5	0,62	9808,80

2. С помощью инструмента «МНК» изучены три отобранные модели. В результате по каждой модели получили: уравнение регрессии, оценки каждой независимой переменной, диагностику модели в целом, слой объектов-невязок МНК.

Результаты моделирования оказались весьма схожими.

Все модели значимы. В каждой модели отобранные независимые переменные значимы, моделируемые отношения линейны, переменные не являются избыточными. Зависимости между температурой и переменными отрицательные, за исключением связи между температурой и площадью многоэтажных зданий. Основная проблема – распределение невязок во всех трёх моделях не является нормальным.

Для дальнейшей работы по наибольшему значению выровненного R^2 выбрана модель № 3.

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,79$.

Уравнение модели:

$$y = -0,017x_1 - 0,03x_2 - 0,014x_3 + 0,1x_4 - 0,0001x_5 - 0,4 \quad (2)$$

y – разность температур поверхности и максимальной комфорта для летнего периода;

x_1 – площадь лесов;

x_2 – площадь водных объектов (открытая вода);

x_3 – площадь болот;

x_4 – площадь многоэтажных зданий;

x_5 – расстояние до основных автодорог.

3. Проанализированы отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями зависимой переменной.

Наблюдается пространственная кластеризация в отклонениях (рис. 3, 4). Пространственные процессы, создавшие данную структуру, носят неслучайный характер. Вероятно, существуют неизвестные, не учтенные нами факторы, определившие рисунок отклонений модели от наблюдаемых значений. Анализируя (рис. 3.) мы видим, что наибольшие области отклонений связаны с уже обсуждаемыми нами ранее областями 3 и 4 (рис. 1).

Кроме того, распределение невязок не является нормальным (рис. 4.).

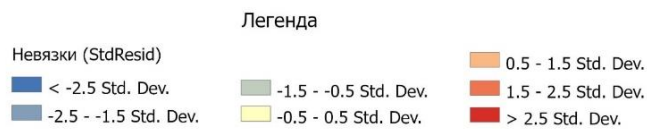
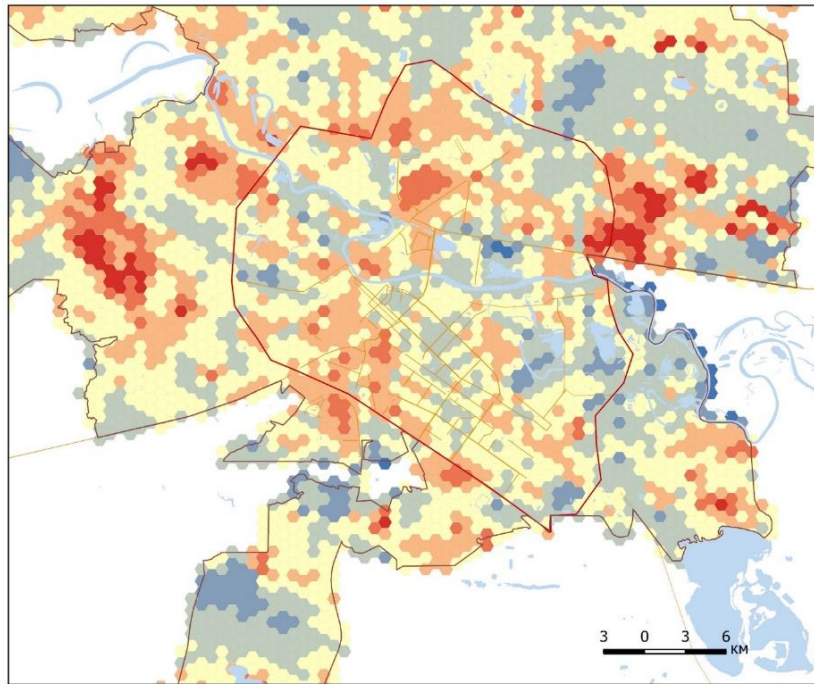


Рис. 3. Результаты МНК: слой невязок между рассчитанной и наблюдаемой значениями зависимой переменной.

Fig. 3. OLS results: layer of residuals between the calculated and observed values of the dependent variable

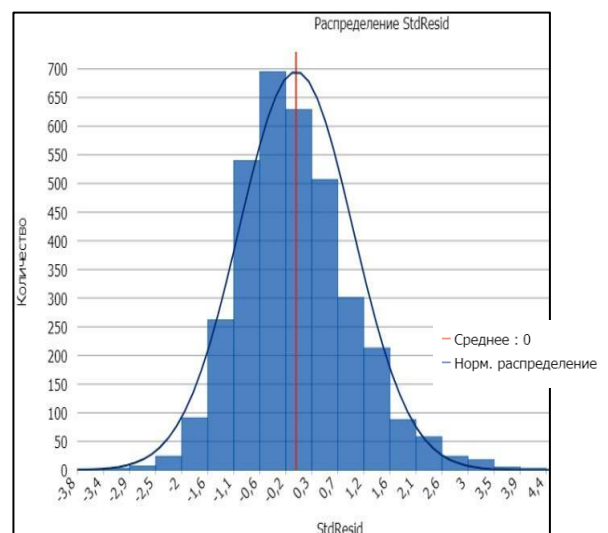
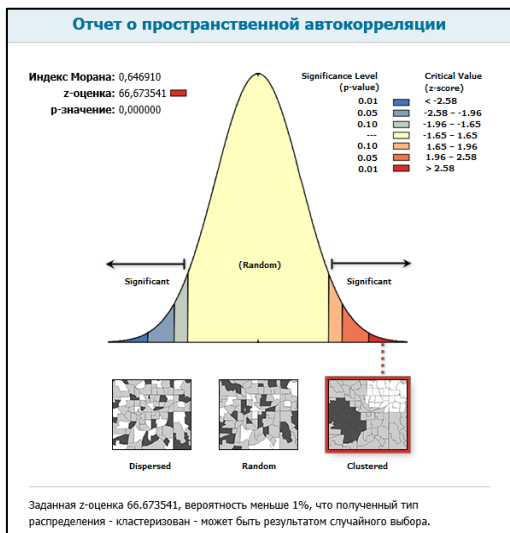


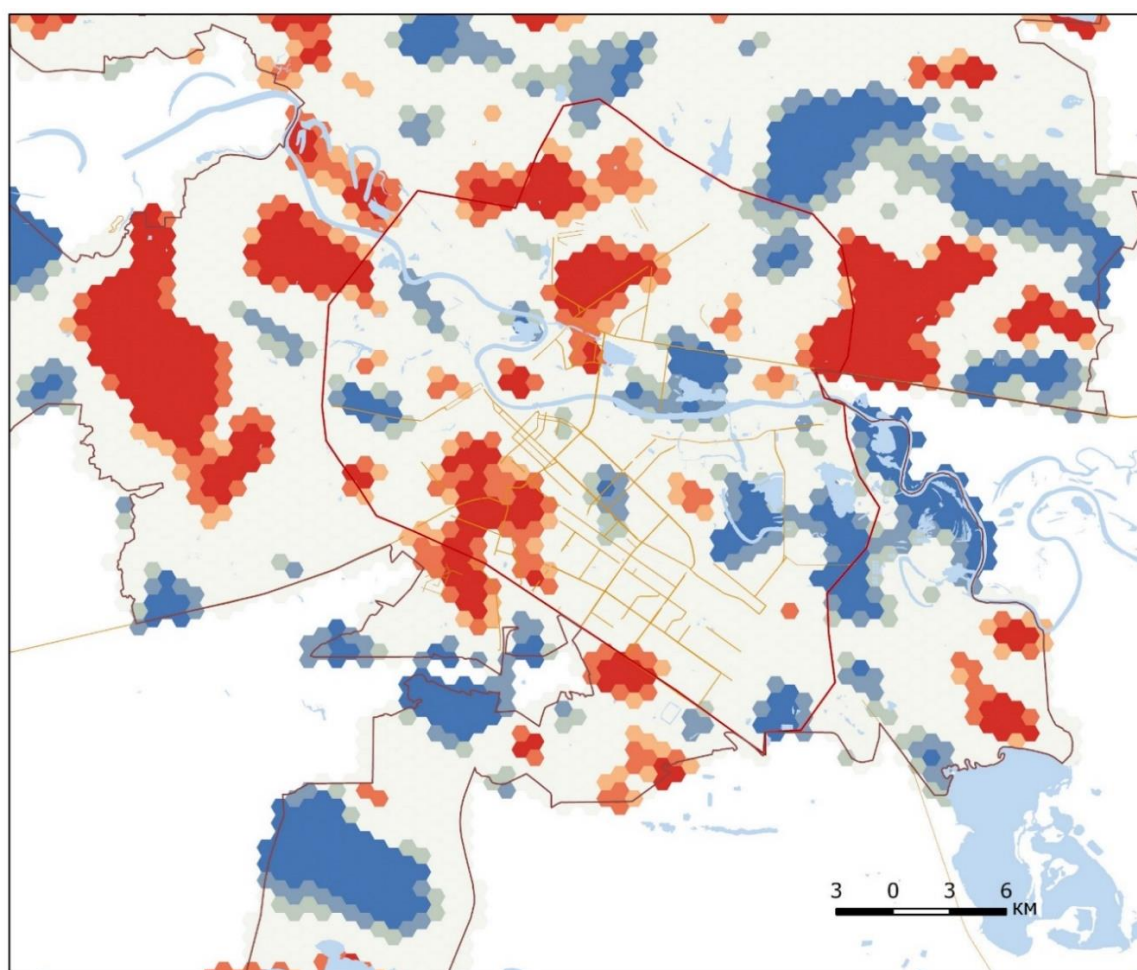
Рис. 4. Оценка структурных закономерностей в распределении невязок:
а – результаты работы инструмента «Пространственная автокорреляция»;
б – гистограмма распределения невязок

Fig. 4. Assessment of structural regularities in the distribution of residuals:
a – the results of the tool "Spatial autocorrelation"; b – histogram of residual distribution

Для идентификации и визуализации пространственной кластеризации невязок использовался анализ горячих точек (рис. 5), в основе которого – расчёт локального индекса Getis-Ord G_i^* [Getis, 1992].

Главное преимущество статистики Getis-Ord G_i^* состоит в том, что она учитывает значение всех соседних объектов и выявляет горячие и холодные точки с различными уровнями статистической значимости. Локальная статистика Getis-Ord G_i^* сравнивает локальную сумму отклонений от среднего для окрестности объекта с аналогичными суммами других объектов. Метод рассчитывает z- и p-оценку каждой суммы в исследуемой области, показывая статистически значимы или нет различия между локальными и глобальными средними значениями [Haque et al., 2012].

Скорее всего в нашей модели отсутствует ключевой показатель (показатели) или некоторые отношения, которые мы моделируем, являются нелинейными.



Легенда

Анализ горячих точек

Достоверность, % (G_i _Bin)

Холодная точка - 99%

Холодная точка - 95%

Холодная точка - 90%

Не значима

Горячая точка - 90%

Горячая точка - 95%

Горячая точка - 99%

Рис. 5. Результаты анализа горячих точек

Fig. 5. Hot Spot Analysis Results

ВЫВОДЫ

1. Распределение параметров экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» представляет весьма неоднородную картину, тем не менее, в результате проведенного исследования определена линейная зависимость от ряда факторов (перечислены ниже).

2. Для сравнительной оценки влияния каждого фактора на результат уравнение (2) приводим к стандартизированному виду:

$$y = -0,275x_1 - 0,222x_2 - 0,143x_3 + 0,334x_4 - 0,314x_5 \quad (3)$$

Формулы перехода от натурального уравнения множественной регрессии к стандартизированному подробно описаны в учебниках по статистике [Теория, 2005; Колде, 1991].

Отобранные независимые переменные значимы, переменные не являются избыточными. Согласно уравнению (3) самые «сильные» переменные – площадь многоэтажных зданий (x_4) и расстояние до основных автодорог (x_5). Третий по значимости фактор – площадь лесов (x_1).

3. Однако полученный результат не является окончательным, поскольку наблюдается значимая кластеризация невязок. Полученную локализацию горячих точек следует рассматривать как основу для поиска, расчета и включения новых эффективных независимых переменных.

Результаты данного исследования можно использовать для целей жизнестойкого городского планирования – на территориях с высоким спросом на экосистемную услугу «Охлаждающий эффект» следует создавать, ревитализировать или улучшать объекты водно-зеленой инфраструктуры, с наибольшим охлаждающим эффектом (водные объекты).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колде Я.К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1991. 157 с.
2. Теория статистики: учебник. Под ред. Г.Л. Громыко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра, 2005. 476 с.
3. Arnfield A. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003. V. 23.1 (2003). P. 1–26.
4. Burkart K., Canário P., Breitner, S., Schneider A., Scherber K., Andrade H., Alcoforado M.J., Endlicher W. Interactive short-term effects of equivalent temperature and air pollution on human mortality in Berlin and Lisbon. *Environmental pollution*, 2013. V. 183. P. 54–63.
5. Chang C.R., Li M.H., Chang S.D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and urban planning*, 2007. V. 80(4). P. 386–395.
6. Getis A., Ord J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206.
7. Haque U., Scott L.M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G.E. Modelling malaria treatment practices in Bangladesh using spatial statistics. *Malar Journal*, 2012. V. 11. P. 11–63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.

8. *Höppe, P.* The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 1999. V. 43(2). P. 71–75.
9. *Kowarik I., Bartz R., Brenck M.* Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit Schützen und Lebens-Qualität Erhöhen. Berlin, Leipzig, 2016. 300 p.
10. *Kuttler W., Weber S., Schonnefeld J., Hesselschwerdt A.* Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007. V. 27(14). P. 2005–2015.
11. *Larsen L.* Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015. V. 13(9). P. 486–492.
12. *Mell I.C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B.* Promoting urban greening: Valuing the development of green infrastructure investments in the urban core of Manchester, UK. *Urban forestry & urban greening*, 2013. V 12.3. P. 296–306.
13. *Oke T. R.* City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973 (1967). V. 7(8). P. 769–779.
14. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003. *Nature*, 2004. V. 432 (7017). P. 559–560.
15. *Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M. A., Appenzeller C.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004. V. 427 (6972). P. 332–336.
16. *Scherber K., Langner M., Endlicher W.* Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *DIE ERDE–Journal of the Geographical Society of Berlin*, 2013. V. 144 (3–4). P. 217–237.
17. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* IPCC: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 28 p.
18. *Streutker D.R.* Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003. V. 85(3). P. 282–289.

REFERENCES

1. *Arnfield A.* Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003. V. 23.1 (2003). P. 1–26.
2. *Burkart K., Canário P., Breitner, S., Schneider A., Scherber K., Andrade H., Alcoforado M.J., Endlicher W.* Interactive short-term effects of equivalent temperature and air pollution on human mortality in Berlin and Lisbon. *Environmental pollution*, 2013. V. 183. P. 54–63.
3. *Chang C.R., Li M.H., Chang S.D.* A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and urban planning*, 2007. V. 80(4). P. 386–395.
4. *Getis A., Ord J. K.* The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206.
5. *Haque U., Scott L.M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G.E.* Modelling malaria treatment practices in Bangladesh using spatial statistics. *Malar Journal*, 2012. V. 11. P. 11–63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.

6. *Höppe P.* The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 1999. V. 43(2). P. 71–75.
7. *Kolde Ya. K.* Training materials on the theory of probability and mathematical statistics. Moscow: Vysshaja shkola, 1991. 157 p. (in Russian).
8. *Kowarik I., Bartz R., Brenck M.* Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit Schützen und Lebens-Qualität Erhöhen. Berlin, Leipzig, 2016. 300 p.
9. *Kuttler W., Weber S., Schonfeld J., Hesselschwerdt A.* Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007. V. 27(14). P. 2005–2015.
10. *Larsen L.* Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015. V. 13(9). P. 486–492.
11. *Mell I.C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B.* Promoting urban greening: Valuing the development of green infrastructure investments in the urban core of Manchester, UK. *Urban forestry & urban greening*, 2013. V 12.3. P. 296–306.
12. *Oke T. R.* City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973 (1967). V. 7(8). P. 769–779.
13. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003. *Nature*, 2004. V. 432(7017). P. 559–560.
14. *Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004. V. 427 (6972). P. 332–336.
15. *Scherber K., Langner M., Endlicher W.* Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin*, 2013. V. 144 (3–4). P. 217–237.
16. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* IPCC: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 28 p.
17. *Streutker D.R.* Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003. V. 85(3). P. 282–289.
18. *Theory of statistics: textbook / ed. Gromyko G.L.* 2nd edition, rev. M.: Infra, 2005. 476 p. (in Russian).