

УДК 551.584.5

С. В. Корниенко, Е. А. Дикарева

Волгоградский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ПЛАНИРОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Построена адекватная корреляционно-регрессионная математическая модель, устанавливающая закономерную связь между характеристиками планировочных элементов и их влиянием на температурный режим урбанизированных территорий. Наибольший вклад в изменение температуры поверхности дает озеленение участка деревьями. Это подтверждает вывод о том, что зеленая инфраструктура оказывает значительное влияние на смягчение городского теплового острова. Охлаждающий эффект от дерева образуется вследствие затенения, испарения и термогравитационной конвекции. Полученные результаты открывают широкие возможности оптимизации теплового состояния городской среды на стадии городского планирования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: город, городское планирование, планировочный элемент, температурный режим, урбанизация, урбанизированная территория, математическая модель, зеленая инфраструктура.

Введение

Урбанизация — мегатренд развития современного общества. По оценкам экспертов, к 2030 г. около 80 % населения будет жить в городах. Город является источником материальных благ, способствует развитию новых технологий, транспорта и связи, дает возможность получить более качественное образование и медицинские услуги [1—3]. Вместе с тем рост численности городского населения увеличивает эксплуатационную нагрузку на жилищно-строительный сектор, зеленую инфраструктуру, инженерные сети и может негативно повлиять на качество жизни горожан [4]. Долгосрочное повышение средней температуры климатической системы Земли увеличивает риск глобального потепления [5, 6].

Городские территории неоднородны. На них расположены различные элементы планировочной структуры: районы, микрорайоны, кварталы. В границах этих планировочных образований могут располагаться жилые, общественно-деловые, производственные зоны. Отдельно могут быть выделены территории общего пользования. В городах развита улично-дорожная сеть. Для оздоровления воздушного бассейна города и улучшения его микроклимата развивается зеленая инфраструктура [7].

Неоднородность городских территорий усложняет температурный режим. По сравнению с природным ландшафтом здания, расположенные в густонаселенных городских районах, поглощают большее количество солнечного излучения. Уплотнение городской застройки блокирует процесс лучистого и конвективного теплообмена с окружающей средой. Большое количество теплоты, аккумулированной в каменных стенах зданий, существенно влияет на баланс тепловой энергии, а выбросы токсичных газов загрязняют воздух, воду, почву. Как правило, именно в мегаполисах происходит формирование городских тепловых островов (ГТО) [8—12]. ГТО снижают качество городской среды (ГС). Степень выраженности ГТО варьируется в зависимости от

географических координат, времени, типа застройки и может достигать $8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях умеренно-континентального засушливого климата в летний период года [13].

Изучение процесса формирования ГТО важно на всех этапах развития города. Для создания комфортной и безопасной ГС необходим поиск новых решений [14—18]. Мониторинг ГТО проводят методом «теплового прослушивания» на основе оптического дистанционного зондирования поверхности Земли. Этот метод позволяет получить очень наглядные общие и детальные тепловые изображения в высоком разрешении, которые могут использоваться для идентификации ГТО и оценки теплотехнического качества ГС [19].

В [13] в качестве теплового маркера предложен показатель относительной температуры, удобный для оценки климатопов урбанизированных территорий. Научно обоснованы и исследованы климатопы современного мегаполиса в границах территориальных зон и всего города. Климатоп позволяет эффективно оценить микроклимат города, отдельных городских территорий, типов застроек [20]. Однако влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий почти не исследовано [21—23]. Отсутствует модель, позволяющая прогнозировать температурный режим территорий при изменении характеристик планировочных элементов. Это затрудняет работу проектировщиков и замедляет поиск новых решений, направленных на смягчение ГТО [24—26].

Целью данной работы является установление научно обоснованной закономерности, учитывающей влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий.

Материалы и методы

Объект исследования. Объектом исследования является г. Волгоград ($48^{\circ}42'42''$ с. ш. $44^{\circ}30'50''$ 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. Площадь города составляет $859,3\text{ км}^2$, население — 1 001 183 чел. Самая высокая точка расположена на северо-западе города на одном из куполообразных возвышений. Прилегающая к Волге часть города — низменная, с высотой от 0 до 40 м над уровнем моря. На удалении 1...3 км от Волги находится цепь пологих холмов с высотой от 50 до 140 м. Климат умеренно-континентальный, засушливый (согласно международной классификации климата Кӧрпен — тип «Dfa»). Зима мягкая, с частыми оттепелями, лето жаркое и долгое, во все времена года возможны резкие перепады температуры. Среднее количество осадков — 267 мм в год.

Генерация точек. Для анализа температурного режима городских территорий использована последовательность квазислучайных чисел Хэлтона для генерации точек в $(0,1)\times(0,1)$ в R^2 . Они обобщают одномерные последовательности Ван дер Корпута [27] (рис. 1).

Точки, которые вышли за границы города, не учитывались. Ряд точек, размещенных на сельскохозяйственных территориях, также не принимался во внимание ввиду незначительного изменения температурного режима. В итоге было размещено 165 точек (узлов), расположенных на различных городских территориях (см. рис. 1).

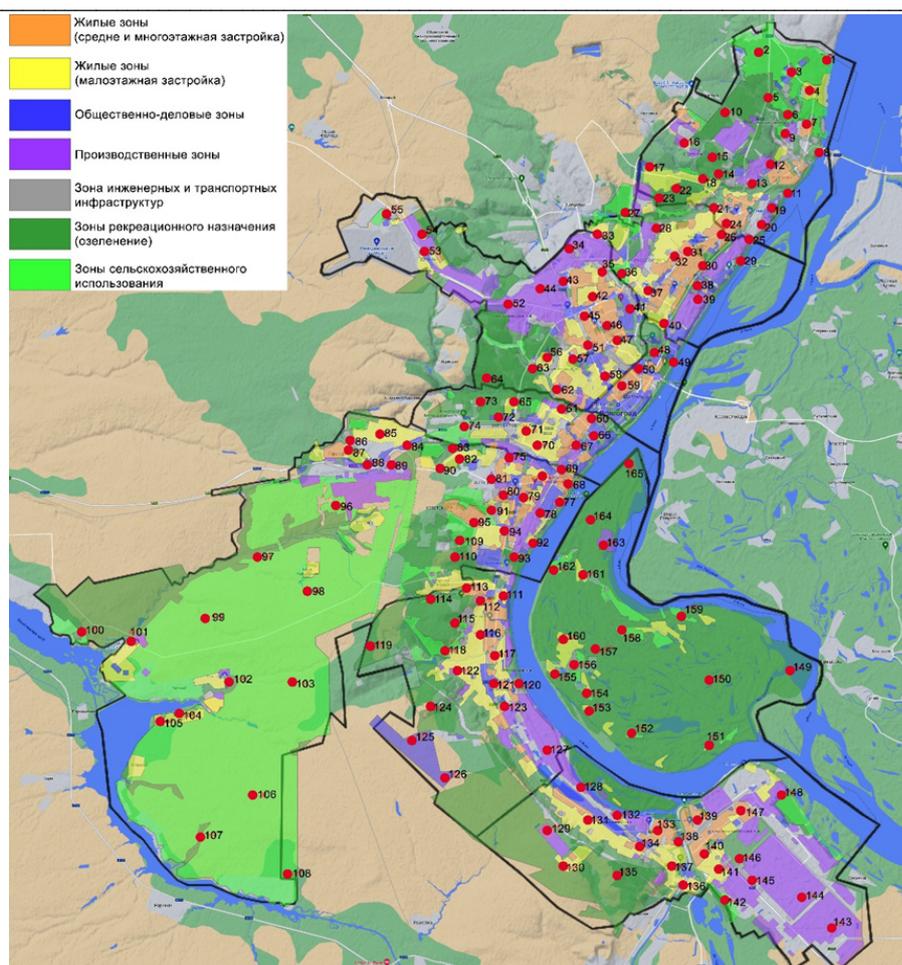


Рис. 1. Размещение точек на карте г. Волгограда

Координаты каждой точки определены с помощью GPS. Значения температуры в точках получены методом «теплового прослушивания» путем оптического дистанционного зондирования поверхности Земли в летние периоды 2015, 2018 и 2021 гг. [13].

Характеристики планировочных элементов

Для описания геометрических свойств планировочных элементов использованы следующие характеристики:

- коэффициент плотности застройки (K_d) — отношение площади всех этажей зданий и сооружений к площади участка;
- коэффициент озеленения деревьями (K_t) — отношение площади деревьев к площади участка;
- коэффициент озеленения травой и мелким кустарником (K_p) — отношение площади травы и кустарников к площади участка;
- коэффициент дорожных покрытий (K_r) — отношение площади дорог, включая участки с твердым покрытием, к площади участка;
- коэффициент грунтовых покрытий (K_g) — отношение площади грунтовых покрытий к площади участка.

Отличительной особенностью данного метода является возможность учета не только планировочных (K_t , K_p , K_r , K_g), но и объемно-пространственной (K_d) характеристик. Коэффициент K_d позволяет учесть трехмерную структуру зданий и сооружений. Это особенно важно при рассмотрении зданий различной формы, размеров в плане, этажности, количества зданий на участке.

Для расчета вышеуказанных характеристик использован метод квадратов. Согласно этому методу, каждая точка, выделенная на территории города (см. рис. 1), размещается в центре квадрата (рис. 2).

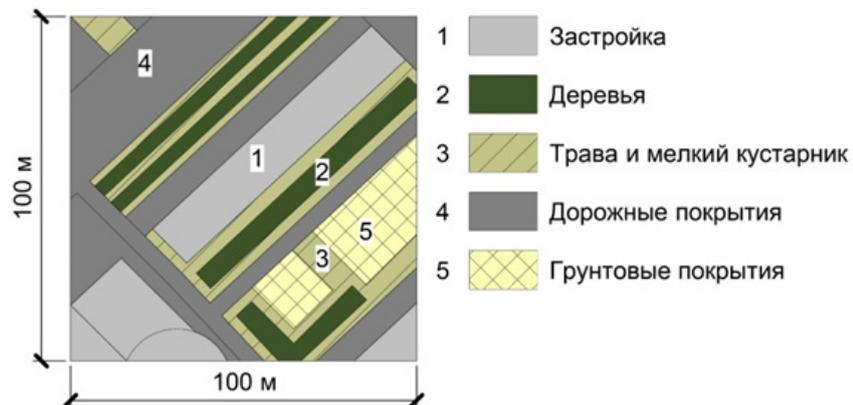


Рис. 2. Расчетная схема участка с различными планировочными элементами

Сторона квадрата принята равной 100 м, что соответствует данным спутников дистанционного зондирования в инфракрасном канале по разрешению сетки тепловых изображений [13].

При разработке расчетных схем участков использованы спутниковые фотоизображения (рис. 3).

Используя расчетные схемы, определены геометрические характеристики планировочных элементов.

По тепловым изображениям определены значения температуры поверхностей и вычислен показатель относительной температуры Θ [13]:

$$\Theta = \frac{T_s - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (1)$$

где T_s — температура рассматриваемого участка поверхности (в центре квадрата); T_{\min} , T_{\max} — соответственно минимальное и максимальное значения температуры поверхности.

По итогам расчета сформирована прямоугольная матрица коэффициентов K_d , K_t , K_p , K_r , K_g и показателя Θ .

Результаты исследования

Для раскрытия закономерности, учитывающей влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий, необходимо разработать многофакторную математическую модель, устанавливающую связь между характеристиками планировочных элементов и их влиянием на показатель относительной температуры. Построим корреляционно-

регрессионную математическую модель. Для этого используем следующие обозначения переменных (табл.).

				
№46 48.748295, 44.504771	№79 48.667169, 44.444424	№59 48.722027, 44.515946	№68 48.722027, 44.515946	№101 48.601941, 44.173773
				
№113 48.627797, 44.41498	№117 48.595601, 44.426219	№151 48.555054, 44.574302	№157 48.596901, 44.490003	№164 48.659172, 44.493417
				
№163 48.647298, 44.498671	№72 48.706409, 44.432136	№81 48.678248, 44.424635	№83 48.691388, 44.398871	№4 48.856399, 44.648341
				
№143 48.471107, 44.653597	№112 48.6209, 44.414986	№24 48.796448, 44.589141	№34 48.785247, 44.479726	№47 48.742443, 44.510217

Рис. 3. Выборочные спутниковые фотоизображения участков территории Волгограда для определения расчетных схем с указанием номера участка и его координат (из открытых источников)

Обозначения переменных

Наименование	Переменная
Коэффициент плотности застройки	X_1
Коэффициент озеленения деревьями	X_2
Коэффициент озеленения травой и мелким кустарником	X_3
Коэффициент дорожных покрытий	X_4
Коэффициент грунтовых покрытий	X_5
Показатель относительной температуры	Y

Коэффициенты по каждому из выделенных типов поверхностей являются факторными переменными (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), показатель относительной температуры — результирующая переменная (Y).

Ниже приведены результаты расчета коэффициентов корреляции (рис. 4).

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
X_1	1,000	-0,012	-0,095	0,431	-0,502	-0,062
X_2	-0,012	1,000	-0,083	-0,169	-0,382	-0,616
X_3	-0,095	-0,083	1,000	-0,109	-0,270	-0,199
X_4	0,431	-0,169	-0,109	1,000	-0,618	0,003
X_5	-0,502	-0,382	-0,270	-0,618	1,000	0,375
Y	-0,062	-0,616	-0,199	0,003	0,375	1,000

Рис. 4. Коэффициенты корреляции, полученные в программе

Для оценки силы корреляционной связи воспользуемся шкалой Чэддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0. Для обратной корреляционной связи коэффициенты принимают со знаком минус.

Анализ матрицы коэффициентов корреляции показывает, что мультиколлинеарность между всеми факторными переменными отсутствует, т. к. коэффициенты парной корреляции меньше 0,8. Поэтому в математической модели необходимо учесть все факторные переменные (рис. 5).

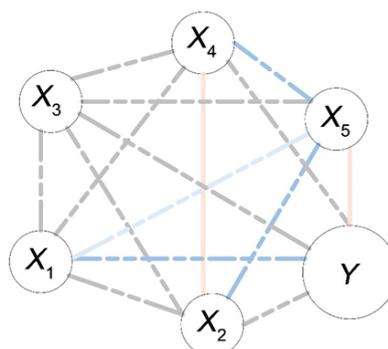


Рис. 5. Схема корреляционных связей между факторными и результирующей переменными

По итогам корреляционного анализа выявлены:

- заметная обратная корреляционная связь между переменными X_4 и X_5 ($r = -0,618$), что объясняется снижением площади грунтовых покрытий при увеличении площади дорожных покрытий;
- заметная обратная корреляционная связь между переменными X_2 и Y ($r = -0,616$), что объясняется снижением температуры поверхности участка при увеличении количества деревьев;
- заметная обратная корреляционная связь между переменными X_1 и X_5 ($r = -0,502$), что можно объяснить особенностями формирования застройки;
- умеренная обратная корреляционная связь между переменными X_2 и X_5 ($r = -0,382$), что можно объяснить снижением площади озеленения деревьями при увеличении площади грунтовых покрытий;

• умеренная прямая корреляционная связь между переменными X_1 и X_4 ($r = 0,431$), что объясняется увеличением площади дорожных покрытий и парковочных мест при увеличении плотности застройки;

• умеренная прямая корреляционная связь между переменными X_5 и Y ($r = 0,375$), что объясняется повышением температуры на открытых грунтовых покрытиях.

Связь между другими переменными слабая или отсутствует.

Получено уравнение регрессии в следующем виде:

$$Y = 0,838 - 0,0322X_1 - 0,766X_2 - 0,503X_3 - 0,337X_4 - 0,159X_5. \quad (2)$$

Средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - Y_{m,i}|}{n}; \quad (3)$$

среднеквадратичные ошибки:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{m,i})^2, \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (5)$$

В формулах (3), (4) приняты следующие обозначения: n — число узлов ($n = 165$); Y_i , $Y_{m,i}$ — соответственно расчетные (формула (2)) и измеренные значения показателя относительной температуры в i -м узле.

Расчетом по формулам (3) — (5) получены следующие значения ошибок: $MAE = 0,10$, $MSE = 0,02$, $RMSE = 0,13$. Указанные значения в целом говорят о достоверности полученных результатов.

Анализ уравнения (2) показывает, что все рассматриваемые характеристики планировочных элементов приводят к снижению показателя относительной температуры. Наибольший вклад в изменение температуры поверхности дает озеленение участка деревьями.

Обсуждение и выводы

Полученный результат подтверждает вывод о том, что деревья оказывают значительное влияние на смягчение ГТО [25, 28, 29]. Степень нагрева поверхности зависит от формы листьев, структуры и размера кроны, высоты дерева и других показателей. Охлаждающий эффект от дерева образуется вследствие затенения, испарения и термогравитационной конвекции (рис. 6).

Большое практическое значение имеет правильный выбор ассортимента деревьев и типа их посадки, применение ярусности, использование гибридных зеленых технологий. В работах [5, 18] выявлено влияние небольших зон с зелеными насаждениями на температурный режим территорий. По итогам исследования [7] рекомендовано располагать зеленые зоны на небольшом расстоянии друг от друга (не более 300 м) для оптимального охлаждения в границах планировочного образования.

Построена адекватная корреляционно-регрессионная математическая модель, устанавливающая связь между характеристиками планировочных элементов и их влиянием на показатель относительной температуры. По ито-

гам корреляционного анализа выявлены прямые и обратные корреляционные связи различной силы между отдельными переменными. Получено уравнение регрессии с минимальными ошибками. Согласно уравнению регрессии, наибольший вклад в изменение температуры поверхности дает озеленение участка деревьями.

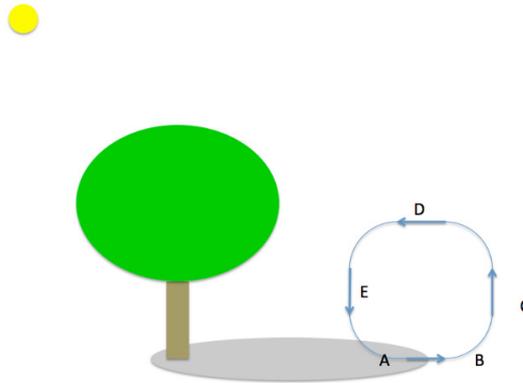


Рис. 6. Схема образования термогравитационной конвективной ячейки в зоне дерева: AB — горизонтальный перенос воздушной массы из зоны высокого давления (тень) в зону низкого давления (инсолируемый участок); C — восходящий поток нагретого воздуха; D — горизонтальный перенос воздушной массы в обратном направлении; E — нисходящий поток охлажденного воздуха

Научной новизной работы является установление закономерности, учитывающей влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий. Практическая значимость работы состоит в получении математической модели, отражающей эту закономерность.

Предлагаемая в статье математическая модель отражает закономерное влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий, что открывает широкие возможности оптимизации теплового состояния ГС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Aguareles M.* A mathematical model for the energy stored in green roofs // *Applied Mathematical Modelling*. 2023. Vol. 115. Pp. 513—540.
2. *Chen L.* The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models // *Building and Environment*. 2017. Vol. 118. Pp. 344—361.
3. *Emmanuel R.* *An Urban Approach To Climate Sensitive Design*. Taylor & Francis, 2012. DOI: 10.4324/9780203414644.
4. *García-Chan N., Licea-Salazar J. A., Gutierrez-Ibarra L. G.* Urban Heat Island Dynamics in an Urban–Rural Domain with Variable Porosity: Numerical Methodology and Simulation // *Mathematics*. 2023. Vol. 5. Iss. 11. Pp. 11—40.
5. *Корниенко С. В.* Энергоэффективность, экологическая безопасность, экономическая эффективность — приоритетные задачи «зеленого» строительства // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2017. Вып. 49(68). С. 167—177.
6. *Guo F.* Improving Natural Ventilation Performance in a High-Density Urban District: A Building Morphology Method // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. Pp. 952—958.
7. *Honjo T., Takakura T.* Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas // *Energy and Buildings*. 1990. Vol. 3-4. Iss. 15. Pp. 443—446.

8. *Jauregui E.* Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city // *Energy and Buildings*. 1990. Vol. 3-4. Iss. 15. Pp. 457—463.
9. *Корниенко С. В., Дикарева Е. А.* Анализ городского теплового острова средствами имитационного моделирования (на примере квартала) // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2023. № 1(41). С. 84—95.
10. *Li J.* Similarities and disparities in urban local heat islands responsive to regular-, stable-, and counter-urbanization: A case study of Guangzhou, China // *Building and Environment*. 2021. Vol. 199. Pp. 107935.
11. *McPherson E. G.* Evaluating the cost effectiveness of shade trees for demand-side management // *The Electricity Journal*. 1993. Vol. 9. Iss. 6. Pp. 57—65.
12. *Mei S.-J.* Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies and unique package building density // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 155. Pp. 324—338.
13. *Korniyenko S. V., Dikareva E. A.* Optical Remote Sensing for Urban Heat Islands Identification // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. Vol. 6. Iss. 104. Pp. 10404.
14. *Ng E.* Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong // *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 1. Iss. 101. Pp. 59—74.
15. *Stern N.* The Stern Review Report on the Economics of Climate Change. 2006.
16. *Nowak D. J., Greenfield E. J.* Tree and impervious cover change in US cities // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2012. Vol. 1. Iss. 11. Pp. 21—30.
17. *Oke T. R.* *Boundary Layer Climates*. Routledge, 2002.
18. *Saito I., Ishihara O., Katayama T.* Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area // *Energy and Buildings*. 1990. Vol. 3-4. Iss. 15. Pp. 493—498.
19. *Корниенко С. В., Дикарева Е. А.* Фактическая видимость небосвода при затенении деревьями с различной плотностью кроны // *Вестник МГСУ*. 2023. № 7. С. 1021—1031.
20. *Корниенко С. В.* Климатоп как климатический маркер урбанизированных территорий // *Социология города*. 2023. № 1. С. 100—112.
21. *Sangwan A.* A mathematical model for temperature-reducing potential of urban greenspaces // *Earth Science Informatics*. 2023. № 4 (16). Pp. 4199—4211.
22. *Wania A.* Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations // *Journal of Environmental Management*. 2012. Vol. 1. Iss. 94. Pp. 91—101.
23. *Xie X., Huang Z., Wang J.* Impact of building configuration on air quality in street canyon // *Atmospheric Environment*. 2005. Vol. 25. Iss. 39. Pp. 4519—4530.
24. *Xiong Y.* The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment: A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China // *Remote Sensing*. 2012. Vol. 7. Iss. 4. Pp. 2033—2056.
25. *Yuan C., Ng E., Norford L. K.* Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies // *Building and Environment*. 2014. Vol. 71. Pp. 245—258.
26. *Yu C., Hien W. N.* Thermal benefits of city parks // *Energy and Buildings*. 2006. Vol. 2. Iss. 38. Pp. 105—120.
27. *Halton J. H.* Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence // *Communications of the ACM*. 1964. Vol. 12. Iss. 7. Pp. 701—702.
28. *Taha H., Akbari H., Rosenfeld A.* *Vegetation Canopy Micro-Climate: A Field-Project in Davis, California* // Submitted to the *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1989.
29. *Zhong J., Cai X.-M., Bloss W. J.* Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 214. Pp. 690—704.

© *Корниенко С. В., Дикарева Е. А.*, 2024

Поступила в редакцию
в июне 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Корниенко С. В., Дикарева Е. А. Влияние планировочных элементов на температурный режим урбанизированных территорий // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 147—156. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_147.

Об авторах:

Корниенко Сергей Валерьевич — д-р техн. наук, советник РААСН, зав. каф. архитектуры зданий и сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; skorn73@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5156-7352

Дикарева Екатерина Александровна — старший преподаватель каф. архитектуры зданий и сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Sergey V. Korniyenko, Ekaterina A. Dikareva

Volgograd State Technical University

THE IMPACT OF PLANNING ELEMENTS ON THE TEMPERATURE CONDITIONS OF URBANIZED AREAS

An adequate correlation-regression mathematical model was built, establishing a natural relationship between the characteristics of planning elements and their influence on the temperature conditions of urbanized areas. The greatest contribution to the change in surface temperature is made by greening the site with trees. This supports the conclusion that green infrastructure has a significant impact on urban heat island (UHI) mitigation. The cooling effect of wood is formed due to shading, evaporation and thermogravitation convection. The obtained results open up wide opportunities for optimizing the thermal state of the urban environment at the stage of urban planning.

Key words: city, urban planning, planning element, thermal conditions, urbanization, urbanized area, mathematical model, green infrastructure.

For citation:

Korniyenko S. V., Dikareva E. A. [The impact of planning elements on the temperature conditions of urbanized areas]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 147—156. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_147.

About authors:

Sergey V. Korniyenko — Doctor of Engineering Sciences, Advisor of RAASN, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; skorn73@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5156-7352

Ekaterina A. Dikareva — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation