

УДК 551.583

Illia Sviatohorov, Post-Graduate of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

INCREASED HEAT STRESS FOR THE POPULATION OF URBANIZED AREAS AGAINST THE BACKGROUND OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

Abstract. *The combination of high temperature and relative humidity of the atmospheric air creates heat stress, which has a serious impact on the environment, society and the health of the population in urban areas. Using the example of the city of Kyiv, the paper investigated long-term changes in heat stress depending on global climate changes. Averaged monthly long-term climate data of the urban environment were studied, starting from 1981, based on monitoring data using the Copernicus Climate Change Service toolkit and data from the Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Predictive dynamics of temperature by conventional and wet bulb was investigated using OriginPro8 software. Data on the dependence of the frequency and unevenness of precipitation during the last decades are presented. The dependences of the value of the heat index (NI) on the temperature and air humidity for different observation periods were obtained. Over the past decade, Kyiv has seen a significant increase in average heat stress and the frequency of days and events with extreme heat stress. According to the obtained forecast estimates, in 2050 the heat index should increase by almost 30%, and the risk to the health of the population in the surrounding area and for workers in the open air will be interpreted as "high" levels at a relative humidity of 80%; "moderate" at a relative humidity of 50% and "low" at a relative humidity of 20%. The forecast temperature dynamics according to the conventional and according to the wet thermometer in the month of July at the end of different years is: 2021–2030 – 24.136 °C and 26.24 °C; 2030–2050 – 26.371 °C and 28.918 °C, respectively, with other equal conditions of the urban environment. An additional possibility of influence on the thermal dome appears already at the design stage, thanks to the variability of the placement of the projected buildings on the general plan, and the formation of individual buildings, in the correct area ratio green plantings to stone surfaces of facades and paving. The research data will be useful for the possible reduction of the size of the thermal dome over the city during the planning and reconstruction of the housing stock and the development of climate neutrality measures for the cities of Ukraine.*

Keywords: *urbanized areas; climate changes; heat dome; relative humidity; heat stress.*

I. Святогоров

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ПОСИЛЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТРЕСУ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ФОНІ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Анотація. *Поєднання високої температури і відносної вологості атмосферного повітря створює тепловий стрес, що має серйозний вплив на навколишнє середовище, суспільство та здоров'я населення на урбанізованих*

територіях. На прикладі м. Києва в роботі було досліджено багаторічні зміни теплового стресу в залежності від глобальних кліматичних змін. Вивчалися осереднені місячні багаторічні кліматичні дані міського середовища, починаючи з 1981 року, на підставі моніторингових даних з використанням інструментарію Copernicus Climate Change Service та даних Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром була досліджена за допомогою програмного забезпечення OriginPro8. Наведено дані щодо залежності частоти та нерівномірності випадіння опадів протягом останніх десятиліть. Отримано залежності величини теплового індексу (HI) від температури та вологості повітря для різних періодів спостережень. Протягом останнього десятиліття в м. Києві спостерігалось значне збільшення середнього теплового стресу та частоти днів і подій із екстремальним тепловим стресом. За отриманими прогнозними оцінками, у 2050 році тепловий індекс має підвищитися майже на 30%, а ризик для здоров'я населення на прибудинковій території та для робітників відкритого повітря буде трактуватися рівнями «високий» при відносній вологості повітря 80%; «помірний» при відносній вологості повітря 50% і «низький» при відносній вологості повітря 20%. Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром у липні наприкінці різних періодів складає: 2021–2030 рр. – 24,136 °C і 26,24 °C; 2030–2050 рр. – 26,371 °C і 28,918 °C відповідно при інших рівних умовах міського середовища. Додаткова можливість впливу на тепловий купол з'являється вже на стадії проєктування, завдяки варіативності розміщення проєктованих будинків на генеральному плані і формоутворення окремих будівель, у правильному співвідношенні площі зелених насаджень до кам'яних поверхонь фасадів і заощення. Дані дослідження стануть в нагоді для можливого зменшення величини теплового куполу над містом при плануванні і реконструкції житлового фонду та розробці заходів кліматичної нейтральності міст України.

Ключові слова: урбанізовані території; кліматичні зміни; тепловий купол; відносна вологість; тепловий стрес.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.49-59>

Вступ

Глобальні зміни клімату і місцеві умови утворення теплового куполу над забудованими територіями все частіше створюють зростаючу загрозу хвиль спеки та теплового стресу для населення [1]. Людина реагує на підвищення теплового стресу навіть сильніше, ніж на відповідне підвищення температури повітря [2]. Прогнозується, що тепловий стрес продовжить посилюватися в найближчі десятиліття в умовах глобального потепління [3–5] та посилювати ефект міського теплового острова (УHI). Міські поверхні мають нижче альbedo і можуть нарощувати ефект нагрівання, поглинаючи більше сонячного випромінювання, понижуючи величину випаровування та охолодження поверхні [6]. Не треба також нехтувати фактом, що міські будівлі збільшують шорсткість поверхні, підсилюють опір тертя повітря та зменшують швидкість вітру на поверхні, таким чином перешкоджаючи конвективному охолодженню. В дослідженні [7] пропонується враховувати антропогенне виділення тепла транспортом, що пересувається містом.

Тепловий стрес, який відчуває населення міста, можна виміряти за індексом тепла (HI), що описує відчутну температуру, яку сприймає людське тіло, та

розрахункову в поєднанні з відносною вологістю і температурою повітря. Посилення теплового стресу створює проблеми як для житлових приміщень [8–10], так і відкритого повітря. Одним з наслідків цього є зниження продуктивності праці [11, 12].

Ефект кліматичних змін для здоров'я міського населення можна прослідкувати на прикладі змін теплового стресу з усередненням окремих факторів по території міста (щільності забудови, інфраструктури, транспортних мереж, теплових викидів в атмосферу тощо). Для українських міст дане дослідження набуває актуальності при їх післявоєнній відбудові та при розробці заходів кліматичної нейтральності.

Мета цієї роботи – на прикладі м. Києва дослідити зміни впливу глобальних кліматичних змін на урбанізованих територіях на здоров'я населення через значення величини теплового стресу з метою подальшого зменшення величини теплового куполу над містом при плануванні і реконструкції житлового фонду.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми

Кількісній оцінці ефектів міського теплового острова та комфорту людини для міст різного розміру в залежності від міської морфології присвячено ряд робіт закордонних авторів [13–17 та ін.]. На основі регресійного аналізу вимірних метеорологічних даних в цих роботах, автори оцінювали просторову зміну температури протягом тропічного дня. В даних роботах встановлено взаємозв'язок між нічним вимірним міським островом тепла та землекористуванням, рослинністю, масштабністю забудови, наявністю водних об'єктів. Так, наприклад, було встановлено, що міста з великими водоймами поблизу густонаселених міст є вразливими до високих нічних температур під час хвиль спеки. В дослідженні [16] робиться висновок, що урбанізація прискорює зростання теплового стресу в містах приблизно на 30% порівняно із заміськими територіями. В роботі [17] ефект міського теплового острова для міст Європи було розглянуто з використанням даних про земний покрив в поєднанні з даними дистанційного зондування температури поверхні землі.

Впровадження концепції кліматичної нейтральності м. Києва вимагає мінімізації ефекту теплового острова з одночасним підвищенням рівня комфортності міста в загальному рейтингу упорядкованості (EIU Global Livability Ranking) ще на стадії проєктування мікрорайонів та реконструкції [18]. У зв'язку з погіршенням загальної соціально-економічної ситуації в місті Києві, його становище у рейтингу EIU, яке характеризує комфортність життя протягом 2011–2015 років, значно погіршилось (з 91-го місця у 2011 р. до 132-го у 2015 р. із 140 міст світу).

Підвищення якості містобудівної діяльності з урахуванням потреб суспільства та сучасних європейських практик створення кліматично нейтральних технологій «зеленого» будівництва передбачено Стратегією розвитку Києва до 2035 року. При цьому є необхідність враховувати виклики, що пов'язані з війною. В процесі післявоєнної реконструкції міст значну увагу треба приділити заходам щодо пом'якшення наслідків клімату, зниження споживання енергії в будівлях та спорудах, збільшення частки комплексного використання відновлюваної енергії у будинках, нарощування потенціалу для «зелених» будівель. Невід'ємною складовою вирішення даної проблеми є встановлення залежностей між поступовими глобальними кліматичними

змiнами i тепловим iндексом зовнiшнього повітря забудованих територiй. В роботi [19] наведено iлюстрацiю визначення температури за вологим термометром (W) як функцiї температури для рiзних рiвнiв вiдносної вологостi. Показано, що нагрiвання на 2°C навколишнього середовища призводить до збiльшення W, якщо вологiсть висока та/або температура висока. Пороговi значення W, що стосуються ризику для здоров'я людей, якi працюють або тренуються в умовах тепла, описано в роботi [20].

iндекс тепла HI, зазвичай, розраховується за допомогою регресiї Ротфуса [16]:

$$\begin{aligned} HI = & -8.784695 + 1.61139411 \times T - 2.338549 \times RH \\ & -0.14611605 \times T \times RH - 1.2308094 \times 10^{-2} \times T^2 \\ & -1.6424828 \times 10^{-2} \times RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH \\ & +7.2546 \times 10^{-4} \times T \times RH^2 + 3.582 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2, \end{aligned} \quad (1)$$

де T – температура атмосферного повітря, а RH – вiдносна вологiсть, яку насправдi сприймає людське тiло.

При проектуванні нових районiв задля пом'якшення нiчного спекотного стресу в мiстах та визначення районiв, якi пiддаються ризику пiд час спеки, необхідно враховувати ефект поглинання сонячних променiв поверхнею будiвлi (як прозорою, так i непрозорою) та орієнтацiю окремо взятої забудови на мапi мiсцевостi. В енергетичний баланс будiвлi, що складається на стадiї проектування, включається складова сонячних надходжень [21]. Такий фактор впливу на цю складову, як кут розташування будiвлi на мiсцевостi, на сьогоднiшнiй день враховано, на нашу думку, недостатньо.

Основні результати досліджень

З використанням iнструментарiю Copernicus Climate Change Service [22] нами було досліджено на прикладі м. Києва взаємозв'язок мiж середньомiсячною температурою повітря та частотою i нерiвномiрністю опадiв, вологiстю повітря, значенням теплового стресу за перiоди 1981–2010 та 2020–2021 роки.

Аналіз клiматичних даних за цi два зазначенi перiоди дозволив встановити кореляцiйнi залежностi мiж тепловим iндексом HI та вiдносною вологiстю за перiоди 1981–2010 рр. та 2020–2021 рр. по м. Києву, що представлено графiками на рис. 1, якi свiдчать про збiльшення iндексу HI при зменшеннi величини вологостi повітря.

Аналіз багаторiчної динамiки величини вологостi атмосферного повітря в м. Києві свiдчить про поступове її зниження на фонi прогнозного пiдвищення температурних показникiв.

Залежностi iндексу тепла (HI) вiд середньомiсячної температури повітря за перiоди 1981–2010 рр. та 2020–2021 рр. по м. Києву мають коефiцiєнти кореляцiї вiдповiдно 0,9167 i 0,995 (рис. 2). Збiльшення величини HI спостерiгається в лiтнi мiсяцi при пiдвищеннi температурних показникiв в найбільш спекотнi мiсяцi року.

Графiки на рис. 1 i рис. 2 свiдчать про те, що характер взаємозв'язку мiж величинами, що розглядаються, є постiйним.

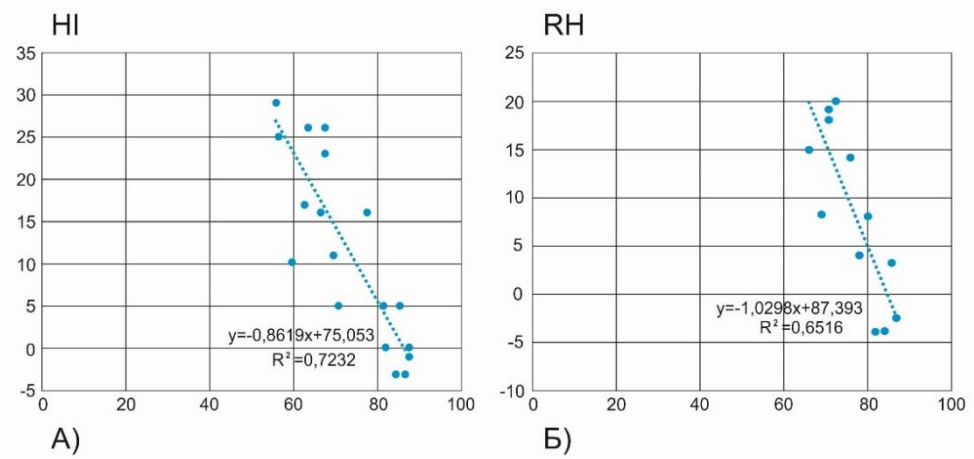


Рис. 1. Залежності величини теплового індексу HI від відносної вологості повітря. А) – період 1981–2010 рр.; Б) – період 2020–2021 рр.

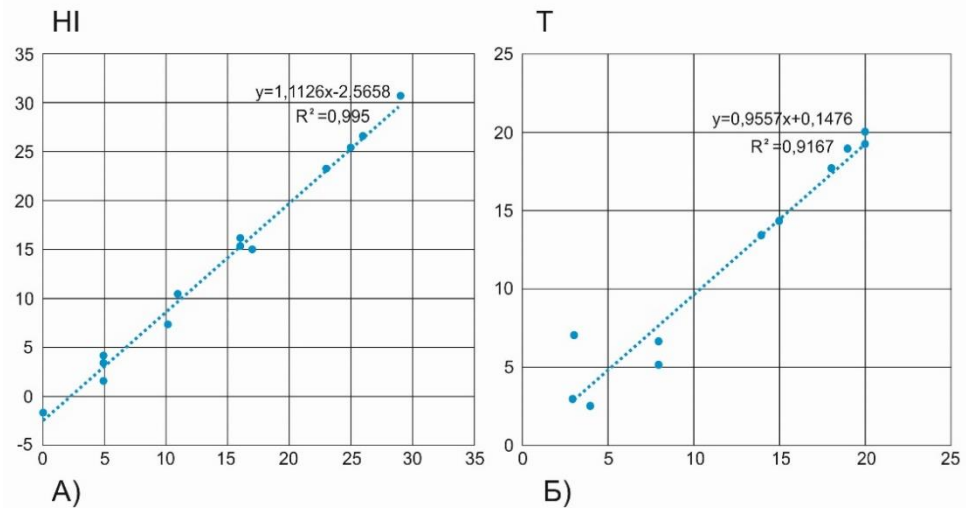


Рис. 2. Залежності величини теплового індексу HI від температури атмосферного повітря. А) – період 1981–2010 рр.; Б) – період 2020–2021 рр.

В таблиці 1 представлені середньомісячні величини опадів по м. Києву для періодів 1981–2020 рр. за даними [22], 1991–2020 рр. за даними [23], 2022 р. і 2023 р. за даними [23]. Узагальнена кліматична інформація за період 1991–2020 рр. є стандартним періодом та прийнята Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) як період, який найбільш повно характеризує сучасні глобальні зміни клімату. Дані таблиці 1 свідчать про змінення частоти і нерівномірності випадіння опадів по території міста.

На рис. 3 представлено залежності температури за вологим термометром (W) відповідно до [19]. Значення W визначалося за спрощеною формулою:

$$W = 0,567T + 0,393e + 3,94, \quad (2)$$

де T – температура в °C, а e – тиск насиченої пари. На графіку також представлено межі екологічного ризику для здоров'я населення в залежності від величини W.

Таблиця 1. Динаміка середньомісячних значень кількості опадів по м. Києву, мм

місяць року	1981–2020 рр. за даними [22]	1991–2020 рр. за даними [23]	2022 р. за даними [23]	2023 р. за даними [23]
I	41	37	50	19
II	40	39	17	30
III	42	40	12	42
IV	54	42	42	102
V	66	65	33	1
VI	88	74	42	87
VII	95	68	40	136
VIII	64	56	60	19
IX	68	58	63	8
X	47	46	44	66
XI	52	46	99	98
XII	49	47	58	65
Разом	696	618	560	673

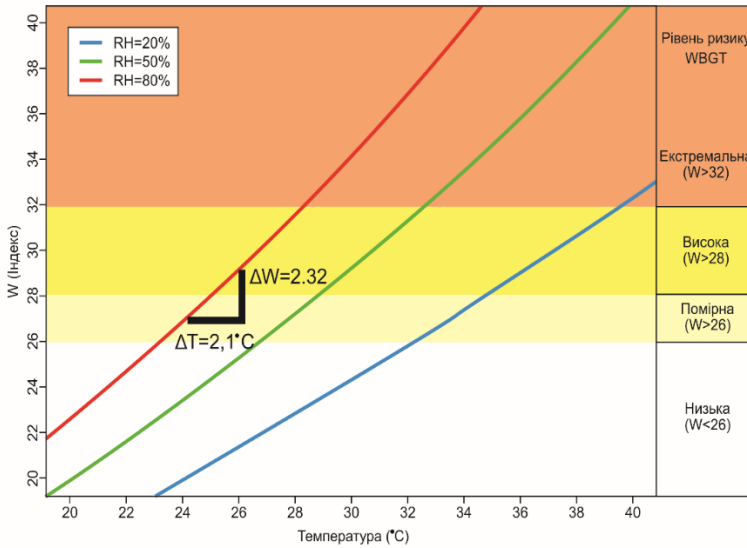


Рис. 3. Визначення температури (W) за вологим термометром як функції від різних рівнів відносної вологості відповідно до [19]. Рівні праворуч ілюструють рівень ризику, описаний у [20]

Відповідно до прогностичних оцінок підвищення температурних показників, що виконані за програмним забезпеченням OriginPro8, було побудовано графіки прогностичних оцінок температури за звичайним та вологим термометром в м. Києві в липні до 2050 року. Зокрема, на рис. 4 представлено прогносту динаміку температури за звичайним термометром.

Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром у липні складає для різних періодів: 1991–2020 рр. – 21,9°C і 23,853°C; 2021–2030 рр. – 24,136°C і 26,24°C; 2030–2050 рр. – 26,371°C і 28,918°C відповідно при інших рівних умовах міського середовища. Слід відмітити, що ці значення показників розраховані на кінець окремих періодів, які розглядаються. При

нанесенні цих даних на графік, представлений на рис. 3, можна бачити, як ці кліматичні зміни будуть впливати на здоров'я населення міста.

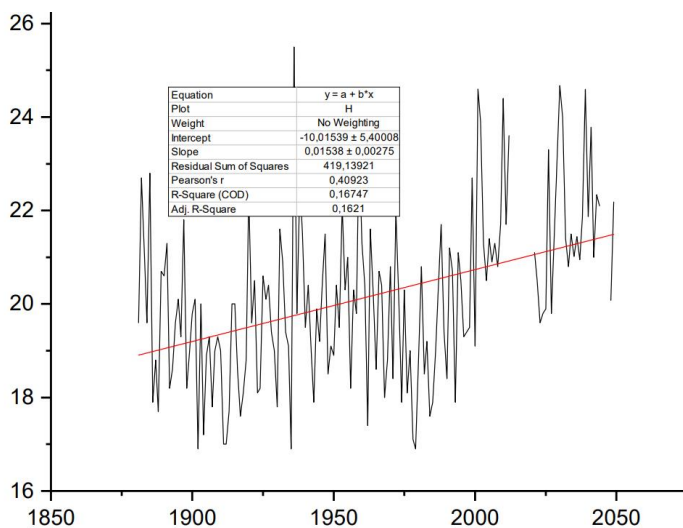


Рис. 4. Прогнозна динаміка температури в м. Київ до 2050 року

Так, при підвищенні прогнозних температурних показників на кінець 2030-х на 2,24^oC при інших рівних умовах і при вологості 80%, ризик для здоров'я населення м. Києва перейде від помірного до високого. При відносній вологості повітря 50% – від низького до помірного. А в умовах подальшого підвищення температурних показників – до високого. Наприкінці 2050 року навіть при вологості 50% ризик для здоров'я населення буде визначатися за наведеною шкалою як високий. Що стосується екстремальних температурних значень за липень місяць, то за період 1981–2010 рр. згідно з [22] вона дорівнювала 25^oC, за період 1991–2020 рр. згідно з [23] – 25,5^oC відповідно. При високій вологості категорія ризику для здоров'я населення при цьому визначається як висока.

Питання для обговорення

Даний аналіз щодо прогнозного впливу кліматичних умов на здоров'я населення м. Києва свідчить, що при плануванні забудови мають бути передбачені заходи для зменшення температурних показників атмосферного повітря в найбільш спекотні місяці року – тим самим сприяти послабленню теплового куполу над містом. Такими заходами можуть стати облаштування внутрішніх зелених двориків, недопущення утворення явища «міського каньйону», збільшення площі зелених насаджень у місті за рахунок порожніх ділянок, створення зелених дахів на існуючих будівлях, застосування в будівництві сучасних матеріалів покриття дахів зі значним коефіцієнтом відбиття сонячного тепла, застосування технологічних матеріалів замощення для відбиття сонячного тепла. Додаткова можливість впливу на тепловий купол з'являється завдяки варіативності розміщення проєктованих будинків на генеральному плані і формоутворення окремих будівель, з урахуванням їхньої

поверховості. За певною схемою забудови ділянок, у правильному співвідношенні площі зелених насаджень до кам'яних поверхонь фасадів і замощення можна впливати на температуру і рух повітря в міському середовищі. Дані позиції повинні бути враховані вже на стадії проектування.

Висновки

Поступове підвищення температури атмосферного повітря на урбанізованих територіях, яке сприяє утворенню теплового куполу над містом, значно впливає на величину теплового стресу населення. Зроблений в роботі аналіз температурних змін, починаючи з 1981 року, та прогнознi дані до 2050 року і, відповідно, ризик для здоров'я населення через величину НІ довів необхідність досліджень щодо зменшення температурного режиму прибудинкових територій.

Для комфортності проживання в містах необхідно впровадження як інноваційних енергоефективних технологій охолодження будівель в спекотні місяці року, так і заходи на прибудинковій території.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. A. (2015). *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
2. Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L. L., Wu, C.-f., Kan, H., Yi, S.-M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Saldiva, P. H. N., Honda, Y., Kim, H., & Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet*, 386 (9991), 369–375. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
3. Li, J., Chen, Y. D., Gan, T. Y., & Lau, N.-C. (2018). Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. *Nature Climate Change*, 8 (1), 43–47. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0036-2>
4. Matthews, T. K., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(15), 3861–3866. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114>
5. Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13 (3), 034003. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
6. Fujibe, F. (2003). Long-term surface wind changes in the Tokyo metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81 (1), 141–149. URL: <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.141>
7. Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, 13 (3), 034015. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>
8. Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., & Boland, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278–288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
9. Karl, T. R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302 (5651), 1719–1723. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1090228>

10. Zhang, B., Gao, J.-x., & Yang, Y. (2014). The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 37–43. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.003>
11. Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3 (6), 563–566. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
12. Zander, K. K., Botzen, W. J. W., Oppermann, E., Kjellstrom, T., & Garnett, S. T. (2015). Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, 5 (7), 647–651. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate2623>
13. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. G. J. Steeneveld, S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag. *JGR: Atmospheres*, Volume 116, Issue D20, <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
14. Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. Bert G. Heusinkveld, G. J. Steeneveld, L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, A. A. M. Holtslag *JGR: Atmospheres*, Volume 119, Issue 2, p. 667-692 <https://doi.org/10.1002/2012JD019399>
15. Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China. Congyuan Li, Ning Zhang. *JGR: Atmospheres*, Volume 126, Issue 12, e2020JD034066 <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
16. Increasing Heat Stress in Urban Areas of Eastern China: Acceleration by Urbanization. Ming Luo, Ngar-Cheung Lau. *Research Letter*, Volume 45, Issue 23, 2018, p. 13,060-13,069, <https://doi.org/10.1029/2018GL080306>
17. Statistical analysis describes urban heat island effect in Europe. Ernie Balcerak. *Eos*, Volume 95, Issue 6, Pages 60-60. <https://doi.org/10.1002/2014EO060010>
18. The Global Liveability Index 2023. URL: <https://www.eiu.com/n/campaigns/global-liveability-index-2023/>
19. Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. E. M. Fischer, K. W. Oleson, D. M. Lawrence, *Geophysical Research Letters*, *Climet*, Volume 39, Issue 3, 2012, <https://doi.org/10.1029/2011GL050576>
20. Willett, K. M., and S. C. Sherwood (2012), Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature, *Int. J. Climatol.*, 32, 161–177, doi:10.1002/joc.2257
21. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
22. Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-era5-explorer>
23. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: <http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/meteorolohichna/meteorolohichni-dani-meteostantsii-kyiv-na-9-hodynu-ranku>

Стаття надійшла до редакції 05.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.11.2023

REFERENCES

1. Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. A. (2015). *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
2. Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L. L., Wu, C.-f., Kan, H., Yi, S.-M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M.,

- Saldiva, P. H. N., Honda, Y., Kim, H., & Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet*, 386(9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
3. Li, J., Chen, Y. D., Gan, T. Y., & Lau, N.-C. (2018). Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. *Nature Climate Change*, 8(1), 43–47. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0036-2>
4. Matthews, T. K., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(15), 3861–3866. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114>
5. Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
6. Fujibe, F. (2003). Long-term surface wind changes in the Tokyo metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81(1), 141–149. <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.141>
7. Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>
8. Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., & Boland, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
9. Karl, T. R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302(5651), 1719–1723. <https://doi.org/10.1126/science.1090228>
10. Zhang, B., Gao, J.-x., & Yang, Y. (2014). The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.003>
11. Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563–566. <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
12. Zander, K. K., Botzen, W. J. W., Oppermann, E., Kjellstrom, T., & Garnett, S. T. (2015). Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, 5(7), 647–651. <https://doi.org/10.1038/nclimate2623>
13. G. J. Steeneveld, S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *JGR: Atmospheres*, 116(D20), <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
14. G. J. Steeneveld, L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, A. A. M., Bert G. Heusinkveld (2012). Holtslag Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *JGR: Atmospheres*, 119(2), 667-692. <https://doi.org/10.1002/2012JD019399>
15. Congyuan Li, Ning Zhang (2020). Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China. *JGR: Atmospheres*, 126(12), e2020JD034066. <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
16. Ming Luo, Ngar-Cheung Lau (2018). Increasing Heat Stress in Urban Areas of Eastern China: Acceleration by Urbanization. *Research Letter*, 45(23), 13,060-13,069. <https://doi.org/10.1029/2018GL080306>
17. Balcerak, E. (2014). Statistical analysis describes urban heat island effect in Europe. *Eos*, 95(6), 60-60. <https://doi.org/10.1002/2014EO060010>
18. The Global Liveability Index 2023. Retrieved from <https://www.eiu.com/n/campaigns/global-liveability-index-2023/>
19. Fischer, E. M., Oleson, K. W., Lawrence, D. M. (2012). Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 39, 3. <https://doi.org/10.1029/2011GL050576>

20. Willett, K. M., and S. C. Sherwood (2012). Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int. J. Climatol.*, 32, 161–177. <https://doi.org/10.1002/joc.2257>
21. DSTU 9190:2022 Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
22. Climate Data Store. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-era5-explorer>
23. Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Retrieved from <http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/meteorolohichna/meteorolohichni-dani-meteostantsii-kyiv-na-9-hodynu-ranku>

The article was received 05.09.2023 and was accepted after revision 29.11.2023

Святогорів Ілля Олегович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com