



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 551.524:504.3
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.8>

ДИНАМІКА МІСЬКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА НАД ЛУЦЬКОМ ПРОТЯГОМ 2013–2023 РОКІВ

В. В. Федонюк¹, С. О. Пугач², М. А. Федонюк³

У ХХІ столітті рівень урбанізації постійно зростає як у світі, так і в Україні. У Волинській області найбільшим містом є Луцьк. У Луцьку, як і в будь-якому великому місті, формується свій мікроклімат, особливості якого визначаються характером діяльної поверхні та циркуляційних атмосферних процесів, рельєфом, розподілом водних об'єктів і зелених зон, розташуванням промислових зон та іншими природними й антропогенними чинниками. Одним із проявів впливу великого міста на регіональні особливості клімату є формування міського острова тепла. Явище острова тепла впливає на роботу міських комунальних служб і транспорту, воно може призводити до змін місцевого мікроклімату, наприклад, посилювати дискомфорт мешканців міст улітку внаслідок впливу гіпертермії. Тому його дослідження є актуальним науковим завданням. Мета роботи – дослідження умов формування, динаміки, структури й екологічних наслідків утворення міського острова тепла в Луцьку. Завдання роботи: 1) за допомогою порівняльного аналізу космічних супутникових інфрачервоних знімків території Луцька оцінити поширення й походження осередків формування острова тепла над містом у річній динаміці та за різних погодних умов протягом періоду 2013–2023 років; 2) провести серію інструментальних вимірювань температури повітря в Луцьку й околицях з наступним оцінюванням результатів; 3) дослідити наявність зв'язку між типом і характером метеорологічних умов та проявами острова тепла; 4) розробити пропозиції щодо покращення мікроклімату міста та його окремих мікрорайонів у контексті проблеми, яка вивчалася.

Методи аналізу проблеми: у процесі підготовки роботи використовувалися аналітичний, описовий, порівняльно-оціночний, математично-статистичний і графічний методи. Застосовано

¹ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри екології
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)
e-mail: ecolutsk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1880-6710

² доктор географічних наук, професор,
професор кафедри економічної та соціальної географії
(Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк)
e-mail: puhachserhiy@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3738-7961

³ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри екології
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)
e-mail: m.fedoniuk@lntu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4034-3695

типові методики й алгоритми статистичного та графічного аналізу у програмі "MS Excel", інструментальний і картографічний методи.

Результати: визначено умови формування та річну динаміку міського острова тепла в Луцьку; виділено райони та ділянки міста із сильними проявами підвищених значень температури повітря і діяльної поверхні; оцінено відмінності полів температури в місті та на приміській території; розроблено серію графіків, діаграм, картограм за результатами інструментальних вимірів та їх аналізу; розроблено пропозиції щодо покращення мікроклімату міста та його окремих мікрорайонів. Новизна дослідження полягає в тому, що вперше проведено детальний аналіз проявів міського острова тепла над Луцьком із застосуванням поєднання методів ДЗЗ та інструментального аналізу. Практичне застосування одержаних результатів можливе в галузі планування містобудівних заходів з адаптації до кліматичних змін і наростання випадків прояву періодів екстремальної спеки (озеленення, енергоощадні технології, планування мережі штучних водних об'єктів у місті, оптимізація роботи комунальних структур і транспорту).

Ключові слова: міський острів тепла, Луцьк, температура повітря, температура діяльної поверхні, дистанційне зондування Землі.

DYNAMICS OF THE URBAN HEAT ISLAND OVER LUTSK DURING 2013–2023

V. V. Fedoniuk, S. O. Pugach, M. A. Fedoniuk

In the 21st century the level of urbanization is constantly growing both in the world and in Ukraine. In the Volyn region, the largest city is Lutsk. In Lutsk, as in any large city, its own microclimate is formed, the features of which are determined by the nature of the underlying surface and circulation processes in the atmosphere, relief, distribution of green areas and water bodies, location of industrial zones and other natural and anthropogenic factors. One of the manifestations of the influence of a large city on regional climate features is the formation of an urban heat island. The phenomenon of a heat island affects the work of urban utilities and transport, it can lead to changes in the local microclimate, for example, increase the discomfort of city residents in the summer due to the influence of hyperthermia.

Therefore, its study is an urgent scientific task.

The purpose of the work – research into the conditions of formation, dynamics, structure and environmental consequences of the urban heat island in Lutsk. Tasks of the work: 1) using a comparative analysis of space satellite infrared images of the Lutsk territory, assess the distribution and origin of heat island formation centers over the city in annual dynamics and under different weather conditions during the period 2013–2023; 2) conduct a series of instrumental measurements of air temperature in Lutsk and its surroundings with subsequent evaluation of the results; 3) investigate the existence of a connection between the type and nature of meteorological conditions and manifestations of the heat island; 4) develop proposals for improving the microclimate of the city and its individual microdistricts in the context of the problem being studied.

In the process of preparing the work, analytical, descriptive, comparative-evaluative, mathematical-statistical and graphic methods were used. Typical methods and algorithms of statistical and graphic analysis in MS Excel, instrumental and cartographic methods.

The conditions for the formation and annual dynamics of the urban heat island in Lutsk were determined; areas and sections of the city with strong manifestations of elevated air temperature and active surface were identified; differences in temperature fields in the city and in the suburban area were assessed; a series of graphs, diagrams, cartograms were developed based on the results of instrumental measurements and their analysis; proposals were developed to improve the microclimate of the city and its individual microdistricts. The novelty of the study lies in the fact that for the first time a detailed analysis of the manifestations of the urban heat island over Lutsk was carried out using a combination of remote sensing methods and instrumental analysis. The practical application of the obtained results is possible in the field of planning urban development measures to adapt to climate change and the increase in cases of periods of extreme heat (greening, energy-saving technologies, planning a network of artificial water bodies in the city, optimization of the work of municipal structures and transport).

Key words: urban heat island, Lutsk, air temperature, active surface temperature, remote sensing of the Earth.

Вступ

У ХХІ ст. велика кількість жителів Землі проживає в містах. Рівень урбанізації

постійно зростає і в Україні. Луцьк – це місто, яке стрімко розвивається та розширює свою площу. У Луцьку формується

власний мікроклімат, особливості якого визначаються характером діяльної поверхні та циркуляційних процесів в атмосфері, рельєфом, розподілом зелених зон та водних об'єктів, розміщенням промислових зон та іншими чинниками. Одним із проявів впливу великого міста на місцеві особливості клімату є формування міського острова тепла. Згідно з визначенням Усесвітньої метеорологічної організації (WMO), острів тепла (Urban Heat Island, UHI, або міський тепловий острів (далі – МТО)) – це явище підвищених показників температурного поля над територією міста порівняно з його околицями, яке має просторову та часову, сезонну та добову динаміку (Свінціцька, 2016).

Зміни температурного режиму пов'язані з антропогенним тепловим забрудненням, із заміною в місті природних поверхонь, укритих рослинністю, на асфальтові чи бетонні, які інакше поглинають і відбивають сонячну радіацію; опалення приміщень у холодну пору року посилює ефект острова тепла, діють також інші чинники. Явище острова тепла може призводити до змін міського мікроклімату, наприклад, посилювати дискомфорт мешканців улітку внаслідок гіпертермії. Усе це визначило актуальність теми даної наукової роботи.

Об'єктом дослідження є температурне поле міста Луцька та його динаміка протягом періоду 2013–2023 рр.

Мета роботи – дослідження умов формування, динаміки, структури й екологічних наслідків утворення міського острова тепла в місті Луцьку.

Завдання роботи: 1) за допомогою порівняльного аналізу космічних супутникових інфрачервоних знімків, вибраних за період 2013–2023 рр., оцінити поширення й походження осередків формування острова тепла над Луцьком у річній динаміці та за різних погодних умов; 2) провести серію інструментальних вимірювань температури повітря протягом холодного періоду 2023–2024 рр. у Луцьку й околицях з наступним оцінюванням одержаних результатів; 3) дослідити наявність зв'язку між типом і характером метеорологічних умов та проявами острова тепла; 4) розробити пропозиції щодо покращення мікроклімату міста в контексті проблеми, яка вивчалася.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що його результати можуть використовуватися в освітній і навчальній діяльності, для вирішення завдань планування

міської території, розміщення нових промислових об'єктів або збільшення потужностей вже наявних, забудови та реконструкції мікрорайонів Луцька, для оцінювання екологічного стану території тощо.

Перший аналіз островів тепла в місті розпочався ще в XIX ст. Поняття міського острова тепла (Urban Heat Island, UHI) увів Л. Говард, який проводив аналіз для Лондона в 1818 р. (Клімат ..., 2010). Проте активні дослідження для різних міст і регіонів проводилися вже у другій половині XX ст. У 60–70-ті рр. XX ст. американські та європейські вчені кількісно оцінили потоки антропогенного тепла в містах. Було опубліковано наукові праці щодо острова тепла Г. Лансберга, А. Розенфельда, Х. Тахи, які зараз вважаються класичними (Свінціцька, 2016; Федонюк і Федонюк, 2017). У них проведено аналіз впливу окремих природних і антропогенних чинників. Досліджувались альbedo поверхонь, особливості конвекції та турбулентності, впливу озеленення на тепловий режим, відмінності у використанні штучних матеріалів чи планувальних містобудівних рішень.

У наш час такі дослідження продовжуються. Зокрема, аналізуються проблеми й перспективи використання методів дистанційного зондування для аналізу проявів міських островів тепла (Dien et al., 2024); розробляються математичні моделі прогнозування поширення та інтенсивності цих островів (Tehrani et al., 2024); вивчається потенційний еволюційний вплив островів тепла на фенотипи живих організмів (Sarah & Martin, 2020); досліджуються практичні можливості пом'якшення впливу таких островів шляхом розвитку багаторівневої зеленої інфраструктури в містах (Wu et al., 2024). Окремі праці присвячені підсумковому аналізу та класифікації типів, категорій і спрямованості наукових досліджень міських островів тепла (Qin et al., 2024).

Для України прояви островів тепла вперше вивчалися наприкінці XX ст. в серії монографій, присвячених мікроклімату 9 великих міст: Києва, Одеси, Харкова, Полтави, Дніпропетровська, Чернівців, Львова, Вінниці та Луцька (Шевченко та ін., 2011; Свінціцька, 2016). Найдетальніше проблема була досліджена для Києва в оновленому виданні монографії (Клімат ..., 2010).

У XXI ст. дослідження міських островів тепла в Україні було продовжено. Зокрема, вивчався їхній вплив на мікроклімат міських мікрорайонів та прилеглої приміської

території (Шевченко та ін., 2011; Артамонов, 2013); аналізувалися прояви островів тепла над окремими містами України – Києвом (Шевченко та ін., 2011; Лялько та ін., 2016), Львовом (Шуплат, 2022; Кучерявий та ін., 2023), Харковом (Матвієнко, 2019), Одесою (Маринін і Дранічер, 2013), Луцьком (Романюк та ін., 2024). Актуальними напрямками досліджень є аналіз проявів міських островів тепла в контексті адаптації до кліматичних змін (Адаптація ..., 2016) та вивчення можливостей зниження негативних наслідків цих проявів шляхом упровадження зелених екодахів (Гречко, 2022), вертикального та горизонтального озеленення і спеціального підбору культур для нього (Нужина та ін., 2022). Вказані праці були враховані у формулюванні висновків і рекомендацій щодо зниження проявів острова тепла в Луцьку.

З появою у вільному доступі масивів космічних знімків, зокрема – зроблених в інфрачервоному діапазоні, розпочалося вивчення островів тепла із застосуванням методів ДЗЗ (Зацерковний та ін., 2018; Федонюк і Федонюк, 2017). Багато праць вказаного напрямку виконано науковцями ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАНУ» (Лялько та ін., 2016), які провели аналіз теплових полів Києва за супутниковими інфрачервоними знімками, запропонували методику обробки й інтерпретації таких знімків. Елементи цієї методики було використано авторами під час підготовки статті.

Для міст Волині вивченню міських островів тепла були присвячені лише окремі роботи, що підтверджує актуальність вибраної теми. Зокрема це праці, які розглядали прояви острова тепла для Луцька (Тарасюк і Тарасюк, 2014; Федонюк і Федонюк, 2017; Нетребчук та ін., 2018; Романюк та ін., 2024) та дослідження щодо Нововолинська (Стельмах і Нетребчук, 2023).

Матеріал і методи

Для оцінювання та порівняння теплового режиму та температурних відмінностей м. Луцька і його околиць було використано можливості та матеріали ресурсу “Land Viewer”. У процесі дослідження проаналізовано дані супутникових знімків в інфрачервоному тепловому каналі THERMAL INFRARED супутників Landsat-8. Landsat – це супутники Геологічної служби США, дані комплексу Landsat-8 доступні користувачам за період із 2013 р. З урахуванням періодичності прольоту супутника над нашою терито-

рією (кожні 8 днів) за період 2013–2023 рр. на сервісі щороку доступні до 46 космічних знімків території Луцька. Використано фільтр за хмарністю 13%, частину знімків також відбраковано як неякісні. Усього за 2013–2023 рр. було знайдено й описано 58 знімків доброї якості. На ці знімки було також накладено контур Луцька, для кращої просторової візуалізації та порівняння. Для кожного з 58 знімків проводилися комплексний візуальний аналіз і порівняння з фактичними метеорологічними умовами відповідної доби. Метеоумови були описані на основі даних електронного архіву сайту (Метеопост ..., 2023) і даних Волинського обласного центру з гідрометеорології. Аналіз метеопоказників дозволив оцінити зв'язок між погодою і проявами острова тепла.

Інфрачервоні чорно-білі теплові знімки THERMAL INFRARED дозволяють аналізувати температуру окремих об'єктів та ділянок на поверхні землі. Що вища температура, то світлішим, білішим є колір ділянки на знімку, і навпаки. Серед досліджених 58 знімків детально описувалися ті, які чітко показують острів тепла над Луцьком, його складники, сегменти, дають змогу оцінити відмінності та динаміку теплових показників міста та приміських територій у просторі та часі. Статистичні обчислення та побудова графіків проведені з використанням інструментів MS Excel. Виконано також картографічне представлення отриманих результатів із використанням програми “Surfer”.

Аналіз даних ДЗЗ було доповнено інструментальним вивченням особливостей динаміки температурного режиму Луцька та його околиць.

Восени 2023 р. в Луцьку було встановлено 6 автоматичних датчиків температури Temperature Data Logger RC-5 USB. Після проведення тестових випробувань датчики розпочали роботу 20 листопада, приблизно 20 грудня було проведено перше контрольне знімання показників, 10 січня – друге. Такий тип датчика є реєстратором температури багаторазового використання з автоматичним генеруванням PDF-звіту. Він сумісний із комп'ютером, дані можуть бути збережені у форматі *.xls для подальшого аналізу й обробки.

Точки встановлення датчиків вибиралися таким чином, щоб розмістити їх як у центральних районах міста, у житлових і селітебних зонах, так і на околицях і у приміській зоні. Виміри температури проводилися через інтервал 30 хв.

Використані методи дослідження: аналітичний, порівняльно-оцінковий, описовий, статистично-математичний, графічний, картографічний, методи інформаційно-комунікаційних технологій (далі – ІКТ), методи дистанційного зондування Землі (далі – ДЗЗ).

Результати

Результати аналізу вибірки 58 космічних знімків, зроблених в інфрачервоному діапазоні, за різні роки (2013–2023 рр.), пори року (літо, осінь, зима, весна) та за різних метеорологічних умов, дозволяють установити, що острів тепла над Луцьком виражений, температурні поля міста та його околиць мають відмінності, а їх геопросторовий розподіл залежить як від сезону року, так і від метеоумов. На рис. 1 представлено порівняння теплових знімків із вираженням островом тепла в теплий і холодний періоди року. Бачимо, що на зимових знімках міський острів тепла простежується чітко, захоплює значну територію, а на літніх – локально, островцями та плямами.

Територія Луцька має складну просторову ландшафтну структуру. Тому острів тепла зазвичай сегментований, розділений на сектори й елементи, які можемо виділити, наприклад, на знімку за 5 червня 2015 р. (рис. 2). Як бачимо, просторовий розподіл острова тепла має неоднорідний характер. Його окремі елементи проявляються у формі світлих плям із вираженими, не надто розсіяними краями. Видно їх локаль-

ний характер. Окремі об'єкти (наприклад, завод КРЗ, котельні в районі 40-ого кварталу, ТРЦ «Адреналін» можуть об'єднуватися в сегменти – сегмент Північної промислової зони). Під час проведення аналізу зон, де є найбільші локальні теплові островці, видно, що це промислові підприємства (наприклад, ПрАТ СКФ «Україна», «Terichem» – виробник полімерних плівок, «Modern-Expo» – виробник торгового обладнання, ТОВ «Кромберг енд Шуберт», а також Північна промислова зона), транспортні вузли і розв'язки (наприклад, Київ – Дубно на вул. Рівненській, автостоянки), дороги з інтенсивним трафіком (вул. Рівненська, Дубнівська, Ковельська, Центр), великі торгові центри, гіпермаркети («Епіцентр», «Нова лінія»), очисні споруди.

Аналіз рис. 2 та даних табл. 1 також підтверджує, що за будь-яких метеорологічних умов у безвітряну погоду острів тепла проявляється значно помітніше. Після порівняння теплових знімків, які стосуються різних сезонів, бачимо, що на зимових знімках острів тепла видно дуже чітко, він охоплює велику площу, а на літніх знімках острів виражений більш локально.

Отже, аналіз теплових знімків показав, що в холодну морозну погоду температурний контраст міста й околиць є сутєвим. Виділяються житлові мікрорайони (часто з контурами будинків), дороги (формують характерну «павутину»). Узимку формується острівець тепла над очисними спорудами

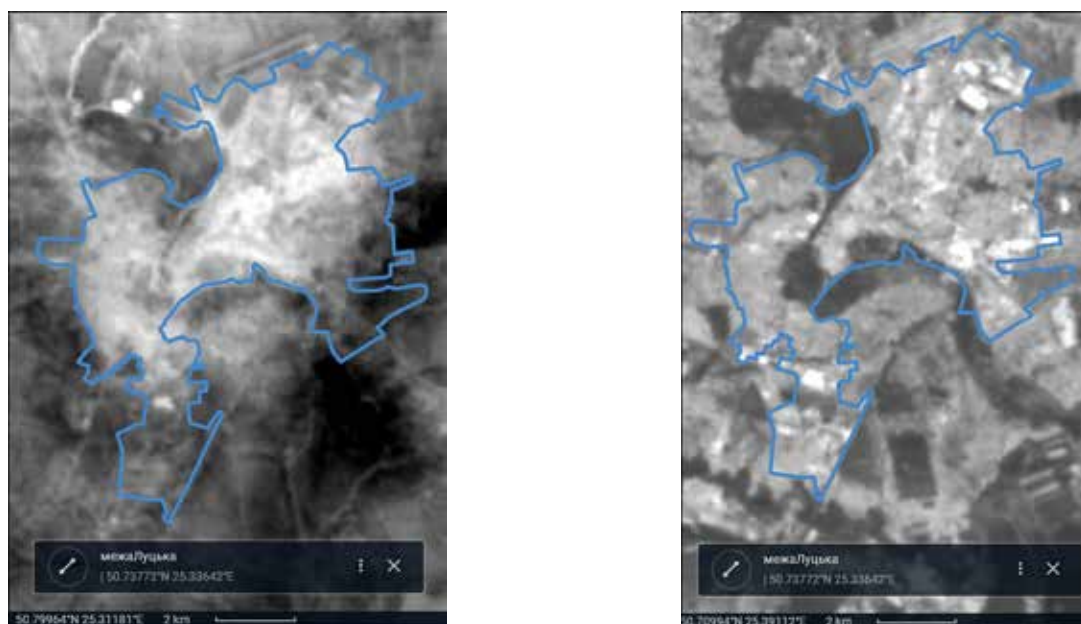


Рис. 1. Порівняння теплових знімків у теплий і холодний періоди року: зліва – знімок супутника Landsat-8, зроблений узимку, 26 січня 2017 р., справа – улітку, 5 червня 2015 р.

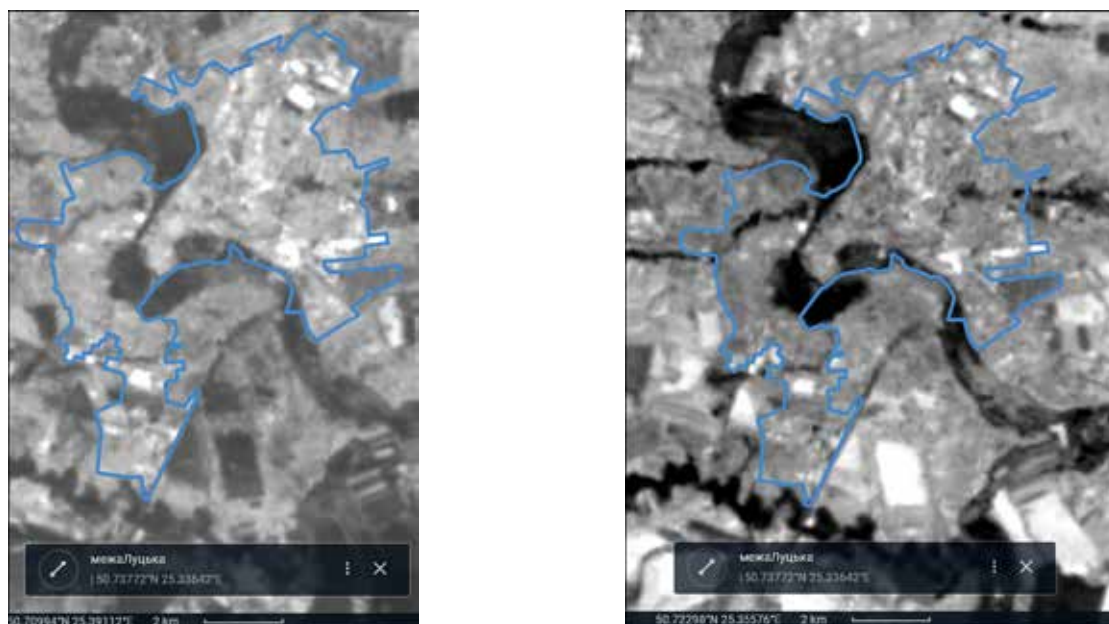


Рис. 2. Порівняння теплових знімків Луцька, зроблених за різної швидкості вітру за схожості температурних умов (зліва – 5 червня 2015 р., справа – 2 вересня 2015 р.)

Таблиця 1

Погодні умови в Луцьку 5 червня 2015 р. та 2 вересня 2015 р.

Дата спостереження	Середня температура повітря, °C	Min температура повітря, °C	Max температура повітря, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с	Середній атмосфер. тиск, гПа	Хмарність неба, бали
5 червня 2015 р.	+21,9	+8,5	+22,5	52	1,5	1 027,4	0,9
2 вересня 2015 р.	+22,5	+9,3	+24,1	55	4,0	1 008,3	1,0

(північно-західна околиця міста). Очевидно, температура відпрацьованих стічних міських вод є високою, ці скиди змінюють також і тепловий баланс р. Стир, за течією на знімках видно підвищення температури води.

Детальне вивчення 58 космічних знімків дозволяє оцінити річну динаміку острова тепла та його поширення. У Луцьку прояви острова тепла є не зовсім класичними, описаними в науковій літературі (з максимальним проявом острова тепла взимку). У Луцьку в теплий період (травень – жовтень) спостерігалось набагато більше проявів виразного острова тепла, аніж в холодний період (листопад – березень). Припускаємо, що така динаміка пов'язана зі скороченням тривалості періодів залягання стійкого снігового покриву в Луцьку.

У річній динаміці найчіткішими є прояви острова тепла в липні, серпні та січні. Деякі знімки за вересень і травень за умови вста-

новлення «літньої» жаркої, сухої чи помірно вологої погоди демонстрували також високу вираженість острова тепла. Водночас на знімках за грудень і лютий локалізація острова тепла виражена мало. На нашу думку, це також пов'язано зі скороченням тривалості стійкого снігового покриву в холодний період року на Волині, що є одним із проявів глобального потепління клімату. Що стосується більшості знімків, віднесених до перехідних сезонів року (весна – осінь), то локалізація острова тепла в цей період розмита, частіше він проявляється окремими плямами, осередками, які легко прив'язуються до окремих господарських чи промислових об'єктів у місті (крупні котельні, заводи, великі гіпермаркети, ТЦ з їхніми вентиляційними системами, очисні споруди міської каналізації тощо).

В окремі періоди виявлені ділянки підвищених температур на територіях, що оточу-

ють м. Луцьк. Серед причин появи островців тепла на приміській території виділимо такі чинники: а) спалювання сухою та стерні в період весняних і осінніх польових робіт на сільськогосподарських угіддях і дачних масивах; б) прогрівання темних розораних ділянок сільгоспугідь навесні та наприкінці літа (жнивів); в) сильне прогрівання заасфальтованих ділянок улітку (гаражні кооперативи, механізовані ділянки в селах тощо).

У таблиці 2 та на рис. 3–4 представлено інтегровані результати інструментального аналізу температури повітря автоматичними датчиками в 6 точках. Дані таблиці (див. табл. 2) та картограми (див. рис. 4) показують, що найвищі середні та максимальні температури повітря спостерігалися в центральних мікрорайонах Луцька, які щільно забудовані, мають висотну забудову, густу транспортну мережу,

Таблиця 2

Осереднені результати автоматичного моніторингу температури повітря в м. Луцьку й околицях

Температурний показник	Датчик 1, вул. Львівська, Університет	Датчик 2, мікрорайон Вересневе, вул. Далека	Датчик 3, село Боратин	Датчик 4, просп. Молоді, 33-й квартал	Датчик 5, дачний масив Промінь	Датчик 6, мікрорайон Красне
Середня температура, °C	0,389	0,200	1,635	1,487	0,282	1,314
Максимальна температура, °C	2,802	2,125	3,267	3,763	2,404	4,389
Мінімальна температура, °C	-2,121	-1,827	-0,187	-0,654	-1,771	-1,443
Амплітуда температури, °C	4,923	3,952	3,454	4,417	4,175	5,832

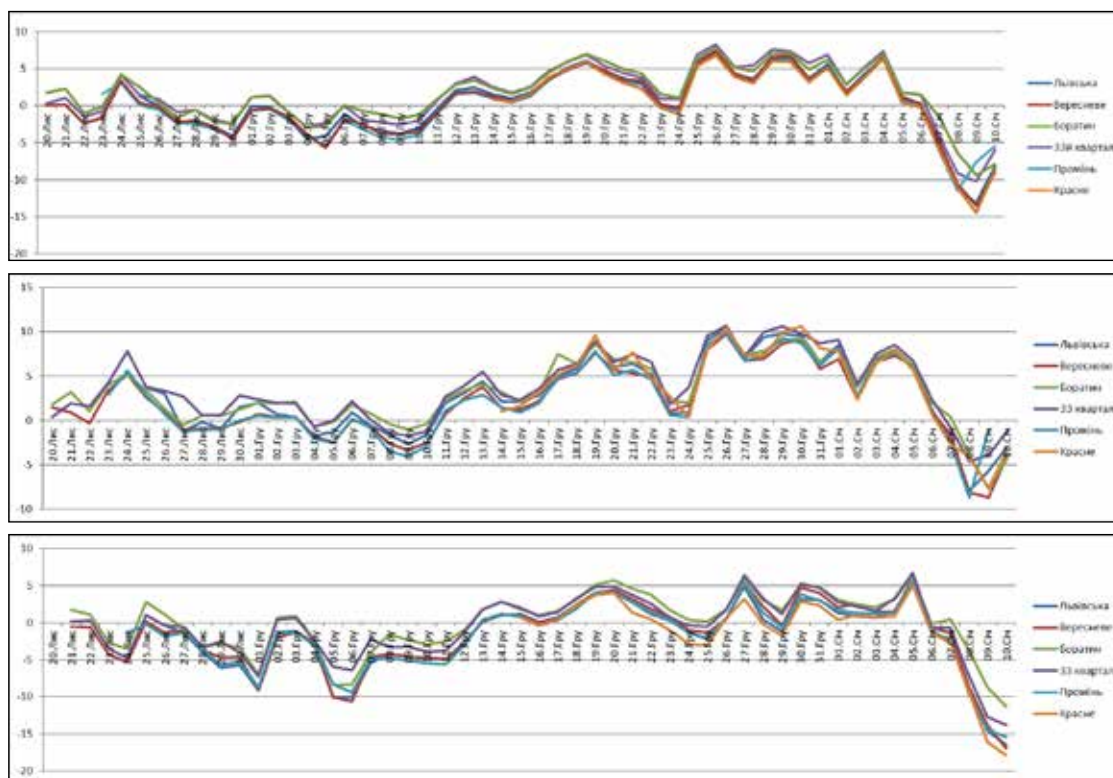


Рис. 3. Динаміка температури повітря t^0 , визначеної автоматичними датчиками, 20 листопада 2023 р. – 10 січня 2024 р. Середні добові, максимальні добові та мінімальні добові температури (вертикальна вісь – значення t^0 , °C)

поєднують житлові квартали та селітебні зони (33-й квартал, Красне). Підвищені температури (середні, максимальні) відмічені й у с. Боратин, куди зміщується острів тепла. Знижені температури характерні для міських околиць, прилеглих до міста дачних масивів (Вересневе, вул. Далека; Промінь), які не розташовані на осі переважних вітрів. Різниця середніх температур між точками може досягати 1,5 °С. Найнижча мінімальна температура й одна з найбільших амплітуд температури спостерігалися в районі вул. Львівської, це пов'язано з тим, що вулиця – одна з магістралей, яка є аераційним коридором, напрямом її збігається з напрямком переважних вітрів. Проте найвища амплітуда температур і найвища максимальна температура були зафіксовані в районі Красного – припускаємо, що причиною є спиртзавод та його теплі щоденні викиди в атмосферне повітря.

Аналіз картограм температурних показників досліджуваного періоду (див. рис. 4) підтверджує наявність над містом острова тепла в холодну пору року з його зміщенням у східному, південно-східному, південному напрямках.

Оскільки датчики робили виміри кожні 30 хв, результати дозволяють оцінити також добову мінливість температури. Загалом добовий хід був типовим для кліматичної зони, але було виявлено періодичні різкі підвищення температури на 1,5–2,5 °С за датчиком 3 (Красне), вони спостерігалися майже щоденно, о 12:45–13:00 год, за винятком періоду 1 січня 2024 р. – 7 січня 2024 р. Припускаємо, що це наслідок залпових викидів нагрітих газів на спиртзаводі.

Обговорення

Теплове забруднення є одним із найпоширеніших видів фізичних антропогенних забруднень у місті. Утворення острова тепла в основному пов'язане з антропогенними перетвореннями діяльної поверхні. Заасфальтовані та забетоновані ділянки, стіни будівель, споруд у денні години накопичують деяку кількість тепла, а вночі віддають його навколишньому повітрю. У містах також зменшені транспірація і випаровування із ґрунту, (мало природних ландшафтів), що підсилює прояви острова тепла. У місті багато джерел прямих теплових викидів (будинки, автотранспорт, котельні тощо). Острів тепла не є стаціонарним і може проявляти динаміку у просторі та в часі, має добовий і річний хід. Удень різниця температур між містом і замиською територією незначна. Проте вночі в місті тепліше, ніж на околицях.

На формування та інтенсивність острова тепла в Луцьку впливає низка чинників: 1) *погода*. Найсуттєвіший вплив мають хмарність неба та вітер. Розміри острова є найбільшими за безвітряної і ясної погоди. Сильний вітер переміщує повітря та приводить до зменшення острова тепла. Для невеликих міст швидкості вітру в 4 м/с може бути досить для зникнення острова тепла. У хмарні дні надходить менше прямої сонячної радіації та зменшено нагрівання поверхонь; уночі хмарність теж зменшує прояви острова. Луцьк розташований у зоні помірно-континентального клімату, під впливом повітряних мас, що надходять з Атлантики. Для міста характерні висока вологість повітря, помірні температури, значна кількість атмосферних опадів, вітер до 3–4 м/с, що

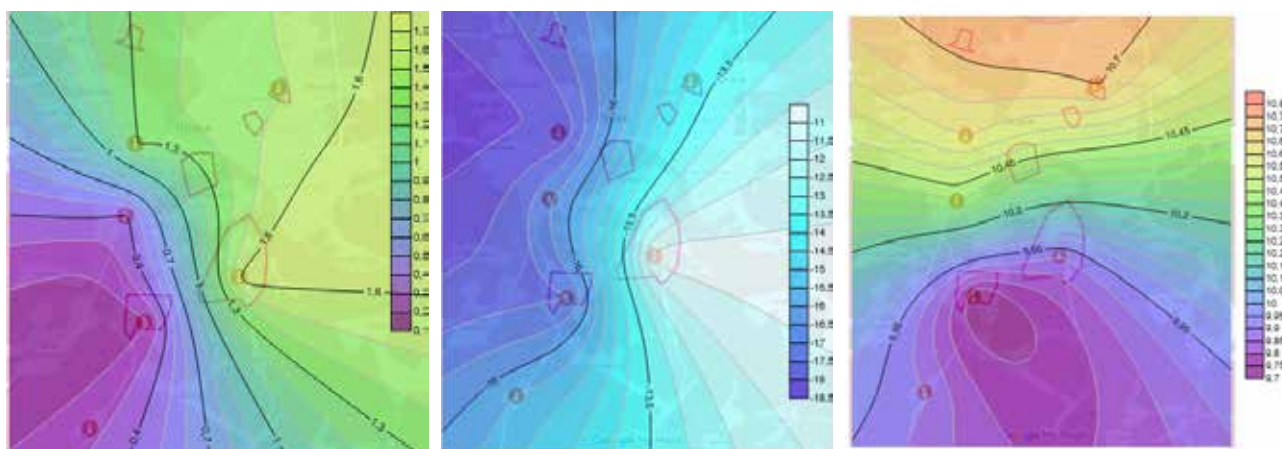


Рис. 4. Картограма розподілу середніх, мінімальних і максимальних значень температури повітря t° в Луцьку й околицях (шкали значення t° – $^\circ\text{C}$)

сприяє формуванню острова тепла; 2) *географічне положення*. Впливає на формування острова, через клімат регіону (режим хмарності, вітровий режим, інсоляція); 3) *сезон року, час доби*. За сприятливих умов для розвитку острова тепла вдень різниці температур у місті та на приміських територіях зазвичай невелика, найбільші контрасти температури проявляються через 2–3 години після заходу сонця. У великих містах острів тепла зберігається в нічний час до сходу сонця і збільшує мінімальну температуру повітря зранку; 4) *функції міста та панівні види антропогенної діяльності*. Значна кількість тепла виділяється під час діяльності, пов'язаної зі спалюванням різних видів палива. Штучний підігрів повітря підсилюється взимку. У Луцьку помітний вплив на формування острова здійснюють великі промислові об'єкти, автошляхи, великі спальні житлові мікрорайони та крупні торгові центри; 5) *розміри міста*: його конфігурація, площа міської забудови, ступінь зміни умов діяльної поверхні чи кількість тепла, яка виробляється; 6) *міський рельєф*. Прояви теплового острова перебувають у прямій залежності від особливостей рельєфу місцевості. У рельєфі Луцька виділяються висотні перепади долини річки Стир та її приток; 7) *наявність водних об'єктів і зелених зон*. Водні плеса є найбільш холодними діяльними поверхнями в містах удень і одними з найтепліших уночі, особливо в ранкові години. У Луцьку до найбільших водних об'єктів, які впливають на сегментування острова тепла, належать р. Стир, її притоки – Сапалаївка, Омеляник, Черногузка, Жидувка. Великі зелені зони – парки та сквери міста, також впливають на його сегментування.

Отже, міський острів тепла, що є вираженим над Луцьком у різні сезони року, – це цікаве явище, що впливає на мікроклімат і екологію міста. До наслідків виникнення в місті острова тепла належать такі явища та процеси: 1) формування своєрідної циркуляції (сільський бриз) і купола забрудненого повітря над центром міста; 2) збільшення тривалості безморозного періоду, зростання вегетаційного періоду, скорочення тривалості заморозків, часу залягання снігового покриву, частоти випадання снігу; 3) зростання випадків гіпертермії, зростання споживання води та появи фотохімічних смогів улітку. Наявність острова тепла має також низку наслідків соціально-економічного характеру: зниження

потреб в опаленні взимку та зростання необхідності кондиціонування повітря влітку. Міський острів тепла впливає на роботу транспорту, міського комунального господарства, енергетичних мереж.

Висновки

Проведене дослідження динаміки острова тепла в Луцьку та його впливу на мікроклімат міста дозволяє зробити такі висновки:

1) над Луцьком формується міський острів тепла, що має виражену структуру, сезонну й річну динаміку. Його утворення залежить від антропогенних і природних чинників, серед яких – перетворення людиною діяльних поверхонь у місті та трансформація потоків тепла;

2) варто виокремити такі особливості острова тепла над містом:

– над Луцьком формується острів тепла, який частіше виразно проявляється в теплий період (травень – жовтень), ніж у холодний (листопад – березень), що пов'язано зі скороченням періодів залягання стійкого снігового покриву;

– аналіз 58 космічних знімків за період 2013–2023 рр. показав чітку, просторово окреслену структуру міського острова тепла, він часто практично збігається з контурами м. Луцька, особливо в періоди з морозною, холодною погодою, з наявним сніговим покривом узимку, а також із дуже жаркою, сухою чи помірно вологою, безвітряною та малохмарною погодою влітку. За всіх типів погоди чіткішими є прояви острова тепла у штильову, безвітряну погоду;

– за будь-яких типів погодних умов на знімках простежуються сталі осередки тепла: міські очисні споруди, найбільші промислові підприємства, гіпермаркети й торгові центри, дві промислові зони (Північна, зона в районі вул. Рівненської, та Привокзальна). Було виявлено посилення із часом проявів теплових плям деяких із цих осередків (наприклад, ТОВ «Кромберг енд Шуберт», що пов'язано зі збільшенням виробничих потужностей і площ підприємств);

– найчастіше острів тепла є сегментованим; на два найбільші сегменти його ділить р. Стир; локальними осередками острова тепла в Луцьку є «спальні» житлові мікрорайони, а серед окремих об'єктів було виділено міські очисні споруди, торгові центри, котельні, великі промислові підприємства;

– відмічено зміщення проявів острова тепла в передмісті, на південний схід в окремі періоди, що пов'язуємо з напрямком панівних вітрів у регіоні;

– моніторинг температури в листопаді – січні 2023–2024 рр. за допомогою 6 автоматичних датчиків, установлених у різних районах, показав наявність температурних відмінностей між центральними та приміськими районами Луцька в межах 1,5–2 °C (за осередненими показниками досліджуваного періоду);

3) для зниження негативних наслідків проявів міського острова тепла рекомендуємо методи горизонтального та вертикального озеленення, зокрема – запуск пілотних проєктів екодахів або зелених покрівель;

зелені теплозахисні бар'єри вздовж доріг і створення аераційних коридорів; використання в будівництві зовнішніх матеріалів із високою світловідбивною здатністю та заходи зі зменшення тепловтрат у комунальній і виробничій сферах.

Подяки

Автори висловлюють подяку своїм учням Анні Сергіївні Панькевич та Дмитру Олексійовичу Романюку, які долучалися до проведення інструментальних спостережень за температурою повітря в місті Луцьку.

Список використаної літератури

Адаптація до зміни клімату: зелені зони міст на варті прохолоди / Т.Т. Казанцев та ін. Київ : Зелена хвиля, 2016. 40 с.

Артамонов Б.Б. Аналіз впливу мікрокліматичних зон на процеси кліматоутворення у містах в умовах глобальної зміни клімату. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. № 23. С. 133–137.

Гречко А.А. Досвід та переваги застосування зелених дахів як елементу зеленої інфраструктури. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2022. № 26. С. 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03>.

Зацерковний В.І., Оберемок Н.В., Березіна П.О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками Landsat. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2018. № 1. С. 106–113. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>.

Клімат Києва / за ред. В.І. Осадчого, О.О. Косовця, В.М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2010. 320 с.

Кучерявий В.П., Генік Я.В., Кучерявий В.С., Шуплат Т.І., Гоцій Н.Д. Екопросторові та теплофізичні особливості формування «острова тепла» Львівського середмістя і життєвість деревних рослин. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. Львів, 2023. Вип. 33 (3). С. 23–33. <https://doi.org/10.36930/40330304>.

Лялько В.І., Крилова Г.Б., Філіпович В.Є. Вивчення розподілу поверхневих температур в історичній частині м. Києва. *Світ геотехніки*. 2016. № 2. С. 27–29.

Маринін І.А., Дранічер О.Р. Деякі оцінки характеристик острова тепла м. Одеса. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2013. № 12. С. 54–61.

Матвієнко М.О. Особливості міського острова тепла в Харкові. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 3. С. 131–133.

Метеопост – Архів погоди [Електронний ресурс]. URL: <https://meteopost.com/weather/archive/> (дата звернення: 10.01.2024).

Нетребчук І.М., Недбайло Д.Р., Лапчук С.В. Температурні аномалії влітку в місті Луцьку Волинської області. *Економіка міста та урбаністика : матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. Київ : КНЕУ, 2018. С. 162–167.

Нужина Н.В., Іванова І.Ю., Грицак А.Р., Дробик Н.М. Посухостійкі види дерев та кущів – важлива ланка для зменшення негативних ефектів «міських островів тепла». *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Біологія»*. 2022. Т. 82. № 3. С. 37–43. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.3.6>.

Романюк Д.О., Панькевич А.С., Федонюк В.В., Федонюк М.А. Геопросторова оцінка поля температури в Луцьку. *Contemporary challenges of society and ways to overcome them : The 4th International scientific and practical conference, January 30 – February 02, 2024. Tallinn, Estonia : International Science Group*, 2024. 297 p. Р. 68–71.

Свінціцька Г.І. Дослідження термічного режиму великого міста у світовій практиці. *Фізична географія та геоморфологія*. 2016. № 2. С. 96–99.

Стельмах В.Ю., Нетребчук І.М. Особливості формування «острова тепла» над містом Нововолинськом та шляхи оптимізації мікрокліматичних змін. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Географія»*. 2023. № 1. Вип. 54. С. 23–32. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.1.3>.

Тарасюк Н.А., Тарасюк Ф.П. Регіональні прояви глобального потепління (за даними спостережень по метеостанції Луцьк). *Географія та екологія: наука і освіта* : матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Умань, 10–11 квітня 2014 р. / відп. ред. О.В. Браславська. Умань : ВПЦ «Візаві» (видавець М.М. Сочінський), 2014. С. 330–333.

Федонюк М.А., Федонюк В.В. Проблеми теплового забруднення селітебних територій: дослідження та моніторинг. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1 (15). С. 231–239 [Електронний ресурс]. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5308> (дата звернення: 10.12.2024).

Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Самчук Є.В. Температурні аномалії великого міста. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. Вип. 8. С. 67–73. [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/rmegs> (дата звернення: 09.10.2024).

Шуплат Т.І. Особливості формування «острова тепла» львівського середмістя. *Охорона природи в контексті енергетичної та екологічної безпеки України* : збірник праць Перших зимових читань у Синьогорі / за ред. І.М. Данилика, Ю.С. Шпарика. 13–14 грудня 2022 р. Івано-Франківськ, 2022. С. 33–38.

Diem P.K., Nguyen C.T., Diem N.K., Diep N.T.H., Thao P.T.B., Hong T.G., Phan T.N. Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. № 33. P. 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101081>.

Qin Y., Ghalambaz S., Sheremet M., Baro M., Ghalambaz M. Deciphering urban heat island mitigation: a comprehensive analysis of application categories and research trends. *Sustainable Cities and Society*. 2024. V. 101. P. 105081. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105081>.

Sarah E.D., Martin R.A. Evolutionary Consequences of the Urban Heat Island. *Urban Evolutionary Biology*. 2020. 5. P. 91–110.

Tehrani A.A., Veisi O., Delavar Y., Bahrami S., Sobhaninia S., Mehan A. Predicting urban Heat Island in European cities: A comparative study of GRU, DNN, and ANN models using urban morphological variables. *Urban Climate*. 2024. № 56. P. 102061. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102061>.

Wu Q., Huang Y., Irga P., Kumar P., Li W., Wei W., ... Zhou J.L. Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure. *Journal of Environmental Management*. 2024. № 370. P. 122985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122985>.

References

Adaptatsiia do zminy klimatu: zeleni zony mist na varti prokholody. (2016) [Adapting to climate change: urban green spaces keep cool] / T.T. Kazantsev ta in. Kyiv : Zelena khvyliia, 40 p. [in Ukrainian].

Artamonov, B.B. (2013). Analiz vplyvu mikroklimatychnykh zon na protsesy klimatoutvorennia u mistakh v umovakh hlobalnoi zminy klimatu [Analysis of the influence of microclimatic zones on climate formation processes in cities under conditions of global climate change]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy [Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine]*, 23, 133–137 [in Ukrainian].

Hrechko, A.A. (2022). Dosvid ta perevahy zastosuvannia zelenykh dakhiv yak elementu zelesnoi infrastruktury [Experience and benefits of using green roofs as an element of green infrastructure]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriiia "Ekolohiia" [Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"]*, 26, 32–42. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-03> [in Ukrainian].

Zatserkovnyi, V.I., Oberemok, N.V., & Berezina, P.O. (2018). Prostorovo-chasovyi analiz "ostroviv tepla" mehapolisa za suputnykovymy znimkamy Landsat [Spatiotemporal analysis of megalopolis "Heat Islands" based on Landsat satellite images]. *Naukoiemni tekhnolohii [Science-intensive technologies]*, 1, 106–113. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377> [in Ukrainian].

Klimat Kyieva (2010). [Climate of Kyiv] / za red. V.I. Osadchoho, O.O. Kosovtsia, V.M. Babichenko. Kyiv : Nika-Tsentr. 320 p. [in Ukrainian].

Kucheriavyi, V.P., Henyk, Ya.V., Kucheriavyi, V.S., Shuplat, T.I., & Hotsii, N.D. (2023). Ekoprostorovi ta teplofizychni osoblyvosti formuvannia "ostrova tepla" Lvivskoho seredmistia i zhyttievist derevnykh roslyn [Ecospatial and thermophysical features of the formation of the "heat island" of Lviv city center and the vitality of woody plants]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekh-*

nichnoho universytetu Ukrainy [Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine], 33 (3), 23–33. <https://doi.org/10.36930/40330304> [in Ukrainian].

Lialko, V.I., Krylova, H.B., & Filipovych, V.Ie. (2016). Vyvchennia rozpodilu poverkhnevyykh temperatur v istorychnii chastyni m. Kyieva [Study of surface temperature distribution in the historical part of Kyiv]. *Svit geotekhniky [World of Geotechnics]*, 2, 27–29 [in Ukrainian].

Marynin, I.L., & Dranicher, O.R. (2013). Deiaki otsinky kharakterystyk ostrovu tepla m. Odesa [Some assessments of the characteristics of the heat island of Odessa]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 12, 54–61 [in Ukrainian].

Matviienko, M.O. (2019). Osoblyvosti miskoho ostrova tepla v Kharkovi [Features of the urban heat island in Kharkiv]. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolojiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3, 131–133 [in Ukrainian].

Meteopost – Arkhiv pohody [Meteopost – Weather archive]. [Electronic resource] URL: <https://meteopost.com/weather/archive/> (access date 10.01.2024) [in Ukrainian].

Netrobchuk, I.M., Nedbailo, D.R., & Lapiuk, S.V. (2018). Temperaturni anomalii vlitku v misti Lutsku Volynskoi oblasti [Temperature anomalies in summer in the city of Lutsk, Volyn region]. *Ekonomika mista ta urbanistyka [Urban economics and urban planning]*. Materialy Mizhnar. naukovo-prakt. internet-konf. Kyiv : KNEU, 162–167 [in Ukrainian].

Nuzhyna, N.V., Ivanova, I.Iu., Hrytsak, L.R., & Drobyk, N.M. (2022). Posukhostiiki vydy derev ta kushchiv – vazhlyva lanka dlia zmenshennia nehatyvnykh efektiv “miskykh ostroviv tepla” [Drought-resistant tree and shrub species are an important link in reducing the negative effects of “urban heat islands”]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriiia “Biolojiia” [Scientific notes of Volodymyr Hnatiuk TNPU. Series “Biology”]*, 82, 3, 37–43. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.3.6> [in Ukrainian].

Romaniuk, D.O., Pankevych, A.S., Fedoniuk, V.V., & Fedoniuk, M.A. (2024). Heoprostorova otsinka polia temperatury v Lutsku [Geospatial assessment of the temperature field in Lutsk]. *Contemporary challenges of society and ways to overcome them*. The 4th International scientific and practical conference, January 30 – February 02, 2024. Tallinn, Estonia, International Science Group, 68–71 [in Ukrainian].

Svintsitska, H.I. (2016). Doslidzhennia termichnoho rezhymu velykoho mista u svitovii praktytsi [Research on the thermal regime of a large city in world practice]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfolojiia [Physical geography and geomorphology]*, 2, 96–99 [in Ukrainian].

Stelmakh, V.Iu., & Netrobchuk, I.M. (2023). Osoblyvosti formuvannia “ostrova tepla” nad mistom Novovolynsk ta shliakhy optymizatsii mikroklimatychnykh zmin [Features of the formation of a “heat island” over the city of Novovolynsk and ways to optimize microclimatic changes]. *Naukovi zapysky TNPU imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriiia “Heohrafiia” [Scientific notes of Volodymyr Hnatiuk TNPU. Series “Geography”]*, 1 (54), 23–32. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.1.3> [in Ukrainian].

Tarasiuk, N.A., & Tarasiuk, F.P. (2014). Rehionalni proiavy hlobalnoho poteplinnia (za danymy sposterezhen po meteostantsii Lutsk) [Regional manifestations of global warming (according to observations at the Lutsk weather station)]. *Heohrafiia ta ekolojiia: nauka i osvita [Geography and Ecology: Science and Education]*: materialy V Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastiu, m. Uman, 10–11 kvit. 2014 r. / vidp. red. O.V. Braslavsk. Uman: VPTs “Vizavi” (vydavets M.M. Sochinskyi), 330–333 [in Ukrainian].

Fedoniuk, M.A., & Fedoniuk, V.V. (2017). Problemy teplovoho zabrudnennia selitebnykh terytorii: doslidzhennia ta monitorynh [Problems of thermal pollution of residential areas: research and monitoring]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia [Environmental safety and balanced resource use]*, 1 (15), 231–239. [Electronic resource] URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5308> (access date 10.12.2024) [in Ukrainian].

Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., & Samchuk, Ye.V. (2011). Temperaturni anomalii velykoho mista [Temperature anomalies of a large city]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 8, 67–73. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/rmegs> (access date 09.10.2024) [in Ukrainian].

Shuplat, T.I. (2022). Osoblyvosti formuvannia “ostrova tepla” lvivskoho seredmistia [Features of the formation of the “heat island” of the Lviv city center]. *Okhorona pryrody v konteksti enerhetychnoi ta ekolohichnoi bezpeky Ukrainy [Nature protection in the context of energy and environmental security of Ukraine]*: Zbirnyk prats Pershykh Zymovykh chytan v Synohori / za red. I.M. Danylyka, Yu.S. Shparyka. 13–14 hrudnia 2022 r., Ivano-Frankivsk, 33–38 [in Ukrainian].

Diem, P.K., Nguyen, C.T., Diem, N.K., Diep, N.T.H., Thao, P.T.B., Hong, T.G., & Phan, T.N. (2024). Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, 33, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101081> [in English].

Qin, Y., Ghalambaz, S., Sheremet, M., Baro, M., & Ghalambaz, M. (2024). Deciphering urban heat island mitigation: a comprehensive analysis of application categories and research trends. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105081> [in English].

Sarah, E.D., & Martin, R.A. (2020). Evolutionary Consequences of the Urban Heat Island. In book: *Urban Evolutionary Biology*. May 2020, 91–110 [in English].

Tehrani, A.A., Veisi, O., Delavar, Y., Bahrami, S., Sobhaninia, S., & Mehan, A. (2024). Predicting urban Heat Island in European cities: A comparative study of GRU, DNN, and ANN models using urban morphological variables. *Urban Climate*, 56, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102061> [in English].

Wu, Q., Huang, Y., Irga, P., Kumar, P., Li, W., Wei, W., ... & Zhou, J.L. (2024). Synergistic control of urban heat island and urban pollution island effects using green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 370, 122985. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122985> [in English].

Отримано: 25.02.2025
Прийнято: 15.05.2025