

УДК 504.064.3:(528.88:551.525.2+528.909477–250

DOI: 10.18372/2310-5461.37.12377

Зацерковний В. І., д-р техн. наук, доц.Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
orcid.org/0000-0003-2346-9496
e-mail: vitallii.zatsekovnyi@gmail.com*Оберемок Н. В.*, канд. техн. наук, доц.Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0002-7230-8149
e-mail: oberemokn@gmail.com*Березіна П. О.*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0002-9877-0585
e-mail: polin.berezina@gmail.com

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ «ОСТРОВІВ ТЕПЛА» МЕГАПОЛІСА ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗНІМКАМИ LANDSAT

Вступ

Міські «острови тепла» — це мікрокліматичні явища, викликані підвищенням температури у великих містах і мегаполісах відносно до прилеглих територій. «Острови тепла» формуються за рахунок об'єднання тепло-абсорбційних поверхонь, виділення тепла машинами та відсутністю (нестачею) рослинного покриву.

Актуальність теми визначається постійним зростанням рівня урбанізації. За прогнозами вечних очікується, що до 2050 р. 70 % населення світу буде проживати у містах. А сучасне місто суттєво впливає на клімат, створюючи на його окремих вулицях і площах своєрідні мікрокліматичні умови, що визначаються забудовою, покриттям вулиць, розподілом зелених насаджень тощо. Велике місто (мегаполіс), особливо з сильно розвиненою промисловою інфраструктурою, забруднює атмосферу, збільшує її каламутність і тим самим зменшує приток сонячної радіації. За рахунок каламутності може втрачатись до 20 % сонячної радіації. Зниження сонячної радіації додатково посилюється висотною забудовою і вузькими вулицями. Через ту саму завісу диму і пилу на території міста знижено ефективно випромінювання, а отже й нічне вихолодження. Одночасно, в місті до розсіяної радіації додається радіація, відбита стінами, бруківкою і асфальтом.

Дахи і стіни будинків, асфальтні дороги, доріжки та інші елементи інфраструктури міста, поглинаючи радіацію, нагріваються протягом дня сильніше, чим ґрунт і трава, і віддають тепло повітрю, особливо увечори. Тому температура повітря в містах у 70–80 % випадків перевищує

температуру у сільській місцевості, а середньорічні температури вище на 1 °С і більше.

Поле температури над містом характеризується однією або кількома замкненими ізотермами, які отримали назву міських островів тепла. Зі зростанням міста, тобто зі зростанням його забудови, температура у місті зростає. Найкраще усього контрасти температури між містом і його околицями (сільською місцевістю) виявляються у спокійну антициклональну погоду. Вони зникають за сильного вітру або суцільній хмарності.

Особливо сильно місто підвищує мінімальні температури. Різниця мінімальних температур на міських територіях і передмісті може сягати кількох градусів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Проте підрахунок та аналіз «островів тепла», регуляції цього феномена на державному рівні, залишаються невирішеними. Зокрема, концентрація тепла є небезпечною для здоров'я мешканців та має значний вплив на енергоспоживання. Через збільшений викид парникових газів, проблема «островів тепла» є особливо серйозною на фоні зміну клімату.

Просторова неоднорідність температури повітря в межах території міста пов'язана з неоднорідністю чинників, що визначають характер та інтенсивність трансформації приземного шару повітря: теплофізичні властивості поверхонь та їхніх термодинамічних процесів.

Випаровування, а отже, і вологість у місті, менша чим у сільській місцевості, унаслідок покриття вулиць і стоку води в каналізацію.

Оскільки територія міста нагріта більше, чим оточуюча місцевість, і володіє більшою шорсткістю, над містом зростає конвекція і утворюється більше хмар, що в свою чергу, зменшує кількість годин сонячного сяйва і кількість ясних днів. Спостерігається і збільшення опадів над містом.

Система міських вулиць і площ призводить до змін напрямку вітру в місті. Вітер переважно спрямовується вздовж вулиць. Загалом швидкість вітру в місті зменшується, проте на вузьких вулицях зростає; що спричиняє на вулицях і перехрестях виникненню пилових вихорів і поземки.

У тиху антициклонічну погоду на перегрітій території міста спостерігається так званий *міський бриз*. Слабкі вітри днем спрямовуються від навколишньої місцевості до центру міста при зростанні висхідного руху повітря над містом. Якщо загальне перенесення повітря доволі сильне, бриз непомітний.

При стійкій стратифікації атмосфери, особливо при інверсіях температури, дим може накопичуватись у приземному шарі атмосфери у такій кількості, що здійснює небезпечний фізіологічний вплив.

Відомо задимлення повітря крупних портових і промислових міст. Ядовиті дими і гази, які є відходами виробництва, можуть накопичуватись у нижніх шарах, особливо якщо цьому сприяє рельєф місцевості, і викликати масові отруєння. Проте, найбільший вклад у забруднення повітря міст вносить автомобільний транспорт [1].

У цілому причинами виникнення міських островів тепла (далі у роботі позначається як МТО) є [2]:

а) надходження у повітря домішок від виробничих об'єктів та транспорту;

б) забудова території міст і збільшення частки поглиненої сонячної радіації порівняно з природним ландшафтом;

в) скорочення площ з відкритим ґрунтом та зеленими насадженнями, що знижує витрату тепла на випаровування та призводить до зростання теплового балансу;

г) витрата великої кількості енергоресурсів і нагрівання навколишнього повітря та ґрунту;

д) формування зон застою повітря через погане турбулентне перемішування атмосфери та недостатній винос надлишкового тепла.

Різниця температур між урбанізованими та сільськими районами може досягати 5–7 °С, іноді до 11–17 °С [3]. Негативний наслідок таких різниць — перегрівання мешканців, або тепловий стрес. Таким чином, МТО значно погіршує сталий розвиток та привабливість мегаполісів через

негативний вплив на комфорт та здоров'я мешканців, споживання енергії та якість повітря.

Контроль за температурою земної поверхні (ТЗП) є дуже важливим при дослідженні МТО. Температура земної поверхні безпосередньо пов'язана з поверхневим випромінюванням та перетворенням енергії, характером клімату та діяльністю людини. Традиційно температури в містах вимірювали як температури повітря поблизу поверхні за допомогою метеорологічних станцій. Далі кількісні характеристики МТО підраховувались як максимальна різниця між міськими та фоновими сільськими температурами [4]. Нові дослідження виконуються за допомогою методів дистанційного зондування Землі.

Об'єкт дослідження — поверхня міського середовища м. Києва. Київ є одним з провідних промислових, технологічних та інноваційних центрів України. Саме тому темп урбанізації тут досить високий, незважаючи на загальний від'ємний приріст населення в Україні, а також у багатьох районах Київської обл. Станом на 01.08.2010, у місті проживали 2,7 млн осіб, а на 01.08.2016 — 2,9 млн [5].

Мета роботи: вивчення «островів тепла» за супутниковими даними та аналіз довгострокової динаміки просторових закономірностей островів тепла. Під час дослідження планується охарактеризувати закономірності цього феномену в часі та просторі за допомогою супутникових знімків Landsat на прикладі м. Києва.

Завдання дослідження — огляд літератури з даного питання, одержання супутникових знімків Landsat за 30-річний період, створення алгоритму попередньої обробки супутникових знімків та отримання растрів температури земної поверхні, вегетаційного індексу та інтенсивності міських островів тепла, реалізація алгоритму за допомогою мови програмування Python та геоінформаційної системи ArcGIS та візуалізація даних, виявлення взаємозалежностей та закономірностей у результатах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перше застосування методів дистанційного зондування Землі для оцінки МТО було описане Р. К. Rao у 1972 р. [6]. Із того часу використовуються різні супутникові дані для спостереження за температурами у різних масштабах. Дистанційне зондування актуальне для аналізу об'єктів регіонального масштабу завдяки безперервності спостережень та можливості застосування на великих територіях. Після Р. К. Rao супутникові зображення почали широко використовуватись для вивчення МТО та ТЗП. Були розроблені різноманітні алгоритми для оцінки ТЗП, наприклад,

mono-window алгоритм, одноканальний метод, алгоритм *split-window* [7]. Подальші дослідження довели, що міські температури пов'язані з особливостями поверхні, що характеризуються, наприклад, індексом NDVI. В одному з ранніх досліджень [8] він був використаний для оцінки взаємозв'язку між ТЗП та рослинністю. Пізніше джерело МТО почали пов'язувати не тільки з термодинамічними властивостями поверхонь, а й з їхніми формами та геометрією [9].

Дослідження МТО проводили по всьому світу [10–14]. В Україні це питання розглядали науковці Б. В. Шилін, Є. А. Балдін, М. Ю. Грищенко, В. І. Лялько, А. Б. Крилов, Б. С. Бусигін, І. М. Гаркуша. Досліджують вплив урбанізації на мікроклімат міст в рамках Російсько-Українського міжнародного проекту у праці [15]. Автори розглядали матеріали теплових супутникових зйомок м. Києва з низькою та середньою розрізненістю (EOS/MODIS та Landsat-8/TIRS відповідно). Острова тепла в Києві також були проаналізовані за допомогою дистанційного зондування Землі у працях [16–18].

Виклад основного матеріалу

1. Отримання та попередня обробка знімків Landsat

Теплове інфрачервоне дистанційне зондування Землі широко використовується для виявлення змін температури земної поверхні завдяки

широкому охопленню, повторному циклу орбіти та низькій вартості. Проте на таких зображеннях зазвичай присутні хмари, аерозолі, систематичні помилки та пропущені значення. Щоб уникнути похибки у даних, у дослідженні був обраний набір супутникових зображень з близьким до нульового рівня хмарності у літні місяці. Останні також характеризується підвищенням температури повітря до критичних для здоров'я його жителів відміток. У табл. 1 наведені обрані дати та серії супутників Landsat, що завантажені з веб-платформи USGS Earth Explorer для м. Києва згідно з Всесвітньою системою відліку (WRS2 path 181, row 025) в універсальній поперечній проекції Меркатора (UTM).

Сенсор Thematic Mapper (TM) на борту супутника Landsat 5 отримує зображення в семи спектральних діапазонах, шість із яких охоплюють видимі та інфрачервоні короткохвильові частини електромагнітного спектра (0,5–2,5 мкм), а один тепловий інфрачервоний діапазон (10,4–12,5 мкм). Landsat 8 оснащений сенсорами Operational Land Imager (OLI) та Thermal Infrared (TIRS). TIRS має вже два канали в тепловому діапазоні: 10 канал 10.60–11.19 мкм та 11 канал у межах 11.50–12.51 мкм [19].

Отримані продукти Landsat Collection Level-1 з платформи Earth Explorer USGS вже геометрично та радіометрично калібровані.

Таблиця 1

Супутникові знімки та їхні метадані

Супутник	Сенсор	Розрізненість, м	Хмарність, %	Дата одержання	Час одержання
Landsat 8	OLI та TIRS	30 (120 TIRS)	0.00	2016-07-13	08:49:07.7908680Z
Landsat 5	TM	30 (100 TIRS)	0.00 0.00 2.00	2005-07-31 1995-08-21 1985-08-25	08:37:07.4630940Z 07:52:19.6820250Z 08:18:44.0140000Z

Зображення далі оброблюють для отримання значень енергетичної яскравості верхньої частини атмосфери згідно з формулою (1) для Landsat 5 та формулою (2) для Landsat 8. Значення коефіцієнта відбиття для Landsat 5 отримують за формулою (3); для Landsat 8 за формулою (4) [13; 20]:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{\text{cal}\max}} \right) Q_{\text{cal}} + L_{\min\lambda}, \quad (1)$$

$$L_{\lambda} = M_{\lambda} Q_{\text{cal}} + A_{\lambda}, \quad (2)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d_s^2}{E_{0\lambda} \cos\theta}, \quad (3)$$

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} Q_{\text{cal}} + A_{\rho}, \quad (4)$$

де Q_{cal} — відкаліброване значення пікселя; $L_{\min\lambda}$ — енергетична яскравість, що відповідає $Q_{\text{cal}\min}$; $L_{\max\lambda}$ — енергетична яскравість, що відповідає $Q_{\text{cal}\max}$; d_s — відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях; $E_{0\lambda}$ — екзо-атмосферне сонячне випромінювання в каналі λ (у Вт/(м²·мм)); θ — зенітний кут Сонця; M_{λ} , M_{ρ} , A_{λ} , A_{ρ} — канальні фактори мультиплікативного та адитивного перемасштабування з метаданих відповідно.

Перетворення спектральної енергетичної яскравості у температуру яскравості на супутнику відбувається за формулою (5).

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}, \quad (5)$$

де T_B є ефективною температурою на супутнику (К); L_λ — спектральна енергетична яскравість ($Вт/(м^2 \cdot ср \cdot мкм)$); K_2 та K_1 — калібрувальні константи [24].

Проте значення температури яскравості не є ТЗП, а швидше за все змішаним сигналом, що включає енергію випромінювання Землі, висхідну та низхідну енергетичну яскравість. Випромінювальна здатність земної поверхні (ВЗ) є одним з основних параметрів для одержання ТЗП. У даному дослідженні буде використовуватись метод оцінки ВЗ, представлений D. A/ Artis та W. H. Carnahan [18]. Загальна формула обчислення ТЗП (6):

$$T = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \frac{T_B}{\rho} \right) \ln \epsilon}, \quad (6)$$

де λ — довжина хвилі енергетичної яскравості; $\rho = h \cdot c / \sigma$ ($1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К); σ — константа Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); h — константа Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); c — швидкість світла у вакуумі ($2,998 \cdot 10^8$ м/с).

Для каналів Landsat 5 $\lambda = 11,5$ мкм; для Landsat 8 десятого каналу $\lambda = 10,8$ мкм, одинадцятого каналу $\lambda = 12$ мкм.

Для оцінки значення ВЗ в роботі був використаний метод граничних значень стандартизованого індексу відмінностей рослинного покриву (NDVI) [21]. NDVI отримується згідно з формулою (7):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (7)$$

де NIR — канал близького інфрачервоного випромінювання; Red — червоного випромінювання.

Випромінювальна здатність ВЗ земної поверхні може оцінюватись за методом, представленим у праці [22]. Перекласифікація значень NDVI у ВЗ наведена у табл. 2.

Таблиця 2

Оцінка випромінювальної здатності за NDVI

NDVI < 0,185	0,995
-0,185 ≤ NDVI < 0,157	0,970
0,157 ≤ NDVI ≤ 0,727	1,0094 + 0,047ln(NDVI)
NDVI > 0,727	0,990

2. Розрахунок інтенсивності міських «островів тепла»

Науковцями використовуються різні методи розмежування «островів тепла» та визначення їх інтенсивності [11]. Багато досліджень спираються на метод рівного інтервалу та метод середнього стандартного відхилення для того, щоб класифікувати ТЗП згідно зі значеннями інших параметрів, таких як NDVI, вологість повітря [7].

Хоча з одного боку дані методи раціонально використовувати, з іншого — вони істотно обмежені. Жоден з них не передає фізичного змісту або показує дійсну різницю температур між міськими та приміськими районами.

Проблема визначення межі між міською та приміською зонами є досить складною через прискорену урбанізацію. Базуючись на аналізі зображень території Києва за 30 років, для подальшого аналізу було вирішено обрати п'ять приміських зон, що існували з 1985 р. (рис. 1).

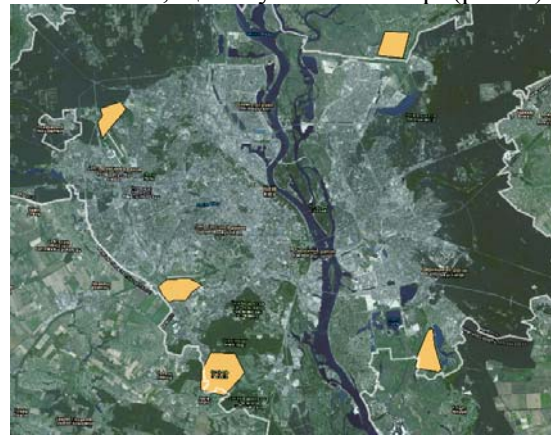


Рис. 1. Картохема обраних приміських зон м. Києва

Тому протягом обраного часового періоду людський фактор мав приблизно однаковий вплив на ТЗП даних зон. Інтенсивність МТО можливо розрахувати так:

$$T_{UHI} = T - T_{SUB}, \quad (8)$$

де T_{UHI} — це інтенсивність «островів тепла» у кожному пікселі; T — ТЗП кожного пікселя; T_{SUB} — відповідна середня температура приміських еталонних зон.

Отримані результати

Випромінювальна здатність (ϵ) пов'язана з рослинним покривом та біомасою. Результати визначення ВЗ земної поверхні на вибраній ділянці показали, що райони з середнім покриттям рослинністю зазвичай мають $\epsilon > 0,92$. У районах з гущим рослинним покривом, як правило, $\epsilon > 0,95$. Пустирі, забудовані зони характеризуються ϵ в діапазоні 0,90–0,91. Випромінювальна здатність водойм, річок та озер коливається в межах 0,91–0,92, що залежить від рослинного покриву. На рис. 2 відображені різниці значень ТЗП у 2016 та 1985 рр., що були отримані відйманням значень двох растрів.

Результати аналізу, що показані на рис. 2 свідчать, що за 30 років температури збільшилися. Це можна пояснити зростаючою урбанізацією. Особливо великі розбіжності температур за цей період спостерігаються на масивах Позняки та півночі Троєщини, що були лише приміськими зонами у 1985 р.

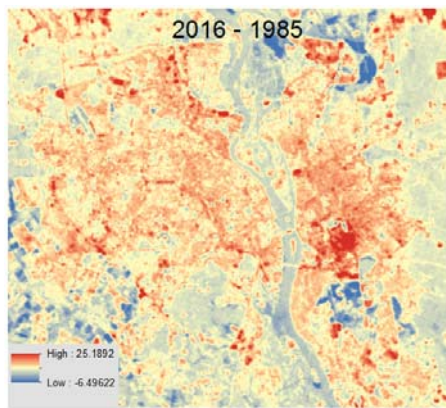


Рис. 2. Різниця ТЗП у 2016 та 1985 рр.

По-друге, на дані впливає загальні зміни клімату та підвищення температури. Проте останній фактор не є невирішальним, оскільки зміна температури в багато разів перевищує зміну фонових температур у досліджуваній області.

Результати просторово-часового розподілу ТЗП на рис. 3 свідчать, що більш високі температури характерні для спальних та індустріальних районів міста, а саме Оболоні, Солом'янського, Дніпровського та півночі Дарницького районів.

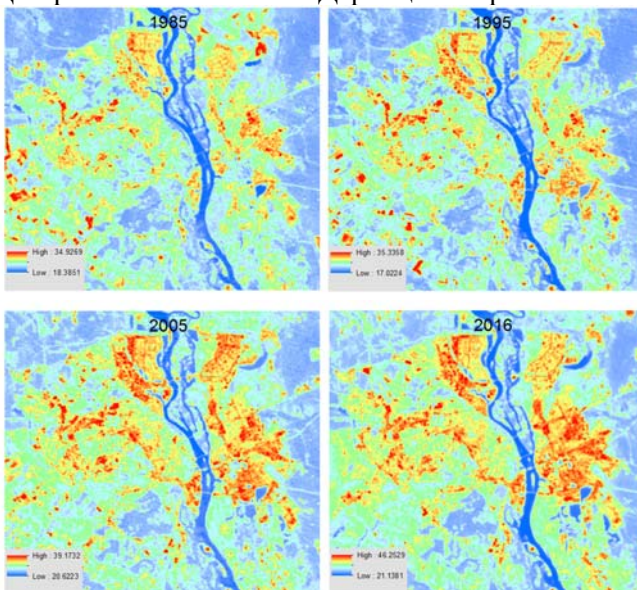


Рис. 3. Динаміка ТЗП у період 1985–2016 рр.

Тут температури влітку досягали в середньому $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ у 1980–1990х рр., а в 2016 р. — навіть $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ще вищі температури характерні для району Нивки—Шулявка, де знаходяться декілька заводів. Найвищі значення ТЗП пов'язані не тільки з міськими центрами, житловими комплексами з високою щільністю населення та промисловими районами, а також з посівами та пустирями. За рахунок обрізання знімків дещо зменшились їхні території на зображеннях в аналізі. Правильні форми посівів можна побачити на пн-сх на пд-зх м. Києва, а пустирі без рослинності на пд-сх міста по правому берегу р. Дніпро.

Інтенсивність МТО визначається взаємодією кількох факторів, а саме ступенем урбанізації (загальною площею забудови, чисельністю населення, промисловістю та транспортом), геометрією території міста, фізичним середовищем та характером антропогенної діяльності людини. В дослідженні було підтверджено, що феномен «островів тепла» пов'язаний з підстильною поверхнею, типом землекористування та рослинного покриву. Растри інтенсивності МТО зображені на рис. 4.

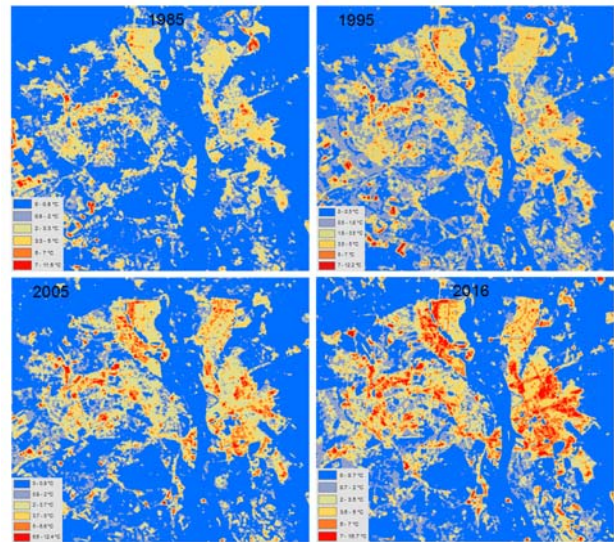


Рис. 4. Динаміка інтенсивності МТО за період 1985–2016 рр.

Загалом, різниця температур порівняно з вибраними приміськими зонами становить $2\text{--}3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вона досить чітко відстежує межу м. Києва, лісових масивів та водойм. За даним просторово-часовим аналізом можна зробити висновок, що інтенсивність «островів тепла» підвищувалась кожного десятиріччя: з максимуму різниць $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у 1985 р. до $12,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ у 1995, далі до $12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ у 2005 р., досягнувши максимуму в 2016 р. — $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поділ на групи температур запропоновано на основі методу *natural breaks*, що базується на розподілі даних. За 30 років істотно збільшився рівень урбанізації (рис. 5).

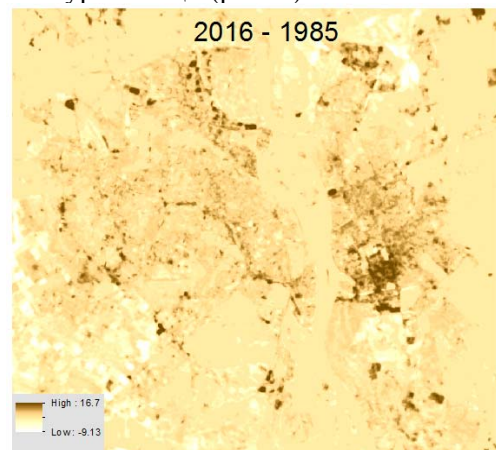


Рис. 5. Різниця інтенсивності МТО у 1985 та 2016 рр.

Утворились нові острова тепла, що умовно відображені на рис. 6. Одними з них є прибережний Дарницький район, Голосіївський район між м. Васильківська та м. Теремки.

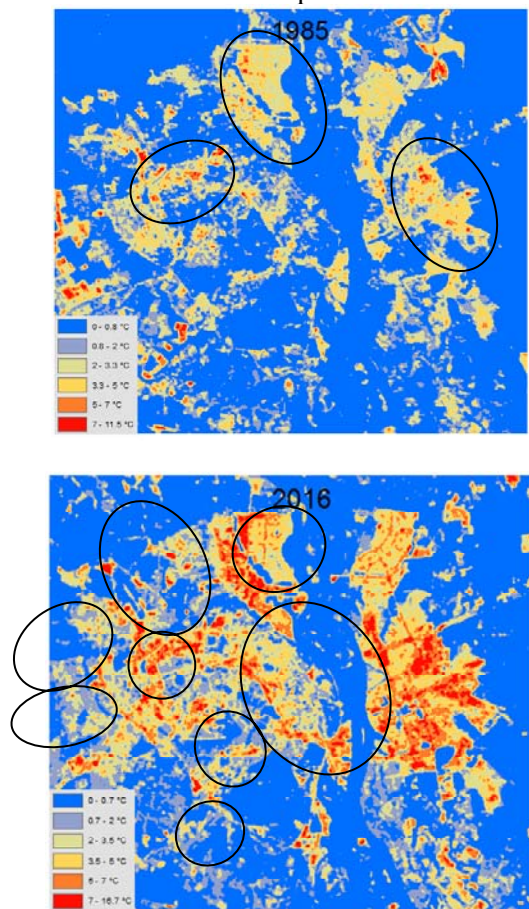


Рис. 6. «Острови тепла» Києва у 1985 та 2016 р.

Погодні фактори впливають на візуалізацію МТО за супутниковими знімками. Особливо великий вплив здійснюють хмари.

Одержані зображення інтенсивності «островів тепла» (а також й ТЗП) характеризують не тільки картину урбанізації, а й метеорологічні умови.

У працях [10; 11] було досліджено вплив на МТО різних погодних умов та виявлено, що швидкість вітру, опади, хмарність є головними факторами впливу. Тому деякі «острова тепла» можуть бути не очевидними або зі значеннями, що відхиляються від дійсних значень вимірювань наземними приладами. Точність аналізу супутникових знімків можна у подальшому перевірити за допомогою наземних метеорологічних спостережень.

Висновки

Розглянуто явище міських «островів тепла» за матеріалами дистанційного зондування Землі. Аналіз знімків у тепловому інфрачервоному спектрі є актуальним для вивчення навколишнього середовища в містах, особливо в районах з

малою кількістю наземних метеостанцій. Матеріали дистанційного зондування різко зменшують вартість досліджень та одночасно дозволяють збільшити територію дослідження.

Урбанізація суттєво вплинула на підвищення середніх температур в м. Києві за останні 30 р. Високі значення температур поверхні характерні для забудованих районів, заводів, а також пустирів та посівів. Територія міста із щільною рослинністю та високим NDVI мають нижчі температури, ніж райони з строкатим рослинним покривом; забудовані та густонаселені райони мають дуже високі температури та формують «острови тепла». Показано, що інтенсивність міських островів історично була високою в Оболонському, Шевченківському, Дніпровському та на заході Святошинського району, де існує висока щільність забудови. Найменше «островів тепла» у районах з водними об'єктами, лісами, парками та дачними ділянками.

Дані супутників Landsat забезпечують достатньо високий рівень деталізації просторових об'єктів для моніторингу та аналізу в рамках даного дослідження. Проте найбільшим недоліком було виявлено обмеження в періодичності отримання знімків для довгострокового аналізу трендів. Проте додавання до аналізу теплових інфрачервоних каналів супутників з меншим часом орбіти (наприклад, MODIS) може збільшити кількість безхмарних знімків та заповнити часові проміжки у подальших дослідженнях, таким чином поліпшуючи оцінку міських «островів тепла».

ЛІТЕРАТУРА

1. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорологія и климатология. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. — 582 с.
2. Город, архитектура, человек и климат / М. С. Мягков, Ю. Д. Губернский, Л. И. Конова, В. К. Лицкевич / под ред. к. т. н. М. С. Мягкова. — М.: «Архитектура-С», 2007.
3. Liu L., Zhang Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong // Remote Sensing. — 2011. — Vol. 3(7). — P. 1535-1552.
4. Shen, H., Huang, L., Zhang, L., Penghai, W., and Zeng, C. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China // Remote Sensing of Environment. — 2016. — Vol. 172. — P. 109-125.
5. Головне управління статистики м. Києва — Чисельність населення (щомісячна інформація) [Електронний ресурс] / Головне управління статистики у м. Києві. — Режим доступу: <http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=1123&lang=1>

6. Rao P. K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite // Bulletin of the American Meteorological Society. — 1972. — Vol. 53. — P. 647–648.
7. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // Urban Sci. — 2017. — Vol. 1(10).
8. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat // Remote Sensing of Environment. — 1997. — Vol. 18. — P. 287–304.
9. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climate // Remote sensing of Environment. — 2003. — Vol. 86(3). — P. 370–384.
10. Arnfield A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // International Journal of Climatology. — 2003. — Vol. 23(1). — P. 1–26.
11. Du L., Zhou T., Li M. S., Gong D. Y. Urban heat island effects derived from dense Landsat thermal observations in Nanjing, China // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2011. — Vol. 17.
12. Filipovich V., Mychak A., Krylova A. Use of satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape // 14th GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Conference Proceedings. — 2014. — Vol. III. — P. 1061–1068.
13. Landsat 8 (L8) data users handbook [Електронний ресурс] / U.S. Geological Survey. — 2016. — Version 2.0. — Режим доступу: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
14. Rao P. K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite // Bulletin of the American Meteorological Society. — 1972. — Vol. 53. — P. 647–648.
15. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки / С. А. Станкевич, В. Е. Филиппович, Н. С. Лубский, А. Б. Крылова, С. Г. Крицук, О. В. Бровкина, В. И. Горный, А. А. Тронин // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2015. — № 7. — С. 12–21.
16. 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.
17. Крылова А. Б. Мониторинг формирования и развития «теплового острова» города Киев // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2014. — № 2. — С. 35–37.
18. Artis D. A., Carnahan W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas // Remote Sensing of Environment. — 1982. — Vol. 12. — P. 313–329.
19. What are the band designations for the Landsat satellites? [Електронний ресурс] / USGS Landsat Missions. — Режим доступу: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>
20. Landsat 7 Science Data Users Handbook [Електронний ресурс] / National Aeronautics and Space Administration. — 2016. — Режим доступу: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf
21. Sobrino José A., Jiménez-Muñoz Juan C., Sòria Guillem, Romaguera Mireia, Guanter Luis. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2008. — Vol. 46(2). — P. 316–327.
22. Liu L., Zhang Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong // Remote Sensing. — 2011. — Vol. 3(7). — P. 1535–1552.

Зацерковний В. І., Оберемок Н. В., Березіна П. О.

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ «ОСТРОВІВ ТЕПЛА» МЕГАПОЛІСА ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗНІМКАМИ LANDSAT

Розкрито феномен міських «островів тепла», причини їх появи і метод дослідження за матеріалами дистанційного зондування (МДЗ). Міські «острови тепла» визначаються підвищеною температурною аномалією між забудованою територією міста та її околицями (передмістям). Проаналізовані супутникові знімки Landsat 5 ETM+ та Landsat 8 за період з 1985 до 2016 р. для м. Києва та прилеглих приміських територій. МДЗ попередньо оброблені та дешифровані для отримання растрів температури земної поверхні, індексу NDVI. За допомогою порівняння з середніми температурами приміських зон, виділена інтенсивність міських «островів тепла». Оцінивши динаміку розвитку даних температурних аномалій у часі та просторі, були розглянуті причини їхнього виникнення, такі як забудова території, зменшення площ зелених насаджень, збільшення викидів транспорту та виробничих об'єктів тощо.

Ключові слова: міський «острів тепла»; Landsat; температура земної поверхні; просторово-часовий аналіз.

Zatserkovnyi V., Oberemok N., Berezina P.

SPATIAL-TEMPORAL ANALYSIS OF THE "ISLANDS OF HEAT" OF THE METROPOLIS FOR SATELLITE IMAGES LANDSAT

In this article, a phenomenon and causes of urban heat islands are examined using remote sensing satellite data. An urban heat island is a positive temperature anomaly between a built-up area and surrounding suburban neighborhoods. Landsat 5 ETM + and Landsat 8 satellite imagery of the city of Kiev was acquired for a period of 30 years from 1985 to 2016. These materials were subjected to imagery restoration and processing to obtain earth surface temperature rasters and the normalized difference vegetation index. After comparing with mean temperatures of selected suburban areas, the urban heat island intensity was determined. Noting the change of these temperature anomalies in space and time, possible reasons for urban heat island occurrence were discussed, such as increased building rates, the lack of green space, emissions from transport and production facilities into the atmosphere.

Keywords: urban heat island; Landsat; earth surface temperature; spatiotemporal analysis.

Зацерковный В. И., Оберемок Н. В., Березина П. О.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ «ОСТРОВОВ ТЕПЛА» МЕГАПОЛИСА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ LANDSAT

Раскрыт феномен городских «островов тепла», причины их появления и метод исследования по материалам дистанционного зондирования. Городские «острова тепла» являются положительной температурной аномалией между застроенной территорией и ее окрестностями. Получены спутниковые снимки Landsat 5 ETM + и Landsat 8 за период в 30 лет с 1985 до 2016 гг. для г. Киев. Данные материалы предварительно обработаны и дешифрованы с получением растров температуры земной поверхности, индекса NDVI. После сравнения со средними температурами пригородных зон определена интенсивность городских «островов тепла». Отмечая динамику развития данных температурных аномалий во времени и пространстве, были рассмотрены причины их возникновения такие, как застройка территории, уменьшение площади зеленых насаждений, выбросы транспорта и производственных объектов в атмосферу.

Ключевые слова: городской «остров тепла»; Landsat; температура земной поверхности; пространственно-временной анализ.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2018 р.

Прийнято до друку 15.02.2018 р.

Рецензент — д-р геол. наук, проф. Карпенко О. М