



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.198>

УДК 504.064.3:(528.831.5:629.783)

## Дослідження просторово-часових змін поверхневих температур міста Запоріжжя (Україна) за даними дистанційного зондування Землі

Л. П. Ліщенко\*, О. І. Кудряшов

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Місто Запоріжжя – один з найпотужніших промислових осередків України, розташоване в центральній степовій частині країни на обох берегах Дніпра. У місті багато щільно розташованих великих підприємств – металургійних, машинобудівних, хімічних та будівельних – утворюють над ним потужний термальний острів (УНІ), фізичні характеристики якого (розміри, форма, розподіл температур) змінюються в часі і просторі.

Аналіз космічних знімків штучного супутника Землі Landsat, отриманих у теплових каналах, дав змогу встановити значні зміни цих характеристик, що відбулися протягом 33 років, тобто майже за весь період функціонування орбітальних апаратів цієї серії.

Середнє підвищення поверхневих температур (LST) загалом для всього термального острова міста, обчислених за цей період становило для липня 0.149 °C щорічно. Побудовано температурні графіки LST за даними липня і серпня для трьох профілів, що перетинають більшість ландшафтно-функціональних зон міста. Встановлено, що одна із складових ландшафтно-функціональних зон – земна поверхня, різко поділяється на ділянки, які знижують або підвищують температуру відносно її середніх значень для усього міста. Із часом спостерігається зменшення контрасту між цими різновидами у зв'язку з більшим нагрівом всієї поверхні міста та встановлюється стабільний ефект УНІ з перевищенням у промислових районах до 14 °C. Для більшої частини міста річний приріст LST знаходиться в інтервалі від 0.15 до 0.3 °C. Максимальне підвищення температури до 0.6 °C за рік спостерігається в новому, щільно забудованому житловому масиві "Південний", та на територіях з виробничими зонами промислових об'єктів у Заводському районі Запоріжжя. Понижувальний тепловий вплив мають ландшафти лише водних поверхонь і площ окремих сільськогосподарських орних земель, а в межах міста природний покрив під луками, пустинями і навіть деревною рослинністю прогривається до середніх значень по місту. Порівняння середніх для всього міста липневих і серпневих LST показало, що показник липня на 8 °C вищий, а коливання температур у серпні стає на 2–3 °C менш амплітудним у межах простору теплового острова.

**Ключові слова:** температура поверхні землі, тепловий острів, ландшафтно-функціональні зони, теплове профілювання, серія даних Landsat, Sentinel-2

© Л. П. Ліщенко., О. І. Кудряшов. 2021

### 1. Актуальність

Місто Запоріжжя за рівнем промислового потенціалу входить у п'ятірку найбільших індустріальних осередків України і є шостим за чисельністю населення в країні. Поряд з підприємствами чорної металургії, такими як Запоріжсталь, Дніпроспецсталь, у місті функціонують підприємства кольорової металургії, машинобудівні, хімічні заводи, а також потужні підприємства будівельної та харчової промисловості, які, загалом, займають до 30 % його площі. Переважають енергоємні підприємства, які, в основному, й формують тепловий острів (УНІ – *urban heat island*) над містом. Промислові підприємства є потужним джерелом тепла, що надходить у міську атмосферу, посилюючи ризик виникнення теплового стресу, а також сприяє забрудненню повітря.

Серед негативних наслідків теплового стресу можна виділити такі: погіршення загального

самопочуття жителів міста, особливо вразливих категорій населення (дітей, людей похилого віку, людей, які страждають на серцево-судинні захворювання та органів дихання); погіршення умов праці людини; погіршення стану зелених насаджень; погіршення стану дорожнього покриття та інших поверхонь, що піддаються перегріванню; негативний вплив підвищених температур на стан та функціонування автотранспорту, обладнання, механізмів, техніки. За метеорологічними даними, середня річна температура повітря у м. Запоріжжя за період 1990–2018 рр. виявилась вищою на 0.5 °C порівняно з попереднім періодом 1961–1989 рр. (+9.4 °C) і становила +9.9 °C, а також значно збільшились літні температурні максимуми і кількість днів з температурою вищою за 30 °C (План дій з адаптації до наслідків зміни клімату міста Запоріжжя, 2020).

Ефективним методом дослідження цього явища є аналіз космічних знімків у тепловому діапазоні електромагнітного спектра, отриманих трьома поколіннями штучних супутників Землі (ШСЗ)

\* E-mail: [Lischenko.lp@gmail.com](mailto:Lischenko.lp@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-6766-6884>

Landsat протягом понад тридцяти років їхнього функціонування на орбіті Землі.

## 2. Мета досліджень

Житлова забудова в місті, а отже і якість життя містян, залежать від підприємств, що знаходяться поряд. Різні ландшафтно-функціональні зони та властивості земного покриву впливають на теплові параметри поверхні і формування УНІ над містом. Метою роботи було простежити, як саме теплове навантаження просторово розподіляється по території міста та як трансформується з плином часу для певних ландшафтно-функціональних зон. Додатковим фактором, що обумовлює вразливість Запоріжжя до теплового навантаження і збільшення теплового острова, є постійне збільшення по місту площ штучних поверхонь (асфальтове покриття, бетон, тротуарна плитка тощо), які швидко нагріваються та довго зберігають тепло порівняно з природними.

## 3. Методика досліджень

Способи дослідження міських теплових островів мають велику кількість підходів і ґрунтовних описів в роботах вчених всього світу, що стосуються основних міст Європи, США, Канади Індії і Китаю, а також в роботах по Австралії, Кенії тощо. Вивчається тепловий стан як міст, так і цілих провінцій, переважно це кількісний статистичний та порівняльний аналіз, а також можливість встановлення зв'язків між різними індексами, отриманими за супутниковими даними (Alavipanah et al, 2015; Hidalgo et al, 2021; Maimaitiyiming et al, 2014; Subhanil. et al, 2018) та ін. Всі дослідники сходяться на тому, що з часом УНІ збільшується і причиною є не стільки географічне положення міста (за даними (Wienert et al, 2005) воно становить не більше 20 % загальної частки теплової аномалії), а збільшення енергетичного потенціалу міст за рахунок індустріалізації та глобалізації і тенденції до загального потепління клімату за останні два десятиріччя. Способи обчислення актуальної температури для дослідження теплового поля поверхні розглянуто в низці публікацій (Kottmeier et al., 1999; Voogt, 2014; Li et al., 2012).

Наша робота має прикладний характер, в ній конкретно досліджується вплив функціональної структури міста на розподіл поверхневих температур у межах міського острова тепла та прив'язки їх до конкретних земних покривів. Тому ми обмежуємося використанням методів кількісно-описового аналізу просторово-часових супутникових даних серії Landsat на основі:

- мультиспектральної класифікації поверхневого покриву для картування ландшафтно-функціональних зон міста (ЛФЗ), тобто структури землекористування (*land use/land cover* – LULC);
- розрахунків LST за методикою, що враховує показник нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI);

- візуалізації даних розподілу поверхневих температур на всю територію міста та за допомогою профілів-трансект для окремих ЛФЗ;

- статистичного аналізу з обчисленням середніх температур та відхилень за весь період досліджень;

- визначення ЛФЗ, що мають охолоджувальний (понижувальний) чи зігрівальний (підвищувальний) ефект температурного режиму приземного шару повітря;

- встановлення ділянок, які зазнали значних коливань LST, а отже, і змін їх екологічного стану, що відображають функціональні зміни структури міста.

Ми також використовували космічні знімки Sentinel-2 останніх років, які мають вищу просторову розрізненість, ніж зображення Landsat, і дають змогу більш репрезентативно зробити вибір досліджуваних ділянок і прив'язку об'єктів структури міста.

Оскільки зйомка системою Landsat проводилась майже в один і то же час доби (приблизно між 10.30–11.30 ранку), то для аналізу відбирались безхмарні знімки, що були в наявності. На дату і час супутникової зйомки шукались архівні метеодані з метою вибору оптимального варіанта та відбракувалися дні зі значними відхиленнями від середніх, за метеорологічними даними, тобто відхилення днів з екстремальними значеннями температури. За тепловими каналами КЗ серії Landsat розраховано температуру земної поверхні для липня з 1988 до 2018 року (аналізували дані за 16 років), а також для серпня, починаючи з 1985 і до 2018 року (дані за 21 рік).

У своїй роботі ми використовуємо піксельний розрахунок температури земної поверхні через спектральну щільність енергетичної яскравості наземної температури для всіх даних Landsat, отриманих із сенсорів MSS, TM, ETM+ та OLI, починаючи з 1985 року. Ці радіаційні значення модифікуються, обчислюються за оберненою формулою Планка із врахуванням індексу NDVI та застосовуються для теплових каналів з поправкою на сенсор. Отримані дані зводяться до просторового розрізнення 30 м. Методику розрахунків надано в роботі С. А. Станкевича та ін. (Станкевич та ін., 2015) та використано в наших попередніх дослідженнях міст Києва, Миколаєва (Ліщенко та ін., 2019; Ліщенко, 2020.)

Температурне поле аналізується для визначення відмінностей між різними ЛФЗ міста та для визначення змін температурного режиму, що відбуваються з часом. Чинники, що спричинили зміни розподілу та значень температури поверхні, можуть додатково свідчити про регіональне підвищення приземної температури в результаті глобального потепління і збільшення техногенного навантаження у промислових містах, зокрема, таких як Запоріжжя.

## 4. Результати роботи

Зміни ЛФЗ встановлені із класифікації земного покриву в межах м. Запоріжжя за часовим рядом даних КЗ серії Landsat. Кількісний аналіз виділених

класів за період 1984–2011 рр., на жаль, не показав реальних змін, що відбулися. Для класифікації використовувався метод SVM з поділом на 8 класів, однак, з огляду на наявність задимленості та димові шлейфи різних напрямків, отримані дані про зміни площі класів не відповідали реальним. Хоча для аналізу підбирались якісні знімки, з найменшими шумами і близькими за метеорологічним станом умовами, були використані літні безхмарні знімки з максимальною прозорістю атмосфери. Наприклад, отримані дані про площі, зайняті селитебною та промисловою зоною, виявились дуже варіабельними. На нашу думку, наприклад, видиме зменшення площі висотної забудови на класифікованому зображенні та зростання одноповерхової садибної забудови за 27 років пояснюється некоректним віднесенням частини площі зелених насаджень довкола середньовисотних прибудинкових територій у старих районах міста до садибних, завдяки приросту зеленої крони та озелененню.

Для більш детального оцінювання структури міста була проведена класифікація за Sentinel-2 (Level-2A) від 25.18.2018. Використовуючи усі 12 каналів сенсора, ми отримали перехрещення значень для деяких класів, тому що частина об'єктів класифікації (а ми намагалися виділити певні ЛФЗ) має складну структуру, елементи якої є і в інших класах. Наприклад, елементи багатоповерхової забудови включають схожі спектральні яскравості в

інших комплексних утвореннях. Так, до класу багатоповерхової забудови іноді включали і ділянки промислових об'єктів та всі різновиди шляхів сполучення. Проведення посткласифікації дало змогу уточнити належність до певних класів, що в цій роботі було використано для порівняння теплових характеристик поверхні та основних ЛФЗ, які не завжди відповідають традиційній класифікації земних покривів (*land cover*), що частіше називається землекористуванням (LULC). Для ідентифікації промислових зон та засвідчення класифікованого зображення використовувався Генеральний план міста Запоріжжя та аплікація до нього з усіма промисловими об'єктами та структурою землекористування (<https://zp.gov.ua/uk/page/generalnij-plan>). Порівняння цих даних з результатами, отриманими різними методами керованої класифікації супутникових зображень показали, що найбільшу достовірність отримано в результаті класифікації Sentinel-2A на 8 класів, коли було об'єднано клас середньої і висотної забудови, за алгоритмом SVM (Рис. 1).

Якщо розглядати усереднені значення температури для Запоріжжя за досліджуваній період в цілому, то вони, за нашими розрахунками, для липня мають такі значення: мінімальна – +25.87 °С, максимальна – +51.19 °С, середня – 35.83 °С, похибка становить 3.055 °С.

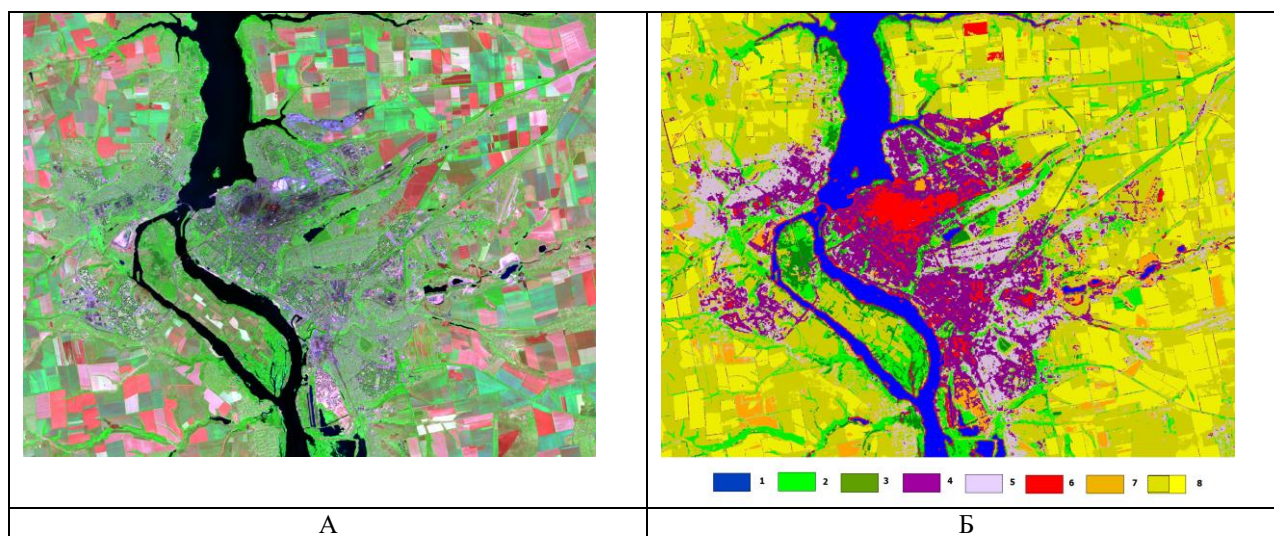


Рис. 1. КЗ Sentinel-2 (Level-2A) від 25.08. 2018:

А – композит каналів 12, 8, 3; Б – класифікація методом спектра вектора машин (SVM) на 8 класів ЛФЗ 1 – водна поверхня, 2 – трав'яниста рослинність, 3 – деревна рослинність, 4 – селитебні високо- і середньоповерхової забудови, 5 – селитебні низькоповерхової забудови, 6 – промислові, 7 – постіндустріальні території та відвали, 8 – агроландшафти

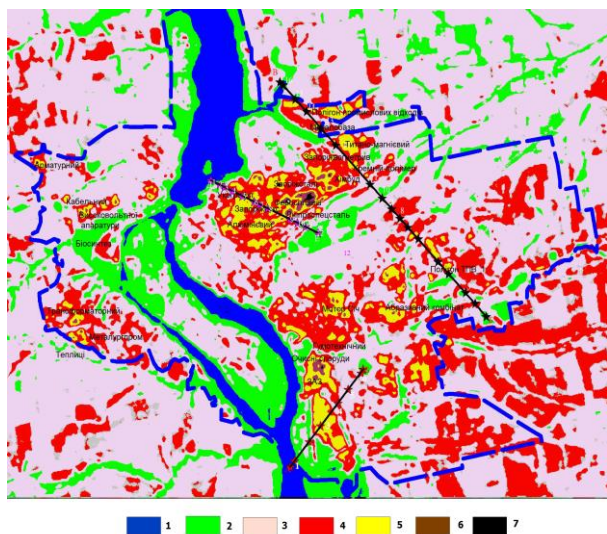
Отримані дані візуалізуються за допомогою функції ENVI Color mapping, коли значення LST автоматично розбиваються на рівні інтервали і надаються ENVI Color Table певними кольорами, наприклад, Blue – Green – Red – Yellow, але ми виконали керовану класифікацію, задаючи певні інтервали значень температури за функцією Density slice. На Рис. 2 дається класифікація температурного

поля – 7 класів, інтервали температур наведені в легенді.

Найвищі температури поверхні, що мають чорний і бордовий колір на рисунку притаманні промисловим зонам на півночі міста, де зосереджені території основних підприємств – Запоріжсталь, Дніпроспецсталь, Запоріжжкокс, Феросплавний, Алюмінієвий, ЗАЗ. Невеликі плями високих LST (43.5–49.5 °С) існують на правому березі Запоріжжя



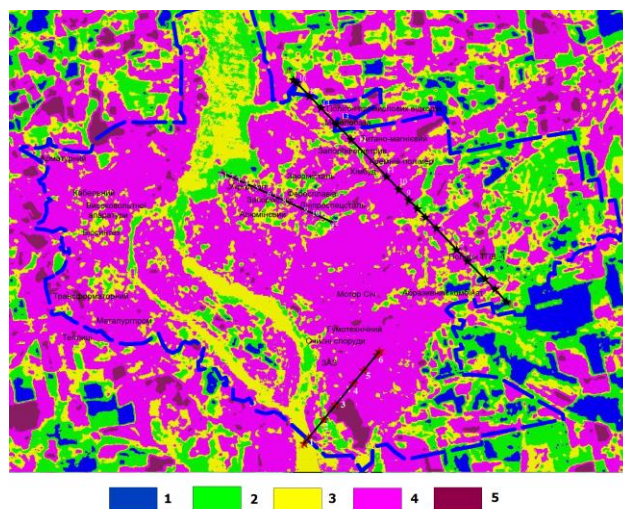
над Трансформаторним, Кабельним, Високовольтним заводами, теплицями, окремими металобазами.



**Рис. 2.** Багаторічні середні LST (за період з 1988 до 2018 рр.) за липень для м. Запоріжжя, надані за допомогою керованої класифікації (на 7 класів):  
 1 – <math>28.0^\circ\text{C}</math>; 2 –  $28\text{--}34.5^\circ\text{C}</math>; 3 –  $34.5\text{--}37.5^\circ\text{C}</math>;  
 4 –  $37.5\text{--}43.5^\circ\text{C}</math>; 5 –  $40.5\text{--}43.5^\circ\text{C}</math>; 6 –  $43.5\text{--}46.5^\circ\text{C}</math>;  
 7 –  $46.5\text{--}49.5^\circ\text{C}</math>$$$$$$

Майже вся промислова зона міста потрапляє в інтервал, де середні температури поверхні для липня за довготривалими рядами супутникових даних сягають  $40.5^\circ\text{C}$ , подібні високі LST існують над полігонами промислових відвалів та на масивах нової забудови, що мають високу щільність, наприклад, житловий масив “Південний”. Трохи вищі за середні температури мають поверхні селитебної зони та окремі ділянки, де порушений покрив ґрунту та відсутні природні ландшафти, що подані на карті червоним кольором. Найбільші площі в місті займають території із середніми відмітками від  $34.5$  до  $37.5^\circ\text{C}$  (сірий колір на Рис. 2), це переважно низькоповерхова житлова забудова садибного типу з озелененням вищим за 50 %, офісні і комерційні центри, допоміжні будівлі виробничих центрів, озеленені шляхопроводи тощо. Природні трав’янистий покрив і деревні насадження, передусім у межах долин річок та балок, показують температури поверхні нижче середніх (зелений колір), а найнижчі температури фіксуються в руслі Дніпра (синій колір). Саме долина Дніпра впливає на зниження температури центральної житлово-комерційної частини міста і зменшення показника середнього значення в цілому для міста.

Розрахунки коефіцієнта лінійного тренду (градус  $^\circ\text{C}/\text{рік}$ ), тобто попіксельного щорічного приросту LST на територію досліджень за 30-річний період, для липня і серпня 1988–2018 рр., показали, що для серпня температура поверхні трохи нижча за значеннями, але повністю збігається і просторово має майже така сама, як липнева. Як приклад, на рис. 3 показано довготривалий приріст для липня, що становив: мінімальний –  $-0.38^\circ\text{C}$ , максимальний –  $+0.66^\circ\text{C}$ , середній за весь період –  $+0.149^\circ\text{C}$  при середньоквадратичному відхиленні –  $0.089$ .



**Рис. 3.** Щорічний приріст LST липня (лінійний тренд розрахований за 30 років) для м. Запоріжжя, поданий за допомогою керованої класифікації на 5 класів:  
 1 –  $0.38\text{--}0.0^\circ\text{C}$ ; 2 –  $0.0\text{--}0.1^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0.1\text{--}0.15^\circ\text{C}$ ;  
 4 –  $0.15\text{--}0.3^\circ\text{C}$ ; 5 –  $0.32\text{--}0.64^\circ\text{C}$

Отже, в рожевий інтервал потрапила більша територія Запоріжжя, а це означає, що приріст кожного року становить переважно від  $0.15\text{--}0.3^\circ\text{C}$ . Лише в окремих місцях, таких як невеликі ділянки заплави та окремі поля, де температура залежить від посівів і стану зрошення, щорічний приріст знизився і має мінусові значення. Русло та долина Дніпра і більшість природних ЛФЗ мають приріст до  $0.15^\circ\text{C}$ , а це означає, що за 30 років їх середня температура поверхні зросла на  $3\text{--}4^\circ$ . Розрахований щорічний приріст температури аж до  $0.6^\circ\text{C}$  (це підвищення на  $9\text{--}18^\circ\text{C}$  за весь проаналізований період), спостерігається на новому житловому масиві “Південний” та на невеликих ділянках підприємств – Феросплавного, Запоріжсталі та Дніпроспецсталі. Сільськогосподарські ландшафти мають значні перепади у приростах температур, бо їх прогрівання цілком залежить від характеру посівів та зволоження на момент зйомки.

За допомогою методу профілювання проведено просторово-часовий аналіз теплового поля Запоріжжя по трьох трансектах, що трасуються через основні ландшафтно-функціональні зони міста, а саме – селитебну, промислову та антропогенно-модифіковану (в основному, це постіндустріальні, гірничі та багатофункціональні території), також профілі охоплюють водні поверхні і зелені зони різного призначення.

#### 4.1. Аналіз теплового поля селитебної зони міста

Профіль А–Б перетинає селитебну зону м. Запоріжжя, він простягається в північно-східному напрямку, починаючи з русла Дніпра (точка 1), а далі трасується через прибережну зелену смугу, Гребний канал (точка 2), житловий масив високоповерхової забудови “Південний” (точка 3), далі перетинає дорожні ландшафти – Автозаводська вулиця, Південне кільце (автомобільну трасу) та залізничне полотно (точка 4), ділянку приватної садибної



забудови (селища Миколаївське та Первомайське) (точка 5) та закінчується в урочищі балка Поповка на Первомайському кладовищі, що функціонально відноситься до зелених зон спеціального призначення (Рис. 4).

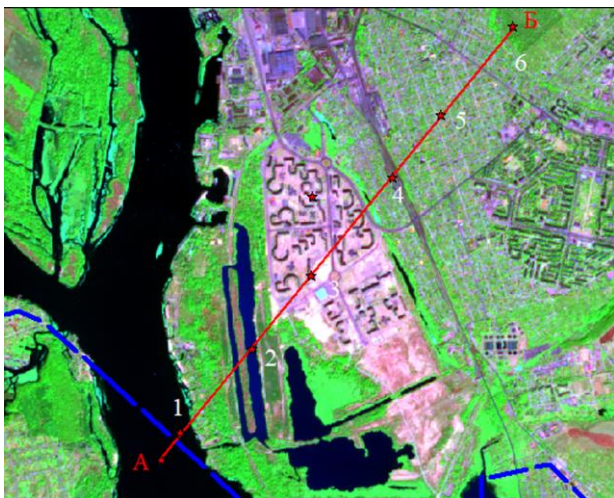


Рис. 4. Положення профілю А–Б через селитебну зону м. Запоріжжя

Криві LST профілю А–Б побудовані за даними липня і серпня 1985–2018 рр., мають значні розбіжності у значеннях поверхневої температури, що пов'язано з атмосферними умовами, існуючими на конкретний час (температура, вологість, випаровування), а, можливо, і з неточністю розрахунків даних з різних сенсорів. Але характер поведінки кривих значень LST, і це головне, має певну спадковість для кожної з ЛФЗ, якщо вона суттєво не змінювалася в часі. Найнижчі температури влітку спостерігаються в руслі Дніпра, трохи підвищуються в його протоках (Гребний канал). Територія житлового масиву “Південний, що нині має найвищі значення LST, відповідає багатоповерховій забудові, а до 90-х рр. цього масиву не існувало і на вологих луках температура була нижча, ніж на навколишніх антропогенно-обтяжених територіях. Це спостерігаємо на кривих LST липня 1988 та серпня 1985 рр. (Рис. 5), коли температура між точками 2–3–4 була на 8–12 °С градусів нижчою, ніж на забудованих територіях.

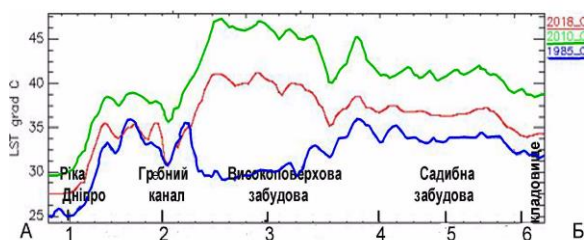


Рис. 5. Значення LST для серпня для профілю А–Б через селитебну зону м. Запоріжжя за даними КЗ Landsat для окремих років (1985, 2003 та 2018)

Після забудови житлового масиву “Південний” поверхневі температури стали на 6° (2002 рік) та 4° (2016 рік) вищі, ніж на територіях під садибною

забудовою. У серпні ця різниця трохи менша, ніж у липні.

#### 4.2. Аналіз поверхневих температур антропогенно-модифікованих та постіндустріальних територій

Профіль В–Г проведено через Шевченківський та Заводський райони в північно-західному напрямку від звалища твердих побутових відходів (ТПВ-1) до звалища промислових відходів металургійних підприємств. Він перетинає різні ЛФЗ з об'єктами природного та штучного генезису (Рис. 6) – починається на агроландшафтах (точка 1), далі перетинає долину річки Мокра Московка, де знаходяться затоплені (точка 3), а також діючі гранітні кар'єри, відвали щебня підприємства “Нерудпрому” (точка 2). На північній стороні долини розташоване звалище ТПВ-1, що функціонує вже понад 50 років і протягом певного часу змінило свої обриси, стан прогрівання і зволоження (точка 4). Далі профіль трасується через територію підприємства “Мотор-Січ” (між точками 6–7), автобазу та складські приміщення (точки 10–11), ЗДП “Кремній – полімер” (точка 7); перетинає залізничні та шосейні дороги (біля точки 6, 7 та 11), Запорізький титано-магнієвий комбінат (між точками 11–12), металобазу (точка 13), територію звалища твердих побутових відходів та шламонакопичувача промислових відходів металургійних підприємств (між точками 14–15).

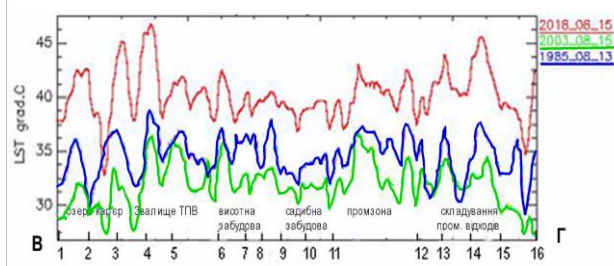


Рис. 6. Положення профілю В–Г через різні ландшафтно-функціональні зони Запоріжжя

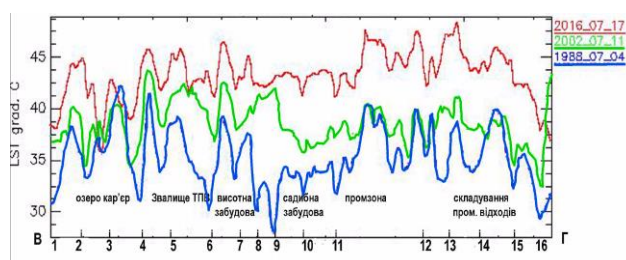
Крім промислових об'єктів, на цьому трансекті відображені селитебна зона з висотною (точки 7–8), низькоповерховою садибною забудовою селищ “ДД” та “Запоріжжя Ліве” (між точками 9–11) та садове товариство “Феросплавщик” (точки 15–16). Профіль В–Г перетинає долини балок і припливів Мокрої Московки (між точками 2–3), балки Суха Московка (точка 8), Капустянка (точка 10), затоки Дніпра (точка 16).

Детальний аналіз часового ряду даних LST за липень та серпень (Рис. 7, 8) за профілем В–Г дає змогу зробити такі висновки: в цілому, на одні й ті ж дати місяця за досліджуваний період (з 1985 до

2018 рр.) температура поверхні з часом суттєво зросла. Перевищення температур на 8 °С мають точки з низькими значеннями LST (вода, долини з трав'яним покривом, вологі ділянки), до 10 °С мають перевищення LST для виробничих територій та промислових об'єктів.



**Рис. 7.** Значення LST для профілю В–Г за даними КЗ Landsat, для липня в окремі роки (1985, 2003 та 2018)



**Рис. 8.** Значення LST для профілю В–Г, за даними КЗ Landsat, для серпня в окремі роки (1985, 2003 та 2018)

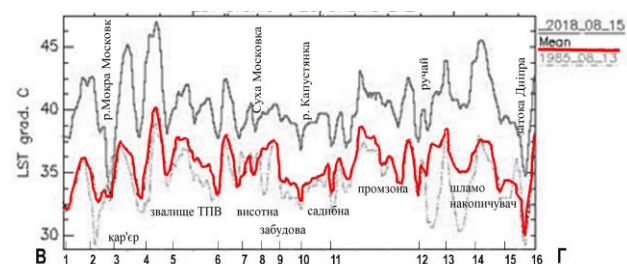
Із неузгодженою, неуспадковою поведінкою кривих LST виявилася ділянка Передточанського кар'єру, де контури схилів кар'єру, відвалів, обводненої зони кар'єру змінювалися з часом (точки 2–3), а отже змістилися температурні піки, тобто ця ділянка є нестабільною і швидкоплинно змінюваною. Інфільтраційні поля ТПВ-1 завжди мають нижчі поверхневі температури (точка 4), ніж саме тіло смітника (між 4 і 5 точками). Зміни відбулися між 5 і 6 точками, але мінімум досягається в точці 6 – зелена зона вздовж залізниці завжди показує мінімуми температури. Цікавою є точка 9, що знаходиться на межі садибної забудови та земель резерву під забудову з трав'янистою, помірно зволоженою природною поверхнею. Ця територія відноситься до долини р. Капустянка з відстійниками підприємства Запоріжсталь, де з часом спостерігається стрибок температури, очевидно, пов'язаний з прогріванням води у відстійнику та його подальшою евтрофікацією. Територія старої промзони не зазнала значної перебудови, тож криві LST узгоджені і підвищені на точках 11–12.

На проаналізованому трансекті максимальні значення температури поверхні досягаються над звалищами побутових відходів, шламонакопичувачем і звалищем промислових відходів, дахами промислових підприємств та в зоні відвалів кар'єру (точки 3, 4, 12, 13–15). Мінімальні значення припадають на озеро в днищі Передточанського гранітного кар'єру (точка 2), затоки Дніпра (точка 16), але в долинах ручаїв вона вища на декілька

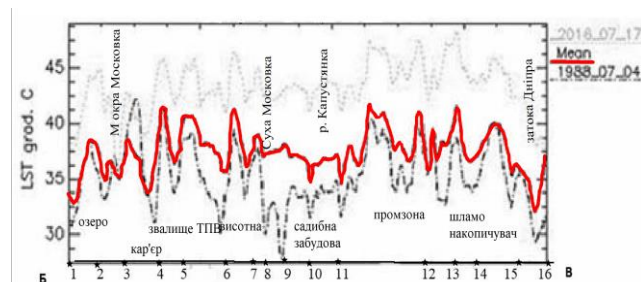
градусів унаслідок їх незначної глибини, забрудненості і прогрівання (точки 8, 10). Найбільші амплітуди коливань температури поверхні з різними ландшафтними характеристиками маємо на початку періоду спостережень, тому що було більше природних ландшафтів, а останнім часом теплова аномалія охоплює більші площі і є менш амплітудною в просторі міста, але в цілому стала вищою за даними кривих LST, в середньому на 6–8 °С за період досліджень.

З порівняння багаторічних середніх розрахованих LST (Mean) за липень і серпень виявилось, що криві липня вищі в середньому на 8 °С та коливання температур в серпні стає менш амплітудним на 2–3 °С між різними покриттями за рахунок різного прогрівання певних ЛФЗ (Рис. 9 та 10).

У більшості випадків розраховані середні значення LST на графіках (Рис. 9 і 10) показали, що їх криві успадковані в часі та корелюють з показниками крайніх для вибірки років (1985–2016 – для липня і 1985–2018 – для серпня), але в деяких місцях профілю в результаті зміни функціонального використання території поведінка усередненої кривої не є успадкованою та вважається покритвом, що змінив своє функціональне призначення.



**Рис. 9.** Порівняння середньомісячних значень LST для серпня за період 1985–2018 рр. для профілю В–Г



**Рис. 10.** Порівняння середньомісячних значень LST для липня за період 1985–2018 рр. для профілю В–Г

Порівняння середніх значень LST (Mean) липня і серпня на профілі Рис. 11 свідчить про збільшення контрастності між різними ЛФЗ у липні, причому на охолоджувальних покриттях (природних) амплітуди нижчі, ніж на підвищувальних (штучних). Щорічне приростання LST, тобто значення коефіцієнта лінійного тренду (Annual), розраховане для липня і серпня, є більш узгодженим, воно має зовсім інші залежності і не корелює із середніми значеннями температури (Рис. 12). Найбільші прирости зафіксовані над ділянками кар'єрів (точка 3), садибною забудовою, яка оновлювалася, та деякі піки виникли в промисловій зоні не над стабільними



дахами, а там, де з'явилися нові непроникні поверхні будівель на промислових майданчиках та над шламонакопичувачем. Мінімальні прирости температури спостерігались в точках 1, 3, 7, 8, 14 і відповідають найбільш стабільним до змін у часі покриттям.

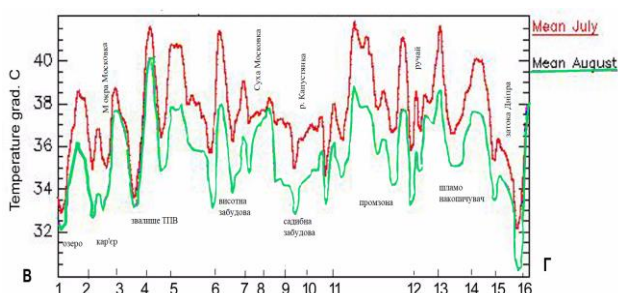


Рис. 11. Зіставлення середньомісячних значень LST для липня і серпня за період 1985–2018 рр. для профілю В–Г

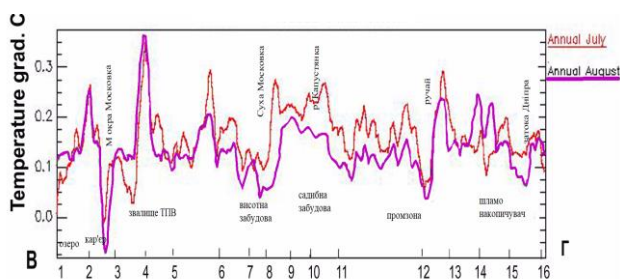


Рис. 12. Значення коефіцієнта лінійного тренду (щорічний приріст значень LST) липня і серпня, за даними 1985–2018 рр., для профілю В–Г через місто

#### 4.3. Аналіз розподілу поверхневих температур у межах промислових об'єктів

Профіль Д–Е прокладено з метою вивчення впливу промислової зони на теплові особливості поверхні м. Запоріжжя. Він простягається з північного заходу на південний схід у Заводському районі, через виробничі підприємства у північній, найбільш насиченій промисловістю частині міста. Цей профіль (Рис. 13) починається від русла Дніпра вище Запорізької ГЕС (точка 1) і закінчується у водоймі в балці Капустянка (точка 12). Перетинає, переважно, індустріальні і виробничі зони, що включають Міський зерновий елеватор (точка 2), зелену прибережну зону (точка 3), Завод великопанельного домобудування (точка 4), ВАТ “Укрграфіт” (між точками 4-5), ВАТ “Запорізький феросплавний завод” (точка 6), ВАТ “Запоріжжкокс” (точка 8), ВАТ Електрометалургійний завод “Дніпроспецсталь” (між точками 8–9), виробничі бази та ремонтні майстерні (точки 10–11), зокрема АП “Електрочормет” та ВО “Електромонтажтехніка” та мережу шосейних і залізничних шляхів сполучення (точки 7, 10). Цей профіль також включає зелену зону і складські приміщення біля балки Капустянка (точка 11), промисловий відстійник (точка 12). Дані про розташування підприємств отримані з Генерального плану міста.

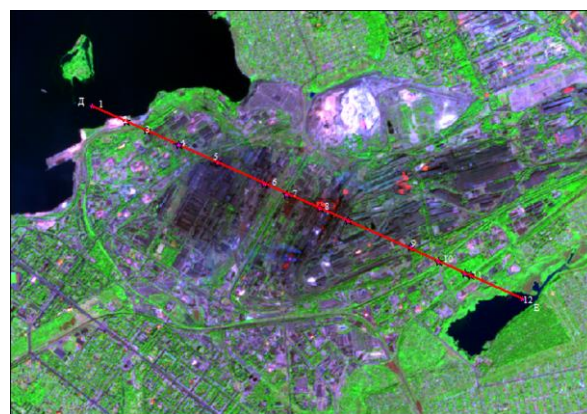
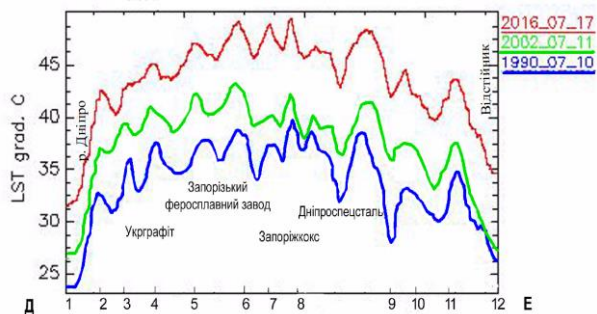


Рис. 13. Положення профілю Д–Е в північній промисловій зоні міста

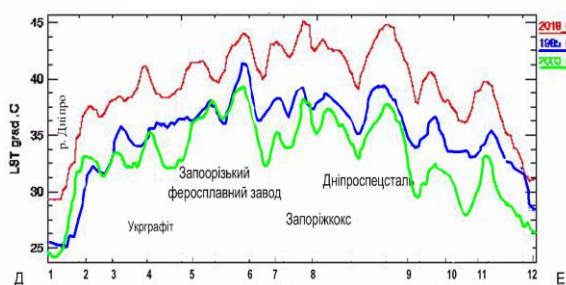
Всі дані LST часового ряду липня (Рис. 14) і серпня (Рис. 15) на профілі Д–Е через Заводський район фіксують, що поверхнева температура суттєво вища над промисловими об'єктами, а саме над дахами і промисловими майданчиками та окремими стаціонарними джерелами викиду тепла, вона вища за розраховану середню по місту, що показує Рис. 16. За досліджуваний часовий проміжок у 30 років спостерігається стабільне підвищення температури та майже скрізь простежується успадкованість аномальних піків підвищених температур над виробничими ділянками: це стосується Феросплавного заводу, “Запоріжжкоксу”, “Дніпроспецсталь” і досягає 49 °С, що на 15 °С перевищує середні для міста. Порівнюючи криві за різні роки над підприємством “Укрграфіт” відмічається неузгодженість в районі точок 2, 3, 4, що відповідають території цього заводу та інших невеликих підприємств, де, очевидно, з'явилися нові корпуси та зменшилась зелена зона. Пониження кривих LST відповідає невеликим острівцям зелених насаджень вздовж доріг та на межах підприємств (між точками 5–6 та 8–9), але найбільше зниження кривих на всіх графіках спостерігається за межами Дніпроспецсталі, коли профіль перетинає зелену зону вздовж Південного шосе та Поліської вулиці і потрапляє в зону дії Капустянського відстійника. Температура в затоці р. Дніпро (початок профілю) на 2–3 °С нижча, ніж у відстійнику річки Капустянка (точка 12, кінець профілю), куди скидаються промислові води. Середньомісячні значення коефіцієнта лінійного тренду в індустріальній зоні для профілю Д–Е та в цілому для міста, тобто щорічні прирости LST відображаються на Рис. 17 і свідчать, що є суттєві перевищення над окремими територіями Запоріжжкоксу, Феросплавного заводу та Дніпроспецсталі порівняно із середніми по місту.

Як було доведено в попередньому дослідженні (Ліценко, 2020), навіть зниження промислового виробництва не гарантує зниження загального рівня LST, тому що на ділянках цих підприємств залишаються великі площі непроникних штучних поверхонь. І тільки створення значних озелених ділянок всередині та на межах підприємств, створення зелених дахів, охолоджувальних водойм і зволоження території влітку дасть змогу знизити

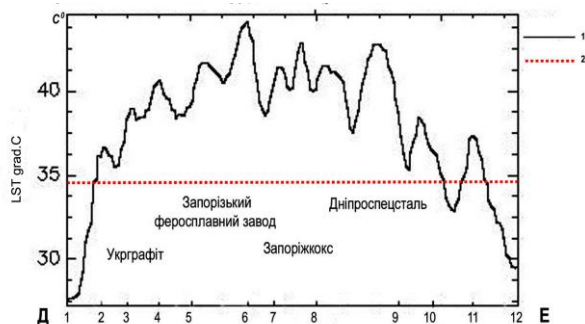
рівень прогрівання поверхні і зменшення ефекту USI над містом.



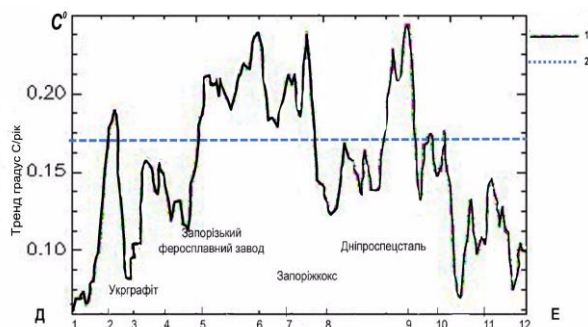
**Рис. 14.** Значення LST для профілю Д–Е через Заводський район, за даними КЗ Landsat, в окремі роки (1990, 2002, 2016) для липня



**Рис. 15.** Значення LST для профілю Д–Е через Заводський, за даними КЗ Landsat, в окремі роки (1986, 2000, 2018) для серпня



**Рис. 16.** Середньомісячні значення LST для липня по профілю Д–Е через Заводський район Запоріжжя: 1 – середньомісячні температури для липня по профілю; 2 – середньомісячні температури для липня в цілому для міста



**Рис. 17.** Тенденції змін значень LST для липня за період 1988–2016 рр. (щорічний приріст): 1 – значення коефіцієнтів лінійних трендів LST по профілю; 2 – значення коефіцієнтів лінійних трендів LST в цілому для міста

## Висновки

За даними аналізу довгострокового ряду супутникових даних Landsat у видимому, інфрачервоному та тепловому діапазонах для м. Запоріжжя обчислені середні значення температур для липня за 30 років становили 35.8 °С. Розрахований середній щорічний приріст температури земної поверхні для липня за цей період становив 0.49 °С, максимальний – +0.66 °С. Визначені відмінності температурних показників поверхні з різними ландшафтними особливостями та проаналізовані три профілі з багаточасовим рядом даних LST, що охопили основні райони міста та перетинають найголовніші ЛФЗ. Перевищення температури поверхні в деяких індустриальних районах над металургійними комбінатами порівняно із середнім по місту становило 18 °С, а найбільші прирости спостерігаються над житловими новобудовами масиву Південний та окремими ділянками промислових зон. Наявність водойм і заліснених заплавлі сприяє зниженню температури навколишніх територій і зменшує показники середніх значень УНІ. Найбільші амплітуди просторових коливань температури поверхні спостерігаються на початку періоду спостережень, тому що було більше природних ландшафтів, а останнім часом теплова аномалія охоплює більші площі і є менш амплітудною внаслідок більшого прогрівання всіх ЛФЗ, чому сприяє невеликий відсоток зелених насаджень у місті, що мають незначну зімкнутість крони та вегетаційний індекс нижчий за показник 0,7. Найбільш мінливими за температурними ознаками виявилися поверхні майданчиків із складування промислових відходів, відвали і розробки Передточанського гранітного кар'єру. Внутрішні водойми на 2–3 °С підвищили рівень прогрівання за останнє десятиріччя, а на ділянках щільної нової висотної забудови, що з'явилася на місці природних ландшафтів, розрахований LST збільшився до 15 °С.

У плані дій з адаптації до наслідків зміни клімату міста (План дій з адаптації до наслідків зміни клімату міста Запоріжжя, 2020) зазначається, що вразливість міста до ризику виникнення теплового стресу посилюється такими чинниками: недостатня кількість зелених насаджень в місті, зокрема посухостійких, з інтенсивним ростом, здатних стримувати пил, вітер; тенденція до скорочення площ існуючих зелених зон через забудову територій; щільна забудова; недостатня кількість зон зі сприятливими умовами для відпочинку населення під час спеки (зелені зони, зони відпочинку на водоймах тощо). Отже, результати нашого дослідження дають змогу врахувати розподіл і мінливість рівня теплового навантаження у м. Запоріжжі для зменшення ефекту УНІ, прийнявши низку природоохоронних заходів, що включають застосування в інженерних конструкціях поверхонь з відбивальним ефектом, зелених дахів, облаштування інфраструктури, що сприяє захисту і відпочинку населення в літній час, зокрема зелених зон, парків, рекреаційних майданчиків з природним покриттям,



частого зволоження вулиць у літній час, а також прийняття обґрунтованих містобудівних проєктів, що враховують теплові показники поверхні.

## Література

- Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки / Станкевич С. А. и др. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2015. № 7. С. 14–23. URL: [https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/7\\_2](https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/7_2)
- Ліщенко Л. П., Пазинич Н. В., Філіпович В. Є. Аналіз розподілу літніх температур поверхні міста Миколаєва за даними теплового діапазону супутників серії Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. № 21. С. 49–59. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.148>
- Ліщенко Л. Моніторинг теплового поля колишніх виробничих зон і промислових об'єктів м. Києва за супутниковими даними. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2020. № 25. С. 17–27. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.25.172>
- План дій з адаптації до наслідків зміни клімату міста Запоріжжя (2020). URL: <https://zp.gov.ua/uk/sessions/99/resolution/41273.pdf>.
- Alavipanah Sadroddin, Wegmann Martin, Qureshi Salman et al. The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: a case study of Munich. Germany during the warm season. *Sustainability*. 2015. № 7. С. 4689–4706. doi:10.3390/su7044689.
- Hidalgo García D., Arco Díaz J. Spatial and Multi-Temporal Analysis of Land Surface Temperature through Landsat 8 Images: Comparison of Algorithms in a Highly Polluted City (Granada). *Remote Sensing*. 2021. № 13. С. 1012. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13051012>.
- Kottmeier C., Corsmeierm U., Bieger C. Effects of Urban Land Use on Surface Temperature in Berlin: Case Study. doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:2(128).
- Li Xiaoma, Zhou Weiqi, Ouyang Zhiyun et al. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing Metropolitan area, China. *Landscape Ecology*. July 2012. Vol. 27. Is. 6. P. 887–898. Springer Science+Business Media B.V. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-012-9731-6>.
- Maimaitiyiming Matthew, Ghulam Abduwasit, Tiyip Tashpolat et al. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier. March 2014. Vol. 89. P. 59–66. URL: <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/1355>.
- Subhanil Guha, Himanshu Govil, Anindita Dey, Neetu Gill. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51. No: 1. P. 667–678. doi:10.1080/22797254.2018.1474494.
- Voogt J. How researchers measure urban heat islands. Department of Geography, University of Western Ontario London ON Canada. 2004. URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/epa\\_how\\_to\\_measure\\_a\\_uhi.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/epa_how_to_measure_a_uhi.pdf).
- Wienert Uwe, Kuttler Wilhelm. The dependence of the urban heat island intensity on latitude. A statistical approach. *Meteorologische Zeitschrift*. 2005. Vol. 14. № 5. P. 677–686. doi:10.1127/0941-2948/2005/0069.
- Meteorologische Zeitschrift. 2005. Vol. 14. № 5. P. 677–686. doi:10.1127/0941-2948/2005/0069.

## References

- Action Plan for Adaptation to the Consequences of Climate Change in the City of Zaporizhia. (2020). <https://zp.gov.ua/uk/sessions/99/resolution/41273.pdf>. (in Ukrainian).
- Alavipanah, Sadroddin, Wegmann, Martin, Qureshi, Salman, Weng, Qihao, Koellner, Thomas. (2015). The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: a case study of Munich. Germany during the warm season / *Sustainability*, 15 (7). 4689–4706. doi:10.3390/su7044689.
- Hidalgo, García D., Arco, Díaz J. (2021). Spatial and Multi-Temporal Analysis of Land Surface Temperature through Landsat 8 Images: Comparison of Algorithms in a Highly Polluted City (Granada). *Remote Sensing*, 13. 1012. <https://doi.org/10.3390/rs13051012/>.
- Kottmeier, C., Corsmeierm U., Biegert, C. (2007). Effects of Urban Land Use on Surface Temperature in Berlin: Case Study. doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:2(128).
- Li, Xiaoma, Zhou, Weiqi, Ouyang, Zhiyun, Xu, Weihua, Zheng, Hua. (2012). Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing Metropolitan area, China, *Landscape Ecology*, 27 (6). 887–898. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-012-9731-6>.
- Lisichenko, L., Pazynych, N., Filipovych, V. (2019). Summer surface temperature distribution analysis of Mykolayiv city based on the Landsat series thermal infrared data. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 21, 49–59. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.148>. (in Ukrainian).
- Lisichenko, L. (2020). Monitoring of land surface temperature of post-industrial areas and industrial sites in Kyiv using remote sensing data. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 25. 17–27. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.25.172> (in Ukrainian).
- Maimaitiyiming, Matthew, Ghulam, Abduwasit, Tiyip, Tashpolat, Pla, Filiberto, Latorre-Carmona, Pedro, Halik, Umut, Sawu, Mamat, Caetan, Mario. (2014) Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 89. 59–66. <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/1355>.
- Stankevich, S. A., Filipovich, V. E., Lubsy, N. S., Krylova, A. B., Kritsuk, S. G., Brovkina, ... Tronin A. A. (2015). Intercalibration of methods for restoring the thermodynamic temperature of the surface of an urbanized area based on materials of thermal space imagery. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 7. 14–23. <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77>. (in Russian).
- Subhanil, Guha, Himanshu, Govil, Anindita, Dey, Neetu, Gill. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51:1. 667–678. doi:10.1080/22797254.2018.1474494.
- Voogt, J. (2014). How researchers measure urban heat islands. Department of Geography, University of Western Ontario London ON Canada. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/epa\\_how\\_to\\_measure\\_a\\_uhi.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/epa_how_to_measure_a_uhi.pdf).
- Wienert, Uwe, Kuttler, Wilhelm. (2005.) The dependence of the urban heat island intensity on latitude. A statistical approach. *Meteorologische Zeitschrift*, 14 (5). 677–686. doi:10.1127/0941-2948/2005/0069.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ГОРОДА ЗАПОРОЖЬЕ (УКРАИНА) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Л. П. Лищенко, А. И. Кудряшов

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины” 0154, ул. Олеса Гончара, 55-Б, Киев, Украина  
Город Запорожье – один из крупнейших промышленных городов, расположенный в центральной степной части Украины по обоим берегам Днепра. В городе много плотно размещенных промышленных объектов металлургической, машиностроительной, химической и строительной отрасли, что образует над городом мощный термальный остров (УИ), физические характеристики которого (размеры, форма, распределение температур) меняется в пространстве и во времени. Анализ космических снимков искусственного спутника Земли Landsat, полученных из тепловых каналов, позволил установить значительные изменения этих характеристик, произошедшие в течение 33 лет, то есть почти за весь период функционирования орбитальных аппаратов этой серии.

Среднее повышение поверхностных температур (LST), общее для всего термального острова города, рассчитанных за этот период составило для июля 0.149 °C ежегодно. Построены температурные графики LST по данным июля и августа для трех профилей, пересекающих большинство ландшафтно-функциональных зон города. Установлено, что одна из составляющих ландшафтно-функциональных зон – земная поверхность, резко делится на участки, которые понижают и повышают температуру относительно ее средних значений для всего города. Со временем наблюдается уменьшение контраста между этими разновидностями в связи с увеличением нагрева всей поверхности города и установления стабильного эффекта УИ с превышением в промышленных районах до 14 °C. Для большей части города годовой прирост LST находится в интервале от 0.15 до 0.3 °C. Максимальное повышение температуры до 0,6 °C за год наблюдается в новом плотно застроенном жилом массиве «Пивденний» и на территориях производственных зон промышленных объектов в Заводском районе Запорожья. Понижающее тепловое воздействие имеют ландшафты только водных поверхностей и отдельных сельскохозяйственных пахотных земель, а в пределах города естественный покров, представленный травянистой растительностью лугов, пустошей и даже разреженной древесной растительностью прогревается до средних значений по городу. Сравнение средних для всего города июльских и августовских LST показали, что показатель июля на 8 °C выше, а колебания температур в августе становятся менее амплитудными на 2–3 °C в пределах пространства теплового острова.

**Ключевые слова:** температура поверхности земли, ландшафтно-функциональные зоны, городской тепловой остров, температурное профилирование, серия данных Landsat, Sentinel-2

## THE RESULTS OF THE STUDY OF SPATIO-TEMPORAL CHANGES IN SURFACE TEMPERATURES OF ZAPORIZHYA BASED ON SATELLITE DATA

L. P. Lishchenko, O. I. Kudriashov

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55-B, Oles Gonchar str., Kyiv 01054, Ukraine

Zaporizhzhia is one of the largest industrial cities located in the central steppe part of Ukraine on both banks of the Dnieper. The presence of a large number of metallurgical, mechanical engineering, chemical and construction industrial facilities forms a powerful thermal island (UHI) which size varies in space and time. The distribution of surface temperatures within the thermal anomaly is influenced by the landscape-functional use of the territory and the established changes that occurred during the 33-year period according to the data obtained from the thermal channels of the Landsat series. The average increase in the land surface temperatures (LST) calculated for this period was 0.149 °C per year for July. The analysis of LST temperature curves according to the data of July and August has been carried out for three profiles that cross the majority of the landscape-functional areas of the city (residential, industrial and post-industrial). The landscape characteristics expressed in the satellite image as land cover are divided on the surface with a decreasing and increasing effect of temperature compared to the mean. Over time, a decrease in contrast between different land cover has been observed due to greater heating of the entire surface over the city and the establishment of a stable effect of UHI with an excess up to 14 °C in industrial areas. The annual increase in LST is in the range from 0.15 to 0.30 °C for the majority of the city. The maximum increase in temperature to 0.6 °C per year has been observed in the densely built-up Pivdennyi residential area and in the zones of industrial facilities in the Factory district of Zaporizhzhia. Only landscapes of water surfaces and separate agricultural croplands have a reducing thermal effect while the natural cover under meadows, wastelands and even wood vegetation within the city warms up to the mean values. Comparisons of the mean for the whole city of July and August LST has showed the rate of July to be 8 °C higher and temperature fluctuations in August become less amplitude by 2–3 °C.

**Keywords:** spatial-temporal changes, land surface temperature, urban heat island, Landsat, Sentinel-2, landscape functional areas, thermal profiling.

*Рукопис статті отримано 29.07.2021*