

## АНАЛІЗ ДАНИХ ТЕПЛОВОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ПРИРОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

О. В. Альохіна, Д. В. Івченко, Н. А. Піць

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: alokhina2011@gmail.com

Розглянуто доцільність використання теплових космічних зображень, отриманих сенсором TIRS супутника Landsat 8, під час моніторингових досліджень природних об'єктів. Визначено, що теплове поле природних територій характеризується значною сезонною просторово-часовою мінливістю. Встановлено, що сезонна мінливість інтенсивності теплового випромінювання різних об'єктів відображає закономірності, пов'язані із властивостями цих об'єктів, тобто може бути їх дешифрувальною ознакою. Відповідно до результатів класифікації без навчання багаточасового теплового зображення визначено структуру теплового поля заповідної території та встановлено відповідність її елементів місцевим природним об'єктам.

**Ключові слова:** теплове поле, класифікація без навчання, інтенсивність теплового випромінювання, квантування, класифікація супутникових зображень.

## THERMAL REMOTE SENSING DATA ANALYSIS IN MONITORING OF NATURAL OBJECTS

O. V. Alokhina, D. V. Ivchenko, N. A. Pits

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Today, the geographical interpretation of thermal satellite images, by a number of processing methods and applications, remains one of the least deeply studied areas. Geographic objects are characterized by different thermal and radiation properties. Therefore, they react differently to changes in the intensity of solar radiation, which is recorded in thermal images by differences in image brightness. What this article deals with is the usage of thermal satellite images from TIRS system of Landsat 8 in the monitoring of natural objects. Thermal images are a special source of geographical information that reflects the actual thermal radiation of objects on the earth's surface. It is defined that the thermal field of natural territories is characterized by high seasonal spatial-temporal variability. So, seasonal dynamics of the intensity of thermal radiation of natural have characteristic differences. Winter is characterized by weak contrasts in the intensity of thermal radiation. Water bodies are best identified during this period. For spring, the increased intensity is observed for open woodless areas, in summer for agricultural lands, and in autumn the highest level of thermal radiation intensity is observed within open ground areas. Also, it was determined that the seasonal variability of thermal radiation intensity of different objects shows regularities related to the features of these objects. In other words, it can be their interpretation feature. The structure of the thermal field of protected areas was defined according to the unsupervised classification of a multitemporal thermal image using the IsoCluster algorithm. The accuracy of the performed classification was proved by the full compatibility of classified elements of thermal structure with natural objects.

**Keywords:** thermal field, unsupervised classification, intensity of thermal radiation, quantization, satellite image classification.

**Формулювання проблеми.** Різноманіття технічних засобів дистанційного зондування Землі забезпечує отримання космічних зображень з різними властивостями та параметрами. Так, зображення різного масштабу і просторової розрізненості дозволяють виявляти і вивчати різноманітні геосистеми та оцінювати взаємодію об'єктів на відмінних за площею територіях. Крім того, широкі можливості надає використання

© О. В. Альохіна, Д. В. Івченко, Н. А. Піць, 2020

різних спектральних діапазонів, серед яких зображення у тепловому інфрачервоному діапазоні займають особливе місце.

Теплові зображення є особливим джерелом географічної інформації. На них відображене власне теплове випромінювання об'єктів земної поверхні. Для реєстрації його інтенсивності використовують оптико-механічні та оптико-електронні тепловізори. Інтенсивність теплового випромінювання об'єктів не сприймається оком, проте людина сприймає її через температуру. Всі природні й антропогенні об'єкти на поверхні Землі характеризуються власним тепловим випромінюванням, що обумовлює можливість їх дистанційної реєстрації у інфрачервоному діапазоні. Важливою особливістю і цінністю теплових зображень є те, що вони містять інформацію про теплові та випромінювальні властивості об'єктів, які не можна виявити в інших спектральних діапазонах.

Сучасні системи космічної теплової зйомки фіксують дискретні теплові зображення, які складаються з елементарних комірок – пікселів. Значення, яке має піксел теплового зображення, це яскравість, яка є безрозмірною величиною, похідною від інтенсивності теплового випромінювання, що вимірюється у  $\text{Вт/м}^2$  або  $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$ . Водночас об'єкти земної поверхні можуть мати однакову температуру, але випромінювати з різною інтенсивністю. Здатність об'єктів випромінювати енергію на різних довжинах хвиль називається випромінювальною здатністю [1], яка залежить від фізичних властивостей об'єкта. Яскравість, яку реєструють під час теплової зйомки, пропорційна інтенсивності теплового випромінювання та випромінювальній здатності. Крім того, у сигналі присутня складова, яка набуває різних значень залежно від довжини хвилі реєстрованого сигналу і пов'язана з розсіюванням у атмосфері і власним тепловим випромінюванням. Прямого зв'язку між значеннями яскравості на зображенні та інтенсивністю теплового випромінювання об'єктів земної поверхні загалом немає. Проте необхідно враховувати, по-перше, радіаційну здатність об'єктів земної поверхні, а по-друге, параметри атмосфери, яка знаходиться між об'єктом земної поверхні і апаратурою, яка реєструє його випромінювання [2].

Розробленню алгоритмів отримання температури з теплових зображень присвячено безліч праць [3–5]. На сьогодні цей напрям застосування теплових космічних зображень є найпоширенішим [6, 7], хоча отриманий результат залежить як від алгоритму обробки даних, так і від вихідних даних, зокрема, їх повноти.

Таким чином, інтенсивність теплового випромінювання об'єктів земної поверхні, зареєстрована під час теплової зйомки, очевидно, залежить від їх фізичних та хімічних властивостей, характеристик матеріалів, з яких виготовлені антропогенні об'єкти, особливостей біохімічних процесів природних об'єктів. Ці властивості визначають місце об'єктів в структурі геосистем та ієрархічну структуру. Іншими словами, містять важливу якісну інформацію про них, що дає принципову можливість виявляти природні об'єкти на теплових космічних зображеннях, у т. ч. природні й антропогенні геосистеми, що і становить інтерес у цій роботі.

**Матеріали і методи.** На формування теплового поля місцевості дуже великий вплив має інтенсивність сонячного випромінювання, яка змінюється впродовж доби і сезону. Природні об'єкти характеризуються різними тепловими і радіаційними властивостями, отже, по-різному реагують на зміну інтенсивності сонячного випромінювання, що і фіксується на теплових зображеннях відмінностями у яскравості. Інтенсивність теплового випромінювання може змінюватись і на багаторічному рівні під час перетворення середовища під дією природних або антропогенних сил. Таким чином, інтенсивність теплового випромінювання більшості природних об'єктів, а отже, теплове поле місцевості, дуже мінливе.

**Територія досліджень.** Заповідна територія біосферного резервату “Шацький” знаходиться у Волинській області (Україна) та займає площу 75 000 га. Характерною особливістю цієї території є її велика водонасиченість: в межах території знаходиться 31 озеро загальною площею  $\approx 6000$  га, а також ріки, струмки, канали та канали різного походження. Ліси займають більше 50% території, 6,8% – луки, 25% – орні землі

та населені пункти, 4% – болота. Водно-болотні угіддя біосферного резервату зумовлюють те, що ця територія відіграє важливу кліматоутворювальну роль для значної частини Європейського континенту [8].

**Сезонна динаміка теплового поля місцевості.** Для аналізу використано різносезонні теплові зображення зі супутника Landsat 8, канал 11 (Thermal Infrared).

**Методика квантування різносезонних теплових зображень.** Інтенсивність теплового випромінювання визначають за тепловими та випромінювальними властивостями природних об'єктів. Водночас ці властивості пов'язані з іншими, які також можуть становити певний інтерес.

Для зіставлення різносезонних зображень використано методику рівномірного (однорідного) квантування, відповідно до якої, весь діапазон інтенсивності теплового випромінювання розбитий на визначену кількість однакових відрізків і замінені ці значення на найближчий рівень квантування  $y_q$ , розрахований за формулою

$$y_q = \left( \left[ \frac{y}{h} \right] + 0,5 \right),$$

де  $y$  – значення інтенсивності теплового випромінювання в межах діапазону;  $h$  – крок квантування.

Крок квантування обирали за загальним правилом для всіх зображень, що дало змогу отримати серію різносезонних квантованих зображень, придатних для порівняння. Розрахунки дозволили зіставити і гістограми розподілу інтенсивності випромінювання. Це дало змогу розділити їх на сім ступенів або діапазонів яскравості, а саме (рис. 1): 1-ий діапазон: від 0 по осі яскравості (горизонтальна) – “найхолодніші” варіації теплового поля; 2-ий – “помірно холодні”; 3-ий – нижча фонові інтенсивність теплового випромінювання; 4-ий – максимальна фонові інтенсивність теплового випромінювання; 5-ий – вища фонові інтенсивність теплового випромінювання; 6-ий – “помірно теплі” варіації теплового поля; 7-ий – “найтепліші” варіації теплового поля.

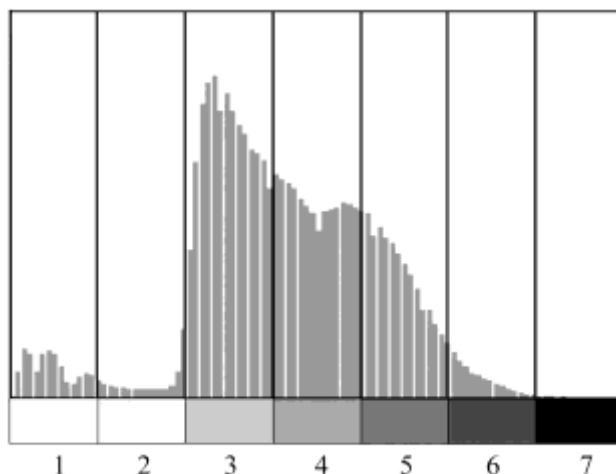


Рис. 1. Шкала діапазонів гістограм квантованих зображень.

Розділення гістограм на діапазони дає можливість виявити ділянки, які характеризуються фонові інтенсивністю теплового випромінювання, а також ділянки зі суттєвим відхиленням від фонових значень.

За такого розподілу гістограм найбільша кількість пікселів у діапазонах 3, 4 та 5 визначає об'єкти, які мають фоновий рівень теплового випромінювання. Діа-

пазони, які знаходяться справа (6, 7) та зліва від фонових (1, 2) визначають об'єкти, які характеризуються підвищеним та пониженим рівнем теплового випромінювання, відповідно.

Такий підхід до аналізу різносезонних зображень дозволяє виділити ті об'єкти, яскравість яких суттєво відрізняється від фону. Враховуючи сезонну мінливість теплового поля, а також різний вплив властивостей об'єктів на інтенсивність їх теплового випромінювання, стає очевидним, що більшість варіацій теплового поля мають виражену сезонну динаміку.

**Методика класифікації різносезонних теплових зображень.** Набір різночасових зображень, поданих в одному, є багаточасовим зображенням. Іншими словами, це масив даних, де для кожної точки земної поверхні можна поставити у відповідність вектор  $x = (b_1, b_2, \dots, b_i)$ , де  $b_i$  – яскравості на різночасових зображеннях.

Зображення, отримані у певний момент часу та з яких складається багаточасове зображення, фіксують певний динамічний стан явища, його морфологічну структуру на певному етапі розвитку. Багаточасові зображення виявляють зміни, які відбуваються між зйомками, і саме закономірності, які спостерігають під час змін природних об'єктів, можуть бути їх дешифрувальними ознаками.

Багаточасове зображення – це існуючі зображення, створені у певний момент часу, які розташовуються у порядку зміни сезонів, формуючи багатопаровий знімок, який і використовують для класифікації.

Часовий образ візуалізується у вигляді графіка, де на горизонтальній осі – дата зйомки (день року), а на вертикальній – значення яскравості. Значення яскравості можуть відображатись як для окремих пікселів чи об'єктів, так і для кластерів, отриманих за результатами класифікації. Приклади часових образів значень яскравості для кластерів наведено нижче.

Класифікували 7 різносезонних зображень, які і утворюють один багатопаровий файл. Для цього попередньо використали алгоритм кластеризації IsoCluster (Isodata) [9], щоб визначити характеристики природних груп комірок у багатомірному атрибутивному просторі. Кластеризацію виконали з виділенням 3, 6 та 9 класів. Кількість ітерацій кластеризації 20 з мінімальною кількістю комірок у класі рівною 50. В результаті кластеризації отримали три файли сигнатур, на основі яких класифікували за методом максимальної вірогідності. Алгоритм класифікації за цим методом, при віднесенні кожної комірки до одного з класів, поданих у файлі сигнатур, враховує як дисперсії, так і коваріації сигнатур класів.

**Результати та обговорення.** Аналіз змін теплового поля місцевості на основі теплових космічних зображень дозволив диференціювати види мінливості за ефективністю для дешифрування природних й антропогенних геосистем. Мінливість інтенсивності теплового випромінювання властива як для добового й сезонного ходу, так і для багаторічного.

Добова динаміка пов'язана з відмінностями в інтенсивності прямої сонячної радіації у нічний і денний час, а отже, з нерівномірністю нагріву об'єктів земної поверхні впродовж доби. Відомо, що протягом доби можна виділити три основні стани: максимальна інтенсивність випромінювання більшості об'єктів після 12 год. дня; випромінювання акумульованої за час сонячного світла енергії у нічний час; слабкі контрасти інтенсивності теплового випромінювання об'єктів у період перед світанком, що пов'язано з відсутністю прямої сонячної радіації і виснаженням запасів акумульованої за день теплової енергії. Варто зазначити, що істотно впливає рельєф та антропогенне перетворення місцевості.

Особливості сезонної динаміки інтенсивності теплового випромінювання мають загалом певну подібність до добової. Однією відмінністю є лише її амплітуда.

Аналіз різносезонних теплових зображень для досліджуваної території дав можливість виявити характерні для різних сезонів риси теплового поля цієї місцевості.

**Зима.** Для природних об'єктів території у зимовий період характерні слабкі контрасти інтенсивності теплового випромінювання. Гістограми фрагментів теплових зображень досить вузькі. Зважаючи на різні метеоумови, якими може характеризуватись зимовий період на початку сезону та наприкінці, для аналізу обрали 2 різні космічні зображення, на яких суттєво відрізняється стан об'єктів залежно від погодних характеристик.

7 грудня 2016 року були такі метеорологічні параметри:  $t$  повітря  $-3,3^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+0,8^{\circ}\text{C}$ , висота снігового покриву 4 см. Інтенсивність теплового випромінювання лісів (рис. 2а, 1) суттєво вища порівняно з відкритими безлісими просторами (2) (переважно сільськогосподарські угіддя у долині р. Прип'ять) внаслідок того, що лісова рослинність утримує тепло, яке виділяє земна поверхня. Великі та глибокі природні водні об'єкти (озера) (3), непокриті льодом і снігом, акумулюють теплову енергію та мають вищу температуру, тому інтенсивність їх теплового випромінювання є найвищою. Менші та мілкі озера, вкриті льодом та снігом, мають суттєво нижчу інтенсивність теплового випромінювання, порівняно з населеними пунктами, та мають середні значення. Отже, в цей період найкраще виявляють, по-перше, водні об'єкти, непокриті льодом та снігом, які виділяються через підвищену інтенсивність теплового випромінювання; по-друге, відкриті безлісі ділянки (с/г угіддя), для яких характерний найнижчий рівень інтенсивності теплового випромінювання; по-третє, великі лісові масиви, особливо соснові, які накопичують теплове випромінювання і мають суттєво вищий рівень інтенсивності на відміну від решти території.

7 лютого 2016 року:  $t$  повітря  $+3^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+1,9^{\circ}\text{C}$ , снігового покриву та повного льодоставу немає. Інтенсивність теплового випромінювання лісів у цей час є фоною порівняно з с/г угіддями у долині р. Прип'ять, які мають найвищі показники. Це зумовлено тим, що вони накопичили тепло впродовж попередніх днів (рис. 2б). Водночас водні об'єкти, непокриті льодом і снігом, вихолоджуються протягом холодного сезону та мають найнижчу інтенсивність теплового поля. Виявлено, що в цей період найкраще ідентифікуються, по-перше, водні об'єкти, непокриті льодом та снігом, через понижену інтенсивність теплового випромінювання, по-друге, відкриті безлісі ділянки, для яких характерна найвища інтенсивність теплового випромінювання внаслідок суттєвого прогрівання поверхні, на якій ще немає рослинного покриву.

**Весна.** 9 квітня 2015 року:  $t$  повітря  $+8^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+5^{\circ}\text{C}$ . Інтенсивність теплового випромінювання лісів (рис. 2в, 1) у цей час дещо нижча, ніж фонова, вони чітко вирізняються від сільськогосподарських угідь у долині р. Прип'ять, які мають найвищі показники (2). Найбільші та найглибші водні об'єкти (озера) – Світязь, Пулемецьке, Пісочне та Люцимер, мають найнижчу інтенсивність теплового поля, оскільки ще не встигли прогрітися після зимового сезону (3).

Решта малих озер біорезервату зливаються з навколишньою територією, оскільки мають фонову інтенсивність теплового випромінювання. У цей період найкраще ідентифікуються відкриті безлісі ділянки, для яких характерна найвища інтенсивність теплового випромінювання, оскільки рослинний покрив на них ще недостатньо потужний для пом'якшення нагрівання ґрунту.

**Літо.** 12 червня 2015 року:  $t$  повітря  $+18^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+20^{\circ}\text{C}$ . Інтенсивність теплового випромінювання лісів у цей час близька до фонової (рис. 2г, 1).

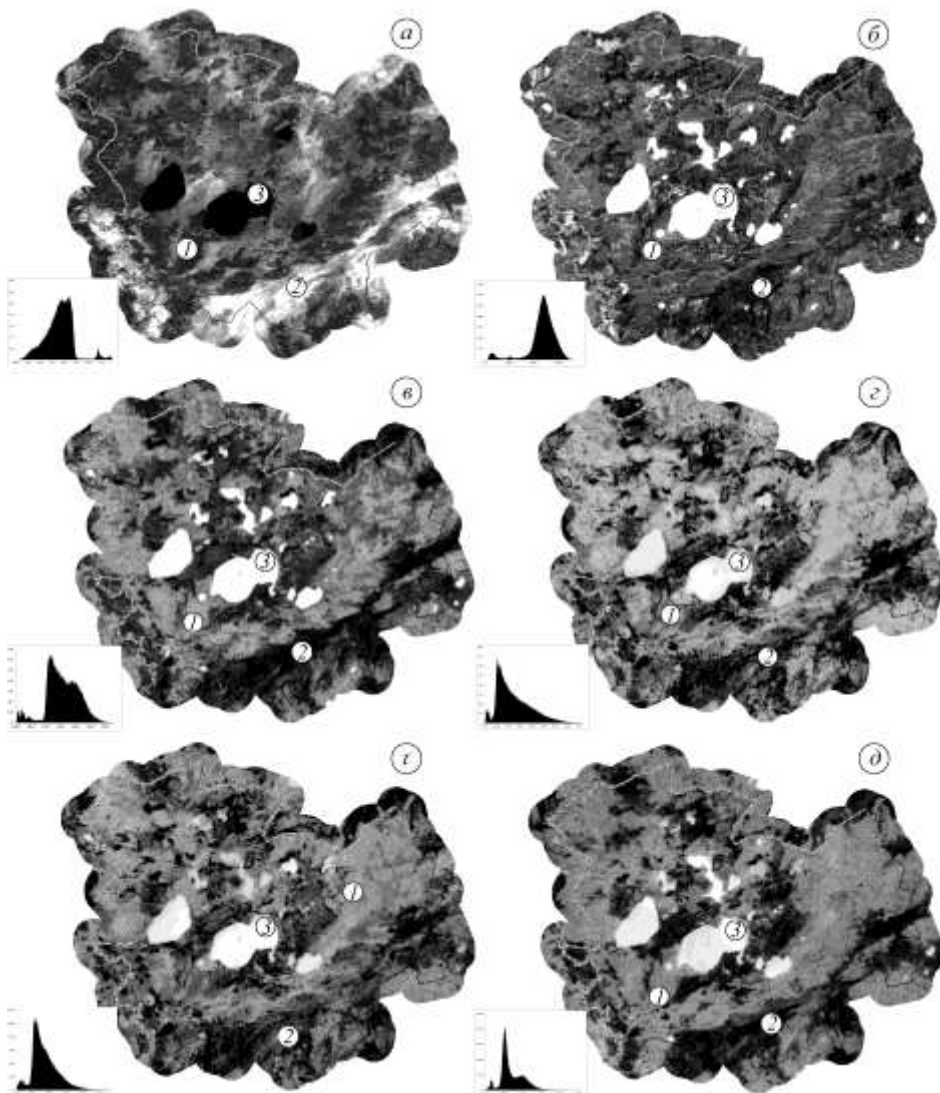


Рис. 2. Теплові зображення системи TIRS станом на: 07.12.16 р. (а), 07.02.16 р. (б), 09.04.15 р. (в), 12.06.15 р. (г), 09.08.13 р. (д), 10.10.18 р. (е) та їх гістограми; 1 – ліси, 2 – відкриті безлісі простори та 3 – водні об'єкти.

Масиви чітко відрізняються від сільськогосподарських угідь у долині р. Прип'ять та в межах населених пунктів, які мають найвищі показники (2). Найбільші та найглибші водні об'єкти (озера) мають найнижчу інтенсивність теплового поля. Малі озера біорезервату зливаються з навколишньою територією (3), оскільки мають фонову інтенсивність теплового випромінювання, як і прилеглі ліси та узлісся (1). В цей період найкраще ідентифікуються відкриті ділянки та с/г угіддя, для яких характерний найвищий рівень інтенсивності теплового випромінювання внаслідок суттєвого прогрівання поверхні.

9 серпня 2013 року:  $t$  повітря  $+27^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+23^{\circ}\text{C}$ . Гістограма зображення широка (рис. 2г), має два максимуми: перший пов'язаний з впливом об'єктів з пониженою інтенсивністю теплового випромінювання лісів (1), крупних водних об'єктів (3); другий – з впливом об'єктів, що відрізняються підвищеною інтенсивністю теплового випромінювання ділянок відкритого ґрунту та піску (2).

Для природних заліснених територій звичайним є виділення максимуму, пов'язаного з впливом лісів, і максимуму, пов'язаного з впливом безлісних ділянок. Серед природних об'єктів ліси відрізняються пониженою інтенсивністю теплового випромінювання і формують своєрідні “острови прохолоди”. Їм протистоять ділянки оголеного ґрунту, безлісі території, насамперед, розорані сільськогосподарські поля в селах.

Спостерігаємо диференціацію рослинного покриву за інтенсивністю теплового випромінювання – залежно від його потужності, вологості, зімкнутості, загального стану. Водні об'єкти, насамперед великі, зберігають низьку інтенсивність теплового випромінювання.

**Осінь.** 10 жовтня 2018 р.:  $t$  повітря  $+10^{\circ}\text{C}$ ,  $t$  води  $+8^{\circ}\text{C}$ . Гістограма теплового осіннього зображення вузька і має один максимум (рис. 2д).

Істотно виділяються пониженою інтенсивністю теплового випромінювання великі водні об'єкти (3). Ліси, здебільшого, характеризуються пониженою інтенсивністю теплового випромінювання (1). Так само виділяються безлісі території (2), особливо сільськогосподарські поля і ділянки відкритого ґрунту. Вони мають найвищу інтенсивність теплового випромінювання, оскільки рослинний покрив на них вже недостатньо потужний для пом'якшення нагрівання ґрунту.

**Аналіз різносезонних квантованих теплових зображень. Водні об'єкти.** Водні об'єкти, як і об'єкти підвищеної вологості, повільніше, ніж сухі реагують на зміни температури повітря та інтенсивність прямого сонячного випромінювання. Таким чином, зі збільшенням температури сухі об'єкти більше випромінюють, ніж вологі, та навпаки.

Таким чином, цей ефект можна спостерігати на прикладі озер біорезервату, які у весняний (рис. 3б), літній (рис. 3в, г) та осінній (рис. 3г) періоди належать до об'єктів, які мають “найхолодніші” варіації теплового поля. З пониженням температури повітря у зимовий період, водні об'єкти належать до 5, 6, та 7-го діапазонів, тобто до об'єктів, що мають вищу фонову інтенсивність теплового випромінювання, «помірно теплі» та «найтепліші» варіації теплового поля (рис. 3а, д).

**Рослинність.** Подібно до водних об'єктів, рослинність достатньо добре візуально дешифрувати на теплових космічних зображеннях. У вегетаційний період вона накопичує вологу, відбувається транспірація, що призводить до зменшення рослинністю своєї температури. Відповідно її теплове випромінювання у період активної вегетації понижене.

Особливості природних умов обумовлюють характер розподілу рослинного покриву заповідної території. Тому у весняний період (квітень) об'єкти “Рослинність” належать до 2-го та 3-го діапазонів, які відображають “помірно холодні” варіації теплового поля та нижчу фонову інтенсивність теплового випромінювання (рис. 4а).

У літній період переважно всі об'єкти характеризуються “помірно холодними” варіаціями теплового поля (3-ій діапазон) (рис. 4б).

Враховуючи, що як об'єкти “Рослинність” розглядаємо переважно лісові масиви, то необхідно враховувати ще одну їх особливість – формування особливого мікроклімату. Він у літній період забезпечує затемнення земної поверхні лісами, що призводить до зменшення інтенсивності теплового випромінювання, а у зимовий – перешкоджає активному вихолодженню земної поверхні. Тому лісові масиви характеризуються вищою фонову інтенсивністю теплового випромінювання, а окремі ділянки належать до об'єктів з “помірно теплими” варіаціями теплового поля (рис. 4в).

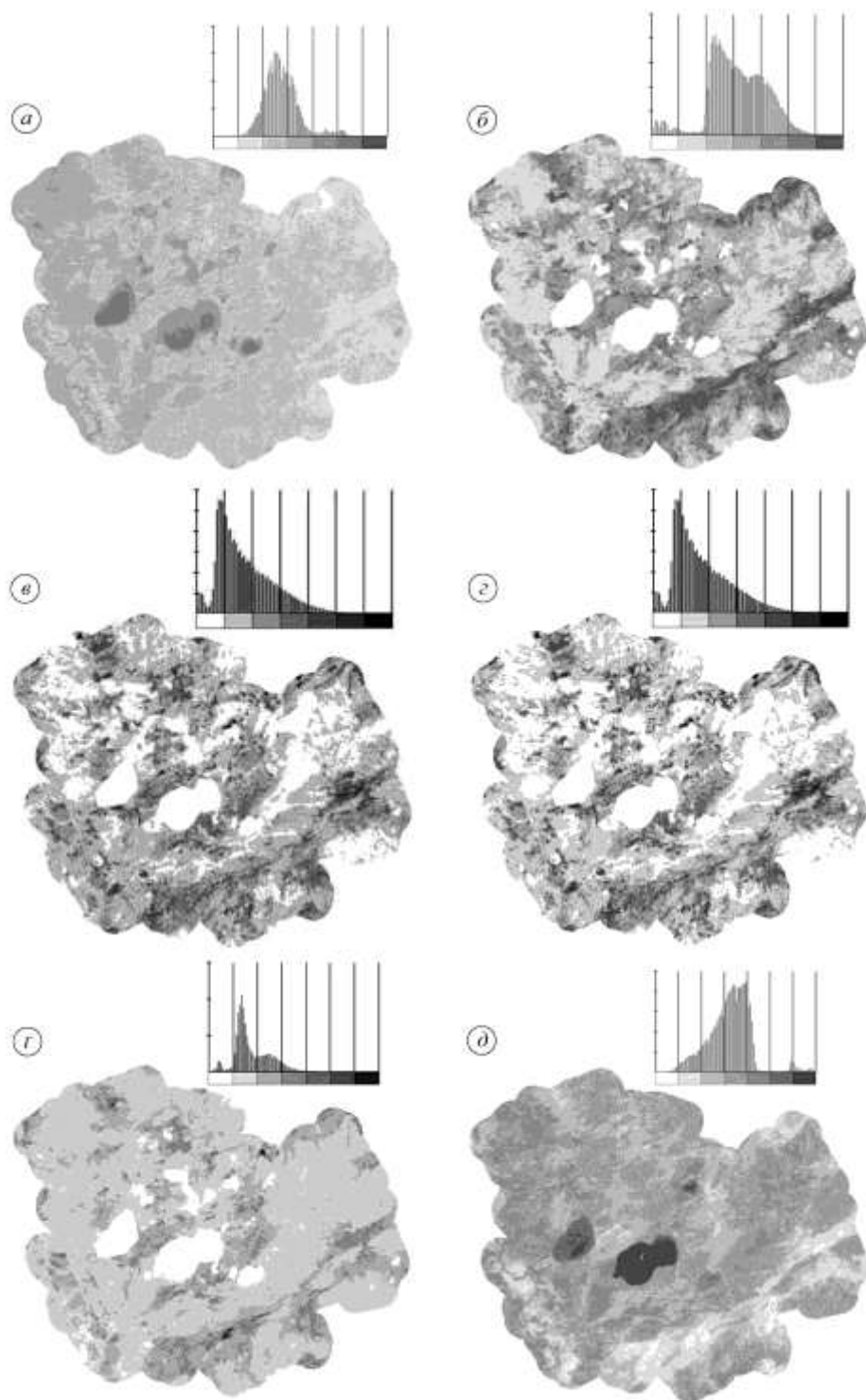


Рис. 3. Квантовані фрагменти зображень TIRS території БР “Шацький”: 8 січня 2017 р. (а); 09 квітня 2015 р. (б); 12 червня 2015 р. (в); 09 серпня 2013 р. (г); 10 жовтня 2018 р. (д); 07 грудня 2016 р. (е).



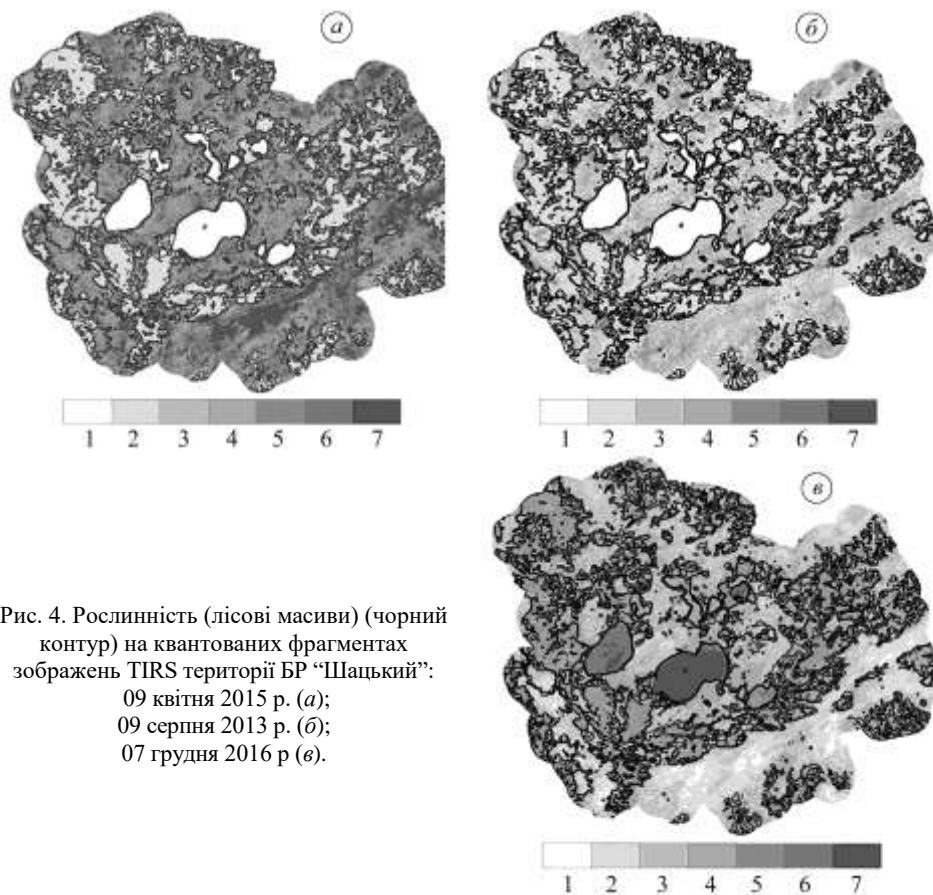


Рис. 4. Рослинисть (лісові масиви) (чорний контур) на квантованих фрагментах зображень TIRS території БР “Шацький”:  
09 квітня 2015 р. (а);  
09 серпня 2013 р. (б);  
07 грудня 2016 р (в).

*Відкриті ділянки (без лісу).* Відкриті ділянки на території біорезервату – це луки, орні землі, садиби тощо. Найкраще ці об’єкти дешифрують у весняний період, коли вони представлені відкритими ґрунтами, практично без рослинності, що призводить до підвищення інтенсивності теплового випромінювання (рис. 5).

Здебільшого об’єкти належать до 6-го діапазону і характеризується “помірно теплими” варіаціями теплового поля. “Найтепліші” варіації (7-ий діапазон) характерні для таких об’єктів, як сухі піщані ґрунти або відкритий пісок.

Впродовж літньо-осіннього періоду, ці об’єкти характеризуються фоновією інтенсивністю теплового випромінювання. Враховуючи просторову розрізність зображення (100 м) та специфіку території, варіації теплового поля відкритих ділянок протягом року схожі до варіацій теплового поля внутрішньої структури населених пунктів, що ускладнює їх дешифрування.

Таким чином, незалежно від пори року, на теплових зображеннях добре розрізняють три групи об’єктів: водні, лісові масиви та відкриті ділянки/населені пункти. Сезонна мінливість різних

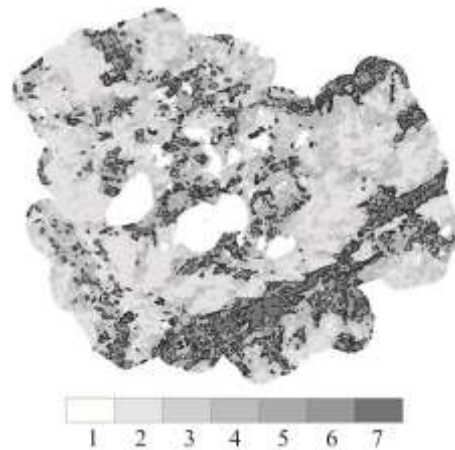


Рис. 5. Відкриті ділянки (без лісу) (білий контур) на квантованому фрагменті зображення TIRS території БР “Шацький” 09 квітня 2015 р.

природних об'єктів відображає закономірності пов'язані з їх властивостями (потужність рослинного покриву, щільність забудови тощо), тобто сезонна мінливість інтенсивності теплового випромінювання може бути дешифрувальною ознакою саме цих властивостей.

Крім того, варто відмітити, що теплове поле природних, урбанізованих (антропогенних) та природно-антропогенних територій характеризується суттєвою гетерогенністю внаслідок впливу різних чинників.

**Аналіз класифікованих різносезонних теплових зображень.** За результатами класифікації багатослового зображення з виділенням 3 класів на територію біорезервату встановили, що найбільші відмінності у часових образах є для таких класів: 1 клас – водні об'єкти та лісові масиви; 2 – населені пункти, сільськогосподарські угіддя; 3 – водно-болотні угіддя, луки та чагарники (рис. 6а).

Під час виділення 6-ти класів спостерігаємо диференціацію між листяними та хвойними масивами лісу: 2-ий та 3-ій класи (рис. 6б), за виділення 9-ти класів – чітку диференціацію між відкритими ділянками з різним рівнем зволоження (рис. 6в).

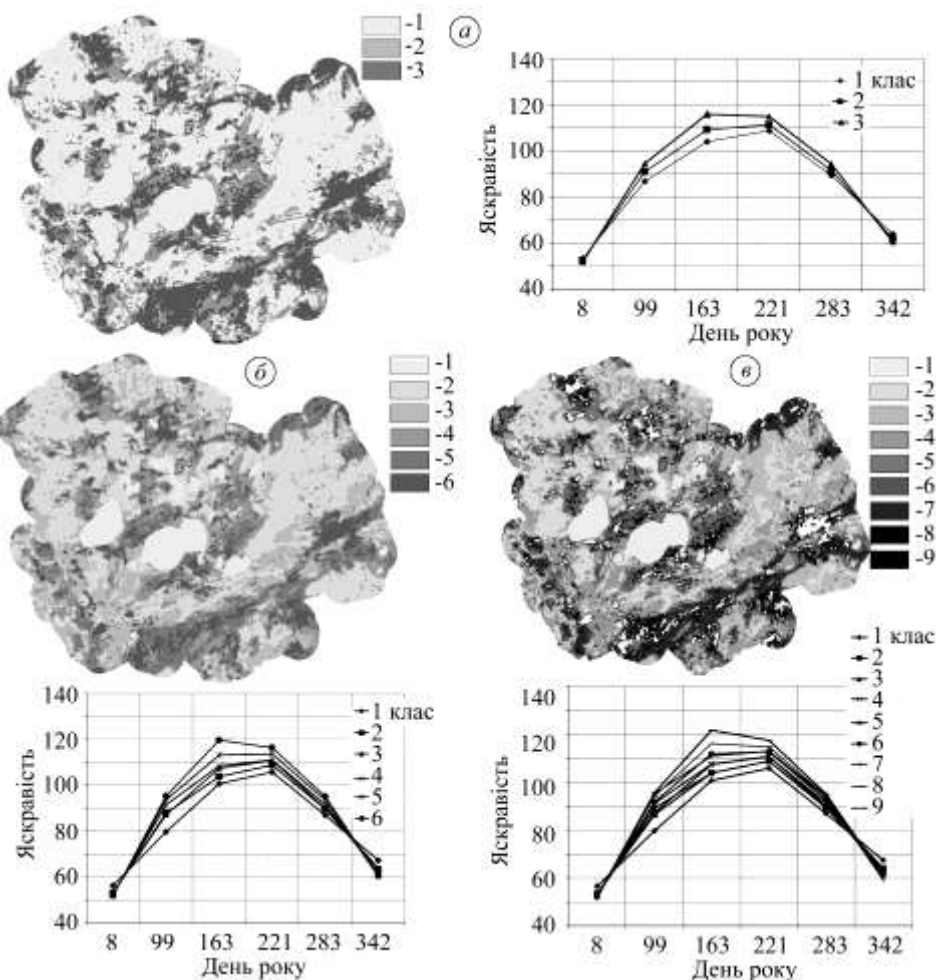


Рис. 6. Результати класифікації багатослового теплового зображення системи TIRS з виділенням 3-х (а), 6-ти (б), 9-ти (в) класів та їх часові образи.

Під час класифікації щільна забудова та відкриті сільськогосподарські ділянки (6 клас) характеризуються найбільшою інтенсивністю теплового випромінювання (рис. 6б). В межах населених пунктів спостерігаємо диференціацію між

щільною забудовою (6 клас), сільськогосподарськими угіддями (5 клас) та перезвоженими ділянками (4 клас).

Під час виділення 9-ти класів найбільшою інтенсивністю теплового випромінювання характеризуються відкриті ділянки, переважно сільськогосподарські угіддя, (8 та 9 класи) (рис. 6в). Вологіші ділянки (луки, пасовища, заплави) (7 клас) мають дещо нижчу інтенсивність теплового випромінювання.

### ВИСНОВКИ

Таким чином, за результатами аналізу зображень теплового дистанційного зондування можемо стверджувати, що теплове поле природних об'єктів характеризується значною сезонною просторово-часовою мінливістю. Встановлено, що сезонна динаміка інтенсивності теплового випромінювання різних природних об'єктів має характерні відмінності. Так, у зимовий період добре дешифрують водні об'єкти та лісові масиви. Навесні добре ідентифікують водні об'єкти та відкриті безлісі ділянки, для яких характерна найвища інтенсивність теплового випромінювання. Літні теплові зображення відрізняються найбільшою інформативністю: за ними дешифрують лісові масиви, водні об'єкти та ділянки відкритого ґрунту. Восени добре виділяються водні об'єкти (особливо в передзимовий час та на початку зими), лісові масиви і безлісі ділянки. Використання різних методів класифікації багаточасових різносезонних зображень, у тому числі і неконтрольованої, дає змогу досить добре визначити структуру теплового поля місцевості. Це підтверджується високим ступенем відповідності між класифікованими елементами теплової структури та природними об'єктами. Отриману інформацію щодо теплового випромінювання земної поверхні можна використати як для індикаційного дешифрування, так і для вивчення власного теплового випромінювання об'єктів, що є особливо актуальним під час опрацювання таких питань як глобальні та регіональні зміни клімату, зміни ландшафтного покриву тощо.

1. Polyakov, A. V.; Timofeyev, Yu. M.; Uspensky, A. B. Retrieving the Atmospheric Temperature/Humidity Profiles Using the High Spectral Resolution Data from IR Satellite Sensor IRFS-2. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, **2009**, 5, 3–10. [in Russian]
2. Sobrino, J.A.; Jimenez-Munoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from Landsat-5/TM, *Remote Sensing of Environment*, **2004**, 90, 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
3. Yang, J.S.; Wang, Y.Q.; August, P.V. Estimation of Land Surface Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity, *Journal of Environmental Informatics*, **2004**, 4(1), 37–44. <https://doi.org/10.3808/jei.200400035>
4. Tan, K.C.; Lim, H.S.; Mat Jafri, M.Z.; Abdullah, K. Land Surface Temperature Retrieval by Using ATCOR3\_T and Normalized Difference Vegetation Index Methods in Penang Island, *American Journal of Applied Sciences*, **2010**, 7(5), 717–723. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.717.723>
5. Voogt, J.A.; Oke, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, **2003**, 86, 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
6. Weng, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2009**, 64, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
7. Abushenko, N.A.; Altyntsev, D.A.; Mazurov, A.A.; Minko, N.P. The Estimation of Areas of Large Forest Fires Using AVHRR/NOAA, *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, **2000**, 2, 87–93. [in Russian]
8. Alokina, O.; Ivchenko, D.; Koshovy, V.; Rusyn, B. Landscape metrics for changes detection in land cover of the West Polesie Transboundary Biosphere Reserve, *Environmental problems*, **2017**, 2(4), 227–240.
9. Ahmad, A.; Sufahani, S. F. Analysis of Landsat 5 TM data of Malaysian land covers using ISODATA clustering technique, *2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Melaka, Malaysia, December 11–13, **2012**, 92–97. <https://doi.org/10.1109/APACE.2012.6457639>

Одержано 25.05.2020