

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2016.04.019>

УДК 504.055:(528.8.041.3:528.811)

С. А. Станкевич¹, В. В. Пилипчук², М. С. Лубський¹, Г. Б. Крилова¹

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Воєнно-дипломатична академія ім. Євгенія Березняка, Київ

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ШТУЧНИХ ТА ПРИРОДНИХ ЗЕМНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО КОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ

Розроблено модель та спеціалізоване програмне забезпечення розрахунку температури земної поверхні за даними дистанційного зондування у далекому інфрачервоному діапазоні. Модель враховує вплив атмосфери та характеристик поверхонь, зокрема коефіцієнта теплового випромінювання. Для оцінки точності моделі водночас із проходженням супутника над досліджуваною територією виконувалися наземні вимірювання температури із застосуванням портативного пірометра. Одержані карти температур дозволяють виявляти об'єкти, які здійснюють значне теплове навантаження на середовище, оцінювати поширення та динаміку таких ефектів, як «острови тепла» та розробляти стратегії зі зниження негативного впливу теплового забруднення урбанізованого середовища.

Ключові слова: космічні зображення, теплове поле, фізична температура, коефіцієнт теплового випромінювання, підсупутникові вимірювання.

ВСТУП

Тепловий моніторинг земної поверхні як одна із складових геоecологічного моніторингу є важливим джерелом інформації про рівень теплового навантаження на природне або урбанізоване середовище. На основі теплового моніторингу можливо оцінити динаміку змін у землекористуванні, ефективність озеленення міст, вплив на здоров'я населення тощо [5].

Важливість теплового моніторингу земної поверхні обумовлена значними площами об'єктів та поверхонь, здатних акумулювати енергію сонячного випромінювання та у процесі теплообміну із атмосферним повітрям здійснювати

значний вплив на мікроклімат. Серед найбільш поширених типів земних поверхонь із високою теплопоглинальною здатністю виділяються асфальтові покриття (дороги, міські майданчики, тротуари), цегляні, бетонні, оштукатурені стіни будівель, покрівельні покриття (руберойд, листовий метал, шифер), відкриті ґрунти та піски.

Дані поверхні впродовж сонячного дня активно накопичують тепло, яке впродовж ночі віддається навколишньому повітрю, постійно утримуючи його температуру вищою за температуру повітря за межами міста, тим самим впливаючи на формування міських «островів тепла» [15]. Окрім накопичувачів сонячного тепла, є велика кількість техногенних об'єктів, які генерують тепло під час своєї активності: автомобілі, незадовільно ізольовані тепломережі, енергетичні комплекси, промислові виробництва та ін.

© С. А. СТАНКЕВИЧ, В. В. ПИЛИПЧУК, М. С. ЛУБСЬКИЙ,
Г. Б. КРИЛОВА, 2016

Сукупність названих факторів вимагає активного накопичення та обробки геопросторових даних, які дозволять отримувати оперативні зображення теплового поля земної поверхні.

На даний час основним джерелом даних про теплові поля земної поверхні виступають супутникові зображення, одержувані у далекому інфрачервоному діапазоні електромагнітного випромінювання 8–13 мкм. Зараз доступні інфрачервоні зображення супутникових систем серії «Ландсат-5, -7, -8», які безкоштовно поширюються через веб-ресурси Геологічної служби Сполучених Штатів Америки (USGS). Інфрачервоні зображення сенсорів TM та ETM+ супутників «Ландсат-5» та «Ландсат-7» мають просторову розрізненність 60 м, а дводіапазонні зображення сенсора TIRS супутника «Ландсат-8» — просторову розрізненність 100 м. Усі зазначені зображення інтерпольовано до дискретизації 30 м, що забезпечує можливість їхнього попіксельного суміщення із зображеннями інших спектральних діапазонів цих супутникових систем. На сьогоднішній день активним є лише «Ландсат-8».

Періодичність знімання однієї території складає 16 діб, а для деяких територій в залежності від площ перекриття зображень сусідніх орбіт проходження супутника — 8 діб.

Матеріали знімання супутникових систем серії «Ландсат» постачаються у вигляді набору окремих зображень формату GeoTIFF та мета-

даних до них. Зображення попередньо радіометрично відкалібровано та геореференційовано.

Інформативним продуктом обробки даних знімання в далекому інфрачервоному діапазоні є піксельні карти температури земної поверхні. Для отримання цього продукту необхідно виконати спеціальну обробку інфрачервоних зображень, яка включає перерахунок цифрових значень пікселів зображення на спектральну щільність енергетичної яскравості на сенсорі, застосування моделей радіаційного переносу для усунення впливу на випромінювання атмосфери, розрахунок та застосування додаткових величин, необхідних для розрахунку температури за значеннями спектральної щільності енергетичної яскравості — коефіцієнтів теплового випромінювання, апаратних констант тощо, розрахунок значення фізичної температури поверхні за оберненою формулою Планка [9].

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ДАНИМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЗНІМАННЯ

Дані інфрачервоного знімання супутникових систем «Ландсат» подаються у піксельних цілочисельних значеннях D градуйованої спектральної щільності енергетичної яскравості кожного пікселя з кодуванням 8 біт для сенсорів TM та ETM+ або 16 біт для сенсорів OLI та TIRS. Для розрахунку температури застосовуються зображення далекого інфрачервоного діапазону. Для сенсорів TM та ETM+ це діапазон № 6, для сенсора TIRS — діапазони № 10 та 11.

Отже, першим етапом обробки даних інфрачервоного знімання є перерахунок піксельних значень на величини спектральної щільності енергетичної яскравості на апертурі сенсора L за лінійною залежністю

$$L = \alpha D + \beta, \quad (1)$$

де α і β — калібрувальні коефіцієнти (константи) підсилення та зміщення. Калібрувальні константи відомі (див. табл. 1 [8]).

Головною перешкодою для застосування отриманих фізичних величин є вплив на інфрачервоне випромінювання атмосфери Землі. Зважені складові частини атмосферного повітря, зважені час-

Таблиця 1. Робочі спектральні діапазони та калібрувальні константи інфрачервоних сенсорів супутникових систем серії «Ландсат»

Інфрачервоний сенсор	Робочий спектральний діапазон, мкм	Підсилення, Вт/(м ² ·мкм·ср)/DN	Зміщення (bias), Вт/(м ² ·мкм·ср)
TM	6 (10.4–12.5)	0.055	1.18243
ETM+	6-1 (10.4–12.5)	0.067	-0.06709
	6-2 (10.4–12.5)	0.037	3.1628
TIRS	10 (10.6–11.19)	0.0003342	0.1
	11 (11.5–12.51)	0.0003342	0.1

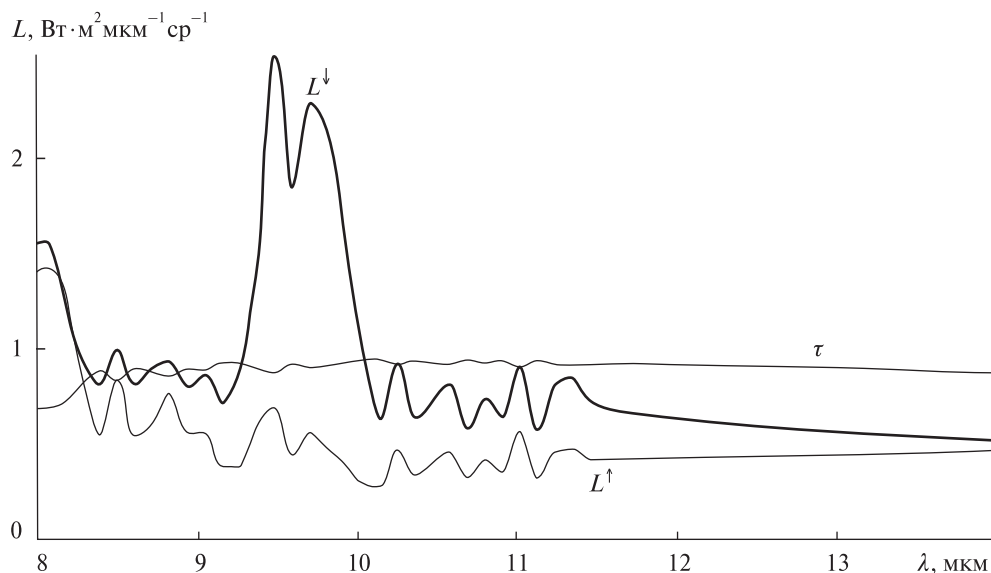


Рис. 1. Спектральний розподіл атмосферних параметрів L^\uparrow , L^\downarrow та τ

тинки, пил, волога, газові домішки здійснюють відбиття, поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання. Тому для далекого інфрачервоного діапазону створено велику кількість моделей радіаційного переносу випромінювання, які усувають вплив атмосфери на отримані дані. В цьому дослідженні використовується модель радіаційного переносу у вигляді

$$L_0 = \frac{L - L^\uparrow}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L^\downarrow, \quad (2)$$

де L_0 — спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні, L^\uparrow — спектральна щільність енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора, L^\downarrow — спектральна щільність енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі, τ — спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери, ε — спектральний коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні [10].

Результати експериментального визначення спектральних параметрів атмосфери L^\uparrow , L^\downarrow та τ представлено на рис. 1 [17].

Дана модель є узагальноною і не враховує конкретні умови, при яких виконується знімання (географічне положення території, температура повітря, вологість, атмосферний тиск). Для

отримання точніших атмосферних параметрів, що враховують вищезгадані характеристики атмосфери, фахівцями NASA розроблено спеціалізований калькулятор для атмосферної корекції інфрачервоних зображень супутникових систем серії «Ландсат» [7].

Попіксельний розрахунок температури земної поверхні T за інфрачервоним зображенням виконується через спектральну щільність енергетичної яскравості за оберненою формулою Планка:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 L_0} + 1 \right)}, \quad (3)$$

де $c_1 = 2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² та $c_2 = hc/k = 1.439 \cdot 10^{-2}$ м·К — постійні закону Планка, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постійна Планка, $c = 2.998 \cdot 10^8$ м/с — швидкість світла у вакуумі, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постійна Больцмана, λ — довжина хвилі електромагнітного випромінювання [1].

Рівняння (3) містить в собі дві залежні між собою змінні — T і ε , які роблять неможливим виведення однієї змінної через іншу, тобто визначення температури через рівняння радіаційного переносу у загальному випадку є некоректною задачею.

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ «ЛАНДСАТ»

Прецизійне визначення коефіцієнтів теплового випромінювання усіх поверхонь досліджуваної території є пріоритетною задачею при визначенні температури за даними інфрачервоного знімання, оскільки малі відхилення його значення від реального можуть привести до значних похибок розрахунку.

Є два підходи до визначення коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні. У першому використовуються табличні значення коефіцієнтів, які надаються спеціальними довідниками [14] та спектральними бібліотеками. Другий спосіб — безпосереднє визначення коефіцієнта теплового випромінювання досліджуваної поверхні за допомогою пірометричних або тепловізійних засобів у сукупності із контактним визначенням температури поверхні шляхом підбору його значення, при якому температури прямого і дистанційного вимірювання будуть рівні. Спільне застосування обох методів дозволяє отримати точніші результати, оскільки табличні значення не враховують особливості конкретних поверхонь (склад, стан, забрудненість) і часто потребують уточнень.

Цей підхід застосовується у випадку вимірювання температури штучних поверхонь та відкритих ґрунтів. Окремої уваги потребують земна поверхня, вкрита рослинністю. Рослинність має порівняно високий коефіцієнт теплового випромінювання, який залежить від відношення проективної площі рослинності до повної площі відкритого ґрунту F , яку можна оцінити через поточне значення нормалізованого вегетаційно-

го індексу $NDVI$ [12]:

$$F \approx \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_1 - NDVI_0} \right)^2, \quad (4)$$

де $NDVI_0$ — максимальне значення нормалізованого вегетаційного індексу відкритого ґрунту (або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність); $NDVI_1$ — мінімальне значення нормалізованого вегетаційного індексу поверхні, повністю покритою рослинністю.

Далі проводиться розрахунок сумарного коефіцієнта теплового відбиття для змішаних поверхонь:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 F + \varepsilon_0 (1 - F) + \Delta\varepsilon, \quad (5)$$

де ε_0 та ε_1 — бібліотечні спектральні коефіцієнти теплового випромінювання відкритого ґрунту та рослинності відповідно; $\Delta\varepsilon$ — коефіцієнт, що враховує нерівномірність відображення шорсткою поверхні (стандартне значення для шорсткої поверхні в далекому інфрачервоному діапазоні $\Delta\varepsilon \approx 0.005$).

Для визначення коефіцієнтів теплового випромінювання окремо для штучних поверхонь та поверхонь, зайнятих рослинністю, виконується попередня класифікація зображення досліджуваної території за спектральними ознаками окремих її складових. Сукупність значень коефіцієнтів теплового випромінювання, яка отримується сумою коефіцієнтів для кожного окремого типу поверхонь, комплексується в окреме зображення коефіцієнтів теплового випромінювання, далі застосовується для розрахунку температури.

Також відомий спрощений алгоритм визначення коефіцієнта теплового випромінювання, заснований на регресійній залежності від вегетаційного індексу $NDVI$ [16]:

$$\varepsilon \approx 1.0098 + 0.047 \ln NDVI \quad (6)$$

для діапазону значень $NDVI$ від 0.157 до 0.727. Решта області значень $NDVI$ заміщується бібліотечними коефіцієнтами теплового випромінювання відповідних поверхонь.

Розрахунок температури земної поверхні через спектральну щільність енергетичної яскравості виконується через формулу (3), адаптовану

Таблиця 2. Апаратні константи супутникових систем серії «Ландсат»

Супутникова система	K_1	K_2
«Ландсат-ТМ» (band 6)	607.76	1260.56
«Ландсат-ЕТМ+» (band 6)	666.09	1282.71
«Ландсат-TIRS» (band 10)	774.89	1321.08
«Ландсат-TIRS» (band 11)	480.89	1201.14

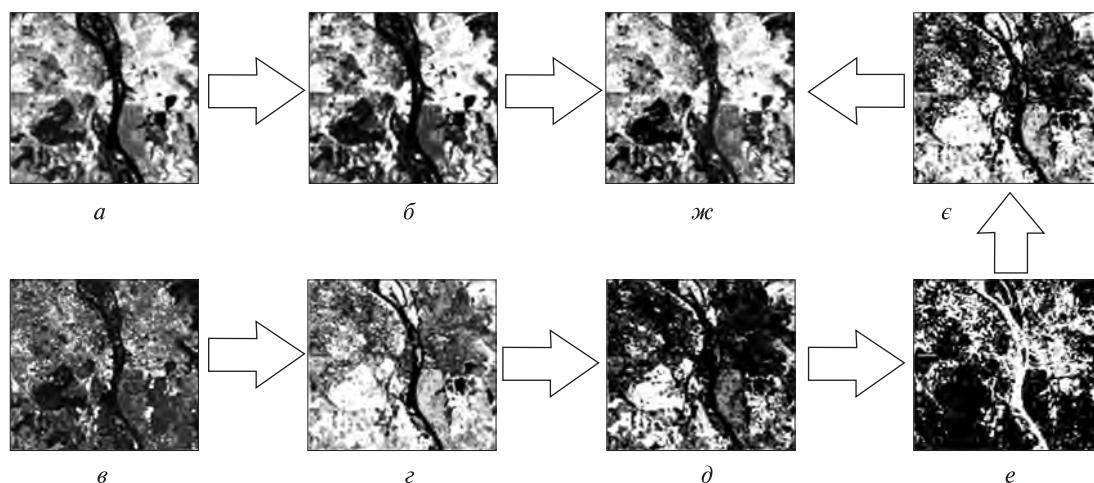


Рис. 2. Етапи отримання температурного поля земної поверхні: *а* — супутникове зображення далекого інфрачервоного діапазону, *б* — відкаліброване та атмосферно скориговане інфрачервоне зображення, *в* — багатоспектральне супутникове зображення видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів, *г* — просторовий розподіл вегетаційного індексу *NDVI*, *д* — просторовий розподіл відносного проективного покриття рослинності, *е* — маска території без рослинності, *є* — просторовий розподіл коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні, *ж* — прикінцеве температурне поле земної поверхні

до конкретної інфрачервоної знімальної апаратури:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_0} + 1\right)}, \quad (7)$$

де K_1, K_2 — апаратні константи конкретного сенсора. Для інфрачервоної знімальної апаратури супутникових систем серії «Ландсат» ці константи наведено у табл. 2.

В результаті застосування (2), (4), (5) та (7) до супутникового інфрачервоного зображення отримується растр досліджуваної території зі значеннями температури земної поверхні та коефіцієнта теплового випромінювання в кожному пікселі. Порядок розрахунків температурного поля земної поверхні за даними космічного знімання супутникової системи «Ландсат-8» пояснюється діаграмою рис. 2 [2]. Реалізація розрахунку температур земної поверхні за результатами інфрачервоного космічного знімання включає радіометричне калібрування інфрачервоного зображення, залучення моделі атмосфери до рівнянь радіаційного переносу та оцінку коефіцієнтів теплового випромінювання природних і штучних поверхонь досліджуваної території.

Багатоспектральне супутникове зображення залучається для отримання вегетаційного індексу *NDVI*, на основі якого відокремлюються для подальшої обробки поверхні, вкриті рослинністю, та без неї. На основі *NDVI* розраховується відносне проективне покриття рослинності (4), за ним — коефіцієнти теплового випромінювання вегетуючих поверхонь (5), а коефіцієнти теплового випромінювання поверхонь без рослинності одержуються зі спектральної бібліотеки, сформованої за даними пірометричних вимірювань. Значення фізичної температури в кожному пікселі зображення відновлюються за оберненою формулою Планка (7).

СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ TEMПЕРАТУРИ І КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА МАТЕРІАЛАМИ КОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ

Для отримання растру температур і коефіцієнтів теплового випромінювання розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, представлене розрахунковим модулем для програмного продукту обробки та візуалізації даних дистанційного зондування Exelis ENVI.

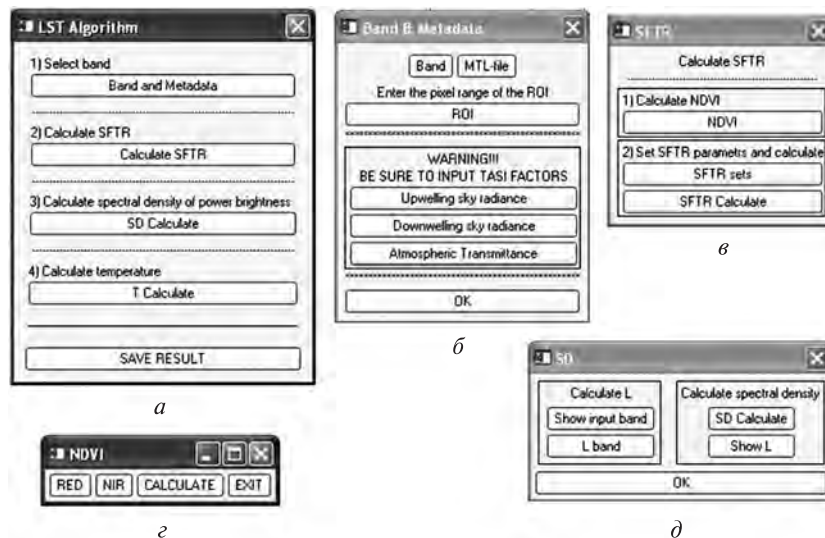


Рис. 3. Елементи інтерфейсу програмного модуля «Temperature_GUI»: *a* — робоче вікно з вибором вхідних параметрів; *б* — вікно введення параметрів атмосфери та робочої області; *в* — вікно обчислення частки проективного покриття рослинності; *г* — вікно введення параметрів розрахунку індексу *NDVI*; *д* — вікно розрахунку атмосферно-скоригованих значень спектральної щільності енергетичної яскравості

Програмний модуль «Temperature_GUI» призначений для визначення температури земної поверхні за супутниковими зображеннями системи «Ландсат-8». Модуль розроблено у програмному середовищі IDL та інтегровано до програмного пакету ENVI.

В основі роботи програмного модуля «Temperature_GUI» є визначення температури земної поверхні за вищевикладеними моделями. Для роботи модуля необхідне залучення додаткових даних про коефіцієнти теплового випромінювання різних типів земної поверхні, кутів проведення зйомки, величин спектральної щільності енергетичної яскравості спадного та висхідного випромінювання в атмосфері.

Структурно програмний модуль «Temperature_GUI» складається з блоків вибору зображення для оброблення та зчитування вхідних даних, обчислення спектрального коефіцієнта теплового випромінювання, обчислення атмосферно-скоригованої спектральної щільності енергетичної яскравості, обчислення термодинамічної температури земної поверхні. Кожен із зазначених блоків реалізує окремий етап алгоритму розрахунку температури.

Основні елементи графічного інтерфейсу модуля показано на рис. 3.

ПРОВЕДЕННЯ ПІДСУПУТНИКОВИХ ЗАВІРКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Оскільки врахувати всі чинники, що впливають на точність вимірювань температури земної поверхні досліджуваної території за інфрачервоними космічними зображеннями, практично неможливо, для оцінки точності паралельно із розрахунками виконуються підсупутникові наземні вимірювання температури поверхонь на тестових ділянках за допомогою портативного польового пірометра. Цей інструмент дозволяють визначати як яскравісну температуру дистанційно за допомогою вбудованого мікроболометричного сенсора інфрачервоного випромінювання, так і безпосередньо термодинамічну температуру контактно за допомогою термометричної пари. В такий спосіб можливо отримати значення коефіцієнта теплового випромінювання вимірюваної поверхні.

Для підсупутникових завіркових вимірювань сформовано ряд вимог, яких необхідно дотримуватись для підвищення достовірності [11]:

- вимірювання виконуються в день супутникового знімання в межах 2 год до і після часу прольоту;

- вимірюються температури однорідних поверхонь, площа яких покриває більше ніж 10 пкл супутникового зображення для зниження впливу на результат суміжних пікселів;

- вимірювання виконуються не менше ніж п'ять разів в різних точках досліджуваної поверхні, відстань між якими більше ніж 5 м як дистанційним, так і контактним способом;

- під час вимірювань виключається суміщення різних типів покриття та вимірювання затієних площ;

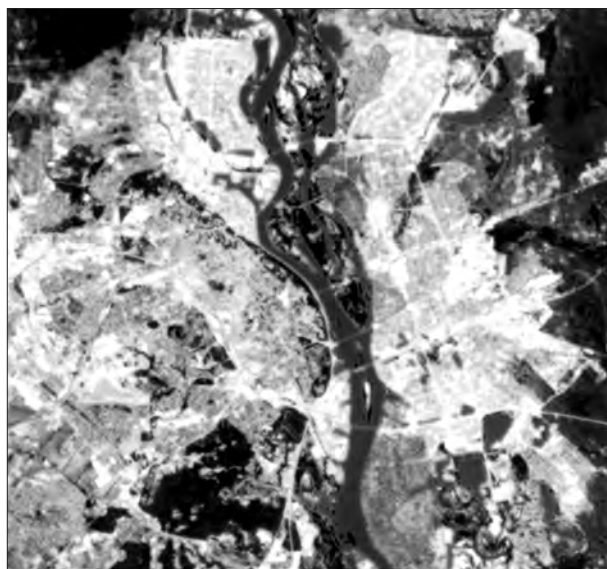
- паралельно із вимірюванням температур поверхонь також визначаються додаткові дані — погодні умови за допомогою портативної метеостанції, рівень освітленості території (у люксах) за допомогою портативного люксметра.

Обов'язковою умовою виконання вимірювань є мінімальна хмарність або її відсутність, оскільки хмарність негативно впливає не лише на достовірність наземних вимірювань, а і перешкоджає отриманню точних значень спектральної щільності енергетичної яскравості за допомогою супутникових даних.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

Результати обробки супутникових зображень «Ландсат-8» території м. Києва впродовж літа 2015 року завірялися на 16 тестових ділянках з різними штучними та природними поверхнями у трьох районах міста шляхом проведення підсупутникових наземних термометричних вимірювань (рис. 4). За допомогою польового пірометра визначалися термодінамічна (контактним способом) і радіаційна (дистанційним) температури, за ними розраховувалися відповідні коефіцієнти теплового випромінювання [6].

Середня похибка температури, одержаної за результатами обробки інфрачервоних космічних знімків, відносно контактних вимірювань на тестових ділянках склала $-0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, при цьому максимальне абсолютне відхилення дорівнює $3.65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Високі значення похибки можуть бути обумовлені негомogeneousстю покриття тестових



Температура, $^{\circ}\text{C}$

15 30 45

Рис. 4. Температурне поле м. Києва за результатами обробки даних супутникової системи «Ландсат-8» від 25 червня 2015 р.

ділянок, складністю текстури та змішуванням рослинного покриття із ґрунтовим.

Практика температурного картування території свідчить, що основні похибки виникають внаслідок неточного визначення коефіцієнтів теплового випромінювання природних і штучних поверхонь. Взаємозв'язок відносних невизначеностей оцінок температури та коефіцієнта теплового випромінювання описується співвідношенням [13]

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\lambda T}{c_2} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}. \quad (8)$$

Середнє відхилення супутникових значень коефіцієнта теплового випромінювання від пірометрично вимірюваних складає 0.011, що згідно з (8) відповідає температурній похибці $-0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальне абсолютне відхилення 0.034, що відповідає температурній похибці $2.63\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, зараз за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення впроваджено автоматизацію достатньо складних науково обґрунтованих розрахунків важливих

фізичних параметрів земної поверхні — термодинамічної температури та коефіцієнта теплового випромінювання — за матеріалами інфрачервоного космічного знімання із забезпечуваною точністю, цілком придатною для вирішення багатьох тематичних задач дистанційного зондування Землі.

Підвищення точності наземних вимірювань можна досягти шляхом застосування більш досконалого обладнання, наприклад прецизійного польового тепловізора, виконання вимірювань із мінімальним впливом сторонніх небажаних факторів, таких як вітер, хмарність, підвищена вологість та вибором максимально гомогенних полігонів зі значною площею. Точність вимірювання температури земної поверхні за результатами інфрачервоного космічного знімання можливо підвищити шляхом залучення точніших моделей радіаційного переносу, максимально достовірного визначення атмосферних параметрів, калібрувальних коефіцієнтів та апаратних констант інфрачервоної знімальної апаратури.

Подальші дослідження варто спрямувати на забезпечення кращих просторових характеристик полів фізичних параметрів, що картуються за результатами інфрачервоного космічного знімання, перш за все — просторової розрізненності. Для цього доцільно залучати додаткові матеріали супутникового знімання більш високої розрізненності, при цьому не обов'язково далекого інфрачервоного діапазону [4], а також різночасові матеріали інфрачервоного знімання однієї і теж самої території.

Для підвищення точності вимірювання температури поверхонь в подальшому доцільно застосовувати калібровані вимірювачі у тепловому інфрачервоному діапазоні на основі абсолютно чорного тіла [3].

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.
2. Лубський М. С., Крилова Г. Б. Методика розрахунку приповерхневої температури за даними знімання у дальньому інфрачервоному діапазоні // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції "Теоретичні та прикладні аспекти використання тематичних методів та інформаційних технологій у

науці, освіті, економіці та у виробництві". — Маріуполь: МДУ, 2015. — С. 82—85.

3. Луцук Я. Т., Гук О. П., Лях О. І. та ін. Вимірювання температурні: теорія і практика. — Львів: Вид-во «Бескид Біт», 2006. — 560 с.
4. Пат. 84877, Україна. Спосіб підвищення просторової розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об'єктів / М. О. Попов, С. А. Станкевич. — Опубл. 10.12.2008.
5. Станкевич С. А., Пестова І. О., Година О. О. та ін. Дистанційна оцінка якісного стану рослинності на міських територіях на прикладі НПП «Голосіївський» // Наук. доповіді НУБіП України. — 2015. — № 2 (51). — 12 с. — http://nd.nubip.edu.ua/2015_2/5.pdf
6. Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубський Н. С. и др. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки // Укр. журн. дистанційного зондування Землі. — 2015. — № 7. — С. 14—23.
7. Barsi J. A., Barker J. L., Schott J. R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-sensing instrument // Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS'03). — Toulouse: IEEE, 2003. — P. 3014—3016.
8. Chander G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for «Ландсат» MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. — 2009. — 113, N 5. — P.893—903.
9. Dubuisson P., Giraud V., Chomette O., et al. Fast radiative transfer modeling for infrared imaging radiometry // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2005. — 95, N 2. — P. 201—220.
10. Ibarra-Castaneda C., González D., Klein M., et al. Infrared image processing and data analysis // Infrared Phys. and Technol. — 2004. — 46, N 1-2. — P. 75—83.
11. Krylova H. B., Lubskiy N. S. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example // Proceeding of 3rd International Conference on GIS and Remote Sensing. — Tsaghkadzor: Environmental Research and GIS Center, 2014. — P. 149—156.
12. Perez Hoyos I. C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity // Int. J. Recent Development in Engineering and Technol. — 2014. — 2, N 2. — P. 26—30.
13. Radiometric Temperature Measurements Fundamentals / Eds Z. M. Zhang, B. K. Tsai, G. Machin. — Amsterdam: Academic Press, 2010. — 356 p.
14. Snyder W. C., Wan Z., Zhang Y., et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from

- space // *Int. J. Remote Sensing*. — 1998. — **19**, N 14. — P. 2753—2774.
15. Stankevich S. A., Filippovich V. E. Infrared satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine // *Proceedings of 8th International Green Energy Conference (IGEC-8)*. — Kiev: NAU, 2013. — P. 219—223.
 16. Van de Griend A. A., Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces // *Int. J. Remote Sensing*. — 1993. — **14**, N 6. — P. 1119—1131.
 17. Yang H., Zhang L. F., Zhang X., et al. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data // *J. Remote Sensing*. — 2011. — **15**, N 6. — P. 1242—1254.
- Стаття надійшла до редакції 21.03.16
- #### REFERENCES
1. Kriksunov L. Z. Handbook on the Foundations of Infrared Equipment, 400 p. (Sov. Radio, Moscow, 1978) [in Russian].
 2. Lubsky M. S., Krylova G. B. The method of calculating the surface temperature data output of the far infrared. *Materials of II All-Ukrainian scientific-practical conference "Theoretical and applied aspects of mathematical methods and information technologies in science, education, economics and production"*, 82—85 (MSU, Mariupol, 2015) [in Ukrainian].
 3. Lutsyk Ya. T., Guk O. P., Lakh O. I., Stadnyk B. I. Temperature measurements: theory and practice, 560 p. (Publishing House «Beskyd Bit», Lviv, 2006) [in Ukrainian].
 4. Popov M. O., Stankevych S. A. Method for increase of spatial resolution of multi-spectral aero-space images on basis of classification of spectral signatures of objects. *Pat. 84877 Ukraine*, MPK G06K 9/00, No. a200602244; Zazjavl. 01.03.2006; published 10.12.2008, Bull. No. 23 [in Ukrainian].
 5. Stankevich S., Piestova I., Godyna O., Filozof R. Vegetation quality remote assessment in urban area: Golosiivsky NNP case study. *Nauk. dopovidi NUBiP Ukrainy*, No. 2 (51), 12 p. (2015) [in Ukrainian]. http://nd.nubip.edu.ua/2015_2/5.pdf
 6. Stankevich S. A., Filippovich V. E., Lubsky N. S., et al. Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging. *Ukr. zhurn. dystancijnogo zonduvannja Zemli*, No. 7, 14—23 (2015) [in Russian].
 7. Barsi J. A., Barker J. L., Schott J. R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-sensing instrument. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS'03)*, 3014—3016 (IEEE, Toulouse, 2003).
 8. Chander G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, **113** (5), 893—903 (2009).
 9. Dubuisson P., Giraud V., Chomette O., et al. Fast radiative transfer modeling for infrared imaging radiometry. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, **95** (2), 201—220 (2005).
 10. Ibarra-Castanedo C., González D., Klein M., et al. Infrared image processing and data analysis. *Infrared Phys. and Technol.*, 46 (1-2), 75—83 (2004).
 11. Krylova H. B., Lubskiy N. S. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example. *Proceeding of 3rd International Conference on GIS and Remote Sensing*, 149—156 (Environmental Research and GIS Center, Tsaghkadzor, 2014).
 12. Perez Hoyos I.C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity. *Int. J. Recent Development in Engineering and Technol.*, **2** (2), 26—30 (2014).
 13. Zhang Z. M., Tsai B. K., Machin G. (Eds) *Radiometric Temperature Measurements Fundamentals*, 356 p. (Academic Press, Amsterdam, 2010).
 14. Snyder W. C., Wan Z., Zhang Y., et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *Int. J. Remote Sensing*, **19** (14), 2753—2774 (1998).
 15. Stankevich S. A., Filippovich V. E. Infrared satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine. *Proceedings of 8th International Green Energy Conference (IGEC-8)*, 219—223 (NAU, Kiev, 2013).
 16. Van de Griend A. A., Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, **14** (6), 1119—1131 (1993).
 17. Yang H., Zhang L.F., Zhang X., et al. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data. *J. Remote Sensing*, **15** (6), 1242—1254 (2011).

С. А. Станкевич¹, В. В. Пилипчук²,
М. С. Лубський¹, А. Б. Крылова¹

¹ Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук Национальной академии наук Украины», Киев

² Военно-дипломатическая академия им. Евгения Березняка, Киев

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСКУССТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ЗЕМНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНФРАКРАСНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

Разработана модель и специализированное программное обеспечение расчёта температуры земной поверхности по данным дистанционного зондирования в дальнем инфракрасном диапазоне. Модель учитывает влияние атмосферы и характеристик поверхностей, в частности коэффициента теплового излучения. Для оценки точности модели одновременно с прохождением спутника над исследуемой территорией выполнялись наземные измерения температуры с применением портативного пирометра. Получаемые карты температур позволяют обнаруживать объекты, которые оказывают значительную тепловую нагрузку на окружающую среду, оценивать распространение и динамику таких эффектов, как «острова тепла» и разрабатывать стратегии по снижению негативного воздействия теплового загрязнения урбанизированной среды.

Ключевые слова: космические изображения, тепловое поле, физическая температура, коэффициент теплового излучения, подспутниковые измерения.

S. A. Stankevich¹, V. V. Pylypchuk²,
M. S. Lubskiy¹, H. B. Krylova¹

¹ State institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv

² Yevheniy Berezhnyak Military-diplomatic Academy

ACCURACY ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE OF ARTIFICIAL AND NATURAL EARTH'S SURFACES DETERMINING BY INFRARED SATELLITE IMAGERY

The model and the special application software for evaluation of land surface temperature by remote sensing in a thermal infrared band are developed. The model takes into account the atmosphere effect and land surface thermal emissivity. For the evaluation of the model's accuracy, the ground temperature measurements using portable pyrometer were conducted simultaneously with the satellite imaging of the studied area. The obtained temperature maps help to detect objects that deliver considerable heat load on the environment, to estimate the distribution and dynamics of special effects such as "heat islands" and to develop a strategy on mitigation the negative effects of urban environment heat pollution.

Key words: satellite imagery, thermal field, physical temperature, emissivity, ground truth measurements.