

ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУР ШТУЧНИХ ТА ПРИРОДНИХ ЗЕМНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ У ТЕПЛОВОМУ ДІАПАЗОНІ

С. А. Станкевич¹, В. Є. Філіпович¹, С. В. Шкляр¹, Г. Б. Крилова¹, М. С. Лубський¹

¹Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України

Анотація

Представлена методика розрахунку температур поверхні Землі за даними дистанційного зондування теплового діапазону та розрахунок коефіцієнтів теплового випромінювання різних типів поверхонь. Метою роботи є отримання карт температур земної поверхні для об'єктів урбанізованих територій та побудова часових рядів на їх основі. Також представлена технологія підвищення просторової розрізненості за кількома вихідними субпіксельно зміщеними одне відносно одного зображеннями з метою підвищення інформативності кінцевих продуктів обробки.

Ключові слова: тепловий моніторинг, космічні зображення, фізична температура, коефіцієнт теплового випромінювання, часові ряди

Вступ

Знімання в дальньому інфрачервоному діапазоні є зручним та оперативним інструментом при вирішенні задач охорони навколишнього середовища, аграрного сектору, пошуку корисних копалин тощо [1]. Однією з актуальних задач є моніторинг теплових полів урбанізованої території, як житлової забудови так і промислових районів.

Системи дистанційного зондування земля, які встановлені на супутниках серії Landsat забезпечують виконання довготривалий моніторинг об'єктів земної поверхні у дальньому інфрачервоному діапазоні, що дозволяє виконувати теплове картування, в тому числі і для урбанізованих територій. На основі карт температури земної поверхні виконується аналіз її просторово-часових змін [2]. Матеріали теплової супутникової зйомки, на жаль, мають досить низьку просторову розрізненість (для сенсору *TIRS*, що встановлений на *Landsat 8* – це 100 м). Тому під час побудови теплових карт земної поверхні для територій міських агломерацій постає питання підвищення просторової розрізненості знімків. Така можливість з'явилась із виходом на орбіту супутника *Landsat 8*, у якого є два канали у дальньому інфрачервоному діапазоні (10.3 ÷ 11.3 мкм та 11.3 ÷ 12.3 мкм).

Постійне розширення урбанізованих територій вимагає виконання теплового моніторингу для контролю та прогнозування стану цих територій та уникнення формування шкідливих для здоров'я людей та екологічного стану прилеглих територій умов.

Таким чином, прицелене відновлення температур поверхонь та об'єктів урбанізованих територій є найбільш прийнятним інструментом для цієї задачі.

1. Технологія обробки даних знімання у тепловому діапазоні отриманих супутниками серії Landsat

Вихідні дані супутникового знімання представляють собою матриці безрозмірних цілочисельних некаліброваних чисел, які представляють собою градуїровані значення яскравості поверхні (*DN*) у відповідному каналі даних. Кількість градацій яскравості визначаються радіометричною розрізненістю сенсорної системи: для сенсорів *TM* та *ETM+* супутників *Landsat 4*, *5* та *7* вона складає 8 біт (256 градацій), для сенсора *TIRS* (*Landsat 8*) – 16 біт (65536 градацій). Дані значення перераховуються у показник енергетичної яскравості, вираженої наступною залежністю:

$$L(\lambda) = DN \cdot GAIN + BIAS, \quad (1)$$

де $L(\lambda)$ – значення спектральної щільності енергетичної яскравості поверхні у спектральному діапазоні λ , *GAIN* – калібрувальне значення підсилення, *BIAS* – показник зміщення. Калібрувальні константи відображені у файлі метаданих до досліджуваного зображення.

Головною метою обробки супутникових даних дистанційного зондування у тепловому діапазоні – отримання зображень температур об'єктів за поверхонь Землі. Визначення температури за даними дистанційного знімання виконується за значенням спектральної щільності енергетичної яскравості поверхні у тепловому діапазоні електромагнітного спектру (3 ÷ 14 мкм). Для цього застосовується обернена формула Планка:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{c_1}{\lambda^5 L(\lambda)} + 1 \right)} \quad (2)$$

де $c_1 = 2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} \text{Вт} \cdot \text{м}^2$ та $c_2 = hc/k = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{м} \cdot \text{К}$ – перша і друга постійні закону Планка, $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}$ – постійна Планка, $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{м/с}$ – швидкість світла у вакуумі, $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{Дж/К}$ – постійна Больцмана, ε – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні [3]. Газові фракції атмосферного повітря, пил, водяна пара значною мірою впливають на проходження сонячного випромінювання крізь атмосферу, тому для точного визначення дійсного значення енергетичної яскравості земної поверхні застосовуються різноманітні атмосферні моделі, які мають наступний узагальнений вигляд:

$$L_0 = \frac{L - L \uparrow}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L \downarrow \quad (3)$$

де L_0 – дійсна 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 [4].

Для визначення температури та дійсного значення спектральної щільності енергетичної яскравості земної поверхні враховується коефіцієнт теплового випромінювання досліджуваної поверхні – власна характеристика об'єкта, що описує здатність поглинати падаюче теплове випромінювання у порівнянні із абсолютно чорним тілом (гіпотетичним об'єктом, який поглинає усе падаюче випромінювання без відбиття).

Таким чином, основною проблемою при визначенні температури земної поверхні по супутниковим зображенням далекого інфрачервоного діапазону виступає невизначеність коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні. Дана невизначеність робить задачу розрахунку термодинамічної температури математично некоректною: кількість невідомих в рівняннях радіаційного переносу завжди на одиницю перевищує кількість рівнянь в системі [5].

2. Відновлення показника коефіцієнта теплового випромінювання

Визначення коефіцієнта теплового випромінювання для виконуються окремо для поверхонь, покритих рослинністю, та всіх інших типів (відкритий ґрунт, пісок, заасфальтовані ділянки, дахи, поверхні водних об'єктів і т.д.). При цьому розділення одного зображення на два типи виконується методом маскування за значенням вегетаційного індексу $NDVI$. Для поверхонь, покритих рослинністю діапазон $NDVI$ встановлюється в межах $0.2 \div 0.85$. При виконанні відновлення зображення коефіцієнтів теплового випромінювання застосовувались мультиспектральні зображення, отримані супутниками *Landsat*.

Поверхні, вкриті рослинністю, мають порівняно високий коефіцієнт теплового випромінювання, який залежить від відношення проективної площі рослинності до повної площі відкритого ґрунту, яка також оцінюється через значення нормалізованого вегета-

ційного індексу $NDVI$ [6]:

$$F \cong \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_\infty - NDVI_0} \right)^2 \quad (4)$$

де F – проективне покриття рослинності, $NDVI_0$ – максимальне значення нормалізованого вегетаційного індексу відкритого ґрунту (або іншої поверхні, де повністю відсутня рослинність); $NDVI_\infty$ – мінімальне значення нормалізованого вегетаційного індексу поверхні, повністю покритою рослинністю.

Для ділянок поверхні покритих рослинністю спектральний коефіцієнт теплового випромінювання описується співвідношенням [7]:

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

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 дальньому інфрачервоному діапазоні $\Delta\varepsilon \approx 0.005$).

Для другої частини зображення виконується класифікування за типом поверхні та встановлення значення коефіцієнта теплового випромінювання для кожної із них. З цією метою для 27 тестових ділянок на території Києва за допомогою професійного польового пирометра були експериментально виміряні значення широкосмугових коефіцієнтів теплового випромінювання типових земних покриттів представлених у табл. 1.

Сума двох зображень коефіцієнтів теплового випромінювання дає повне зображення, яке застосовується для розрахунку значення термодинамічної температури поверхні Землі за допомогою наступного рівняння:

$$T = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_0} + 1 \right)} \quad (6)$$

де K_1 , K_2 – апаратні константи конкретного сенсора. Для інфрачервоної знімальної апаратури супутникових систем серії *Landsat* ці константи наведено в таблиці 2.

3. Побудова часових рядів на основі отриманих температурних карт

Часові ряди є універсальним інструментом оцінки стану системи, до якого відноситься досліджуваний процес, та як короткочасного так і довготривалого прогнозу параметрів досліджуваного процесу.

Багатовимірний часовий ряд може містити одразу декілька параметрів. В кожному елементі розрізнення часовий ряд дистанційних даних являє собою функцію залежності конкретного параметра досліджуваного процесу від часу на часовому інтервалі, протягом якого одержано часовий ряд.

Як правило, при аналізі часових рядів дистанційних даних, виявляються та описуються тренди та періодичні складові. Лінійні тренди часових рядів дистанційних даних описуються середніми значеннями за весь період аналізу та середніми приростами

Табл. 1. Експериментально визначені значення широкосмугового коефіцієнта теплового випромінювання різних типів поверхонь

Тип покриття	Коефіцієнт теплового випромінювання
Асфальт	0.94
Бруківка	0.96
Газон сухий	0.96
Асфальт	0.94
Газон	0.97
Пісок	0.95
Вода	0.93
Бруківка	0.95
Газон	0.98
Бруківка	0.95
Асфальт	0.94
Асфальт	0.94
Пісок	0.95

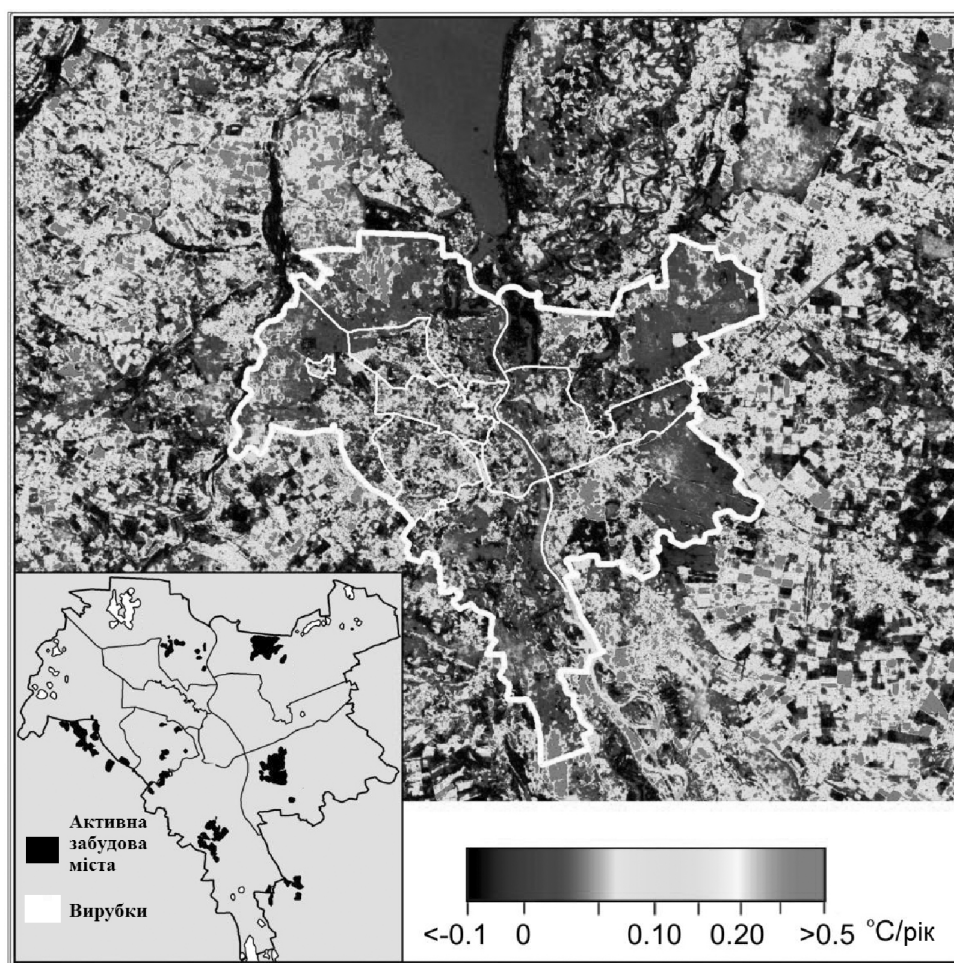


Рис. 1. Порівняння елементів вихідних зображень коефіцієнтів теплового випромінювання із кінцевим після підвищення просторової розрізненості

Табл. 2. Апаратні константи супутникових систем серії Landsat

Супутникова система	Landsat TM (band 6)	Landsat ETM+ (band 6)	Landsat TIRS (band 10)	Landsat TIRS (band 11)
K1	607.76	666.09	774.89	480.89
K2	1260.56	1282.71	1321.08	1201.14

за певний період. Періодичні складові описуються частотою виникнення періодичних коливань, їх внеском в досліджуваний процес що характеризується приростом функції (параметра процесу, що досліджується) кожного періоду, на які припадає коливання та характерним періодом, на який з-поміж інших припадає найбільш значне коливання.

Для отримання максимально точних і об'єктивних результатів досліджень часових рядів необхідне залучення значної кількості вихідних даних. В даній роботі використовувався архів супутникових даних з 1985 р. по 2014 р. за період активної вегетації з початку червня по кінець серпня. За результатами обробки даних виділено стійке підвищення значення температури земної поверхні в межах міста Києва 0,08°C/рік. Одним з причин підвищення значень температури є активний розвиток міста, значне ущільнення вже існуючої забудови в центральній частині міста, поява нових мікрорайонів за рахунок зелених зон, погіршення якості рослинного покриву. Детальне зображення динаміки температури поверхонь в межах та за межами міста Києва представлена на рис. 1.

Висновки

Застосування даних космічного знімання у тепловому діапазоні дозволяють значно спростити задачу картування островів тепла міських агломерацій та відслідковувати динаміку їх формування за допомогою аналізу часових рядів теплових карт для прогнозу майбутнього стану та комфортності міського середовища та прийняття рішень щодо їх поліпшення.

Перелік використаних джерел

1. Kaspersen P. S., Fensholt R. Drews Using M. Landsat vegetation indices to estimate impervious surface

fractions for European cities : Remote Sensing, 2015, 7 (6). — 8224-8249 p.

2. Paproth S., Schlüßler E., Scherbaum P., Börner A. SENSOR++: Simulation of remote sensing systems from visible to thermal infrared : International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012. — Vol. XXXIX. — Part B1. — 257-260. p.
3. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники — М. : Советское радио, 1978. — 400 с.
4. Coll C., Garve J. M., Sanchez J. M., Caselles V. Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground Based Measurements. : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens — Vol. 48., no. 1. — Jan. 2010. — 547-555 p.
5. Баранов В. Л., Водоп'ян С. В., Грищук Р. В. Алгоритм автоматизованого оцінювання спектрального коефіцієнта теплового випромінювання. : Вісник ЖДТУ. — 2006. — № 4(39). — 77-83 с.
6. Perez Hoyos I. C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity. — : International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. — 2014. — Vol.2., No.2 — 26-30 p.
7. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. : Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 57, No. 3. — 167-184 p.