

УДК 528.873.041.3

DOI: 10.18372/2310-5461.36.12234

**О. О Железняк**

аспірант

Національний авіаційний університет

e-mail: djironkiev@gmail.com

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ЗЙОМКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ МІСЬКИХ АГЛОМЕРАЦІЙ ТА ОБ'ЄКТІВ НА ЇХ ТЕРИТОРІЇ

### Постановка проблеми

Сьогодні дешифрування аерокосмічних знімків в інфрачервоному діапазоні набуває важливого значення для вивчення властивостей предметів земної поверхні, непомітних для людського ока. Теплові аерокосмічні знімки використовуються в різних галузях наук про Землю: геодезії, картографії, метрології, тектоніці, океанографії та геології. Переважна більшість теплових знімків застосовується для визначення температури земної поверхні. Аналіз аерокосмічних зображень в інфрачервоному діапазоні здійснюється на основі перепадів яскравості (контрастів) різних тіл на поверхні Землі [1]. Інформація про теплове випромінювання земної поверхні, одержана при дистанційному зніманні Землі в інфрачервоному діапазоні, надає можливість вивчити особливості власного теплового випромінювання різних тіл, здійснити просторово-часовий аналіз динаміки теплових явищ, пов'язаних із зміною ландшафтних структур, глобальних і локальних теплових аномалій земної поверхні, виявити прояви вулканічної активності, дослідити антропогенні джерела тепла і теплового забруднення, які пов'язані з життєдіяльністю різних поселень: великих та малих агломерацій [2]. Вивчення теплового випромінювання дає змогу провести геопросторовий аналіз динамічних змін ландшафтів і шляхом дешифрування виділити окремі види геосистем, що пов'язані зі змінами фізико-хімічних властивостей ділянок земної поверхні.

**Невирішені частини проблеми:** Дотепер залишаються невирішеним завдання теплової космічної зйомки надвисокої роздільної здатності, а також знаходження динаміки інтенсивності теплового випромінювання територій за знімками високої роздільної здатності та обґрунтування точності прив'язки інфрачервоних знімків для здійснення великомасштабного картографування міських агломерацій.

**Мета дослідження** — з'ясувати особливості застосування аерокосмічних методів для проведення геопросторового аналізу теплових полів міських агломерацій.

### Огляд останніх досліджень

Особливості застосування інфрачервоної зйомки для проведення аналізу теплових полів міських агломерацій досліджували такі вчені: Є. А. Шарков [1], Й. Хансен [2], Дж. Е. Джемисон [4], С. А. Станкевич [5] та ін.

### Основні результати дослідження

Інфрачервоне випромінювання, відкрите у XIX ст., тривалий час було об'єктом лише теоретичних і лабораторних досліджень. На сьогодні, з розвитком рівня інформаційної техніки та приймачів в інфрачервоному діапазоні хвиль значно зросло застосування інфрачервоного знімання в цивільній і військових сферах. Особливого прогресу досягли космічні дослідження поверхні Землі в інфрачервоному діапазоні, створення космічних засобів для розв'язку різних науково-технічних задач, пов'язаних з метрологією і прогнозом клімату, вивченням природних ресурсів Землі і контролю за станом навколишнього середовища, економічною ефективністю ресурсів, які використовує земна цивілізація. Інфрачервоне знімання поверхні Землі в широкому діапазоні є дуже важливим також для геології, водних ресурсів, агротехніки та моніторингу інженерних міських мереж.

Зважаючи на високу інформаційність інфрачервоних каналів спектра, особливо в діапазон «вікон прозорості» атмосфери, головним джерелом інформації для визначення вологості температурних аномалій є аерокосмічне знімання в інфрачервоних променях.

Температурне поле Землі залежить від фізичних параметрів різноманітних об'єктів на її поверхні, властивостей і стану атмосфери, змін

поток сонячної радіації протягом доби і року. Для розуміння всіх факторів, що впливають на формування земної температурного поля, інфрачервона техніка дистанційного зондування надає найціннішу інформацію, доповнює традиційні методи досліджень земної поверхні, атмосфери, океану. Фактично бортова інфрачервона апаратура постачає тільки непряму вимірювальну інформацію про теплове випромінювання Землі, шукані значення температур, концентрацій, складу атмосфери, земної поверхні тощо знаходять на підставі обробки цієї інформації.

Сучасна бортова вимірювальна інфрачервона техніка являє собою приклад перетворення успіхів фундаментальних наук, винаходів і відкриттів останніх десятиліть в технічні досягнення. При цьому внесок науки в технічний прогрес беззаперечний. Інфрачервоне дистанційне зондування Землі з космосу стало незамінним засобом вирішення завдань гідрогеології та інженерної геології, геологічного картування, меліорації та іригації, вивчення водного середовища, снігового та льодяного покриву, районів вулканізму та геотермальної діяльності, охорони навколишнього середовища тощо.

Космічні інфрачервоні методи дослідження знаходять застосування у всіх наукових дисциплінах, пов'язаних з вивченням земної поверхні. Інфрачервона апаратура космічного базування постачає «сирий матеріал», який використовується для наукових і практичних цілей.

Для забезпечення прогресу в зборі даних за допомогою інфрачервоного дистанційного зондування можна очікувати, що в нових системах, розрахованих на застосування в наступні роки, будуть використовуватися удосконалені охолоджувані двовимірні матриці приймачів випромінювання в поєднанні з приладами із зарядним зв'язком. Сучасна технологія в галузі оптики, приймачів випромінювання, мікроелектроніки, криогенної техніки, систем обробки й аналізу даних демонструє великі можливості інфрачервоних приладів космічного базування.

Приймачі інфрачервоного випромінювання є, по суті, перетворювачами енергії випромінювання в зручну для безпосереднього вимірювання форму, наприклад, в електричний струм. За характером взаємодії електромагнітного випромінювання з чутливим елементом приймачі ділять на дві великі групи — теплові та фотоелектричні. У теплових приймачах у результаті поглинання випромінювання відбувається його нагрівання. Матеріал приймача обраний таким чином, щоб це збільшення температури призвело до зміни властивостей приймача, яке потім і сприймається як вихідний сигнал, зумовлений зовнішнім опроміненням.

Відомо кілька типів теплових приймачів: болометри, у яких при зміні температури змінюється електричний опір чутливого елемента; термоелементи, у яких виникає термоелектрорушійна сила в ланцюзі, що складається з двох різних матеріалів, при нагріванні місця їх спаю; піроелектричні приймачі, у яких реєструються збільшення поверхневого заряду піроелектричного матеріалу при зміні його температури в процесі нагрівання випромінюванням; оптико-акустичні, в основі яких лежить властивість збільшення обсягу газу при підвищенні температури.

У середині ХХ ст. активно розроблялися технології теплової космічної зйомки і методи використання її матеріалів в науках про Землю. Вони застосовувалися для пошуку корисних копалин, для інженерних завдань. З появою можливостей отримання зображень земної поверхні з космосу спектр розв'язуваних по теплових знімкам завдань значно поширився. Перші зображення Землі з космосу в тепловому інфрачервоному діапазоні були отримані з американського метеорологічного супутника TIROS-1 у 1960 р. Супутник запущався в інтересах Національного аерокосмічного агентства (NASA) і Міністерства оборони США. Незважаючи на те, що дані, отримані сенсорами супутників TIROS-1 і 2, характеризувалися низькою просторовою роздільною здатністю, була вперше показана можливість використання даних теплового дистанційного зондування для вирішення ряду метеорологічних завдань.

З 1962 р. здійснювалися запуски супутників серії «Космос», які склали істотну частину радянської програми космічних досліджень. Дуже важливу роль супутники «Космос» зіграли в удосконаленні служби погоди: на базі метеосупутників «Космос-144» і «Космос-156» в 1967 р. була створена експериментальна метеорологічна система «Метеор». Фонд матеріалів космічної зйомки в тепловому інфрачервоному діапазоні накопичується з 1960-х рр., Проте, як показує аналіз оглядових публікацій знімки цього діапазону використовуються для вивчення природних і антропогенних об'єктів і процесів значно менше, ніж знімки інших спектральних діапазонів. З плином часу космічні технології отримання супутникових даних у тепловому діапазоні удосконалювалися як відносно просторової роздільної здатності, так і температурної. Наприклад, знімки, одержані радіометрами з супутника NOAA на початку 1970-х років, характеризувалися просторовою роздільною здатністю 6 км за температурної роздільної здатності 1 °С; потім сканувальна система AVHRR супутника NOAA дозволила отримувати теплові інфрачервоні знімки з просторовою роздільною здатністю 1,1 км і темпера-

турою 0,1–0,2 °С. Удосконалення технології отримання теплових зображень призвело до розробки радіометрів, що дозволяють реєструвати теплове випромінювання Землі не в одному каналі, а в декількох вузьких спектральних каналах у діапазоні від 8 до 14 мкм. Використання декількох спектральних каналів теплового діапазону забезпечує розвиток різних напрямків дослідження Землі і планет, наприклад, визначення

температури поверхні суші та океану, розпізнавання геологічних структур і типів гірських порід на основі теплової інфрачервоної спектрометрії.

У таблиці наведено зведення космічних систем дистанційного зондування Землі, складену на основі аналізу різних джерел, що забезпечують отримання даних цього діапазону, починаючи з найперших.

**Космічні системи теплової зйомки (сформовано автором за даними [5])**

Назва системи	Космічний апарат	Країна	Період роботи, роки	Теплові діапазони, мкм	Просторова роздільна здатність, м
TIROS 1-10	TIROS	США	1960–1965	Тепловий ІЧ	8000 1000
Метеор	Метеор	СРСР, РФ	1967–2002	Тепловий ІЧ	17000 1000–2000
AVHRR	NOAA	США	3 1970	3,55–3,93; 10,3–11,3; 11,5–12,5	6000 1100
GOES	GOES	США	3 1975	10,2–11,2; 11,5–12,5	2000
Meteosat	Meteosat	Європа	1977–1997	Тепловий ІЧ	2500–5000
SeaSAT	SeaSAT	США	1978	Тепловий ІЧ	7000
CZCS	Nimbus-7	США	1978–1978	10,5–12,5	800
HCMM	HCMM	США	1978–1980	10,5–12,5	500–600
MSS	Landsat-3	США	1978–1983	10,4–12,5	240
TM	Landsat-5	США	1984–2011	10,4–12,5	120
ATSR	ERS-1	Європа	1991–2000	3,7; 12	1100
МСУ-СК	Ресурс-О1	РФ	1994–2001	3,5–4,1; 10,6–12,6;	600
ATSR	ERS-2	Європа	3 1995	3,7; 12	1100
OCTS	ADEOS-I	Японія	1996–1997	3,35–3,88; 8,25–8,80; 10,3–11,4; 11,4–12,7	700
ASTER	Terra	США	3 1999	8,125–8,475; 8,475–8,825; 8,925–9,275; 10,250–10,950; 10,950–11,650	90
MODIS	Terra, Aqua	США	3 1999	16 каналів у діапазоні 3,660–14,385	1000
ETM+	Landsat-7	США	3 1999	10,4–12,5	60
TIRS	Landsat-8	США	3 лютого 2013	10,6–11,2; 11,5–12,5	100
GLI	ADEOS-II	Японія	2002–2003	6 каналів у діапазоні	1000
MTI	MTI	США	Березень – серпень 2000	8,0–8,4; 8,4–8,8; 10,2–10,7	20
МСУ-МР	Метеор-М №1	РФ	3 2009	3,5–4,1; 10,5–1,5; 11,5–12,5	1000
VIIRS	Suomi NPP	США	3 2011	8,400–8,700; 10,263–11,263; 11,538–12,488; 10,500–12,400	750 380

Можна помітити, що більшість систем зйомки отримує знімки високої просторової роздільної здатності, як правило, 1000 м і нижче. Невелика група систем зйомки отримує (отримувала) знімки з просторовою роздільною здатністю від 500 до 1000 м, наприклад, OCTS, МСУ-СК. Просто-

ровою роздільною здатністю вище 500 м характеризуються знімки систем TM, ETM +, MSS, TIRS, MTI, ASTER, VIIRS. Серед них три системи (ETM +, ASTER, TIRS) характеризуються просторовою роздільною здатністю 100 м і вище. Далі проаналізуємо з точки зору оцінки дешиф-

рувальних властивостей географічних об'єктів ті системи теплової космічної зйомки, знімки яких використовуються в наукових дослідженнях найчастіше.

Сенсор AVHRR є основним приладом, встановленим на полярно-орбітальних супутниках Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA). Супутники серії NOAA функціонують з 1970 р. Супутники першого покоління працювали на орбітах заввишки 1400 км; другий, з 1978 р. — 850 км. AVHRR вимірює відбивну здатність Землі в 5 відносно широких спектральних діапазонах (0,6 мкм; 0,9 мкм; 3,5 мкм; 11 і 12 мкм). На супутниках серії NOAA, що працюють у даний час, встановлені два комплексу приладів: AVHRR і комплект апаратури для вертикального зондування атмосфери. Прилад AVHRR отримує зображення з просторовою роздільною здатністю 1,1 км у смузі огляду 2500 км, складаючи повне зображення поверхні Землі за одну добу. Основне призначення інструментів — моніторинг хмарного покриву і вимір вихідного теплового випромінювання Землі. За даними, одержуваними цим сенсором, визначаються температури поверхні океану і суші. Дані AVHRR, накопичені за більш ніж 40-річний період, мають велике значення при вивченні змін клімату та навколишнього середовища. Просторова роздільна здатність цих знімків вище, ніж знімків з геостационарного супутника GOES, однак вона також розрахована на вивчення в першу чергу глобальних геосистем. Часова роздільна здатність (тобто частота отримання знімків) цих знімків нижче, ніж GOES — AVHRR реєструє знімки деякої території чотири рази на добу. Таким чином, ця система зйомки призначена для виявлення геосистем більш низького ієрархічного рівня, ніж GOES, а саме, частин океанів і материків.

Сканувальний спектрорадіометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установлений на супутниках Terra і Aqua, веде зйомку в 36 каналах: з них в 12 у видимому діапазоні, 8 в ближньому і середньому інфрачервоному діапазоні, 16 в тепловому інфрачервоному діапазоні, у тому числі: 6 — у вікні прозорості 3–5 мкм, 8 — у вікні прозорості 8–14 мкм і 2 між цими вікнами прозорості (для вивчення вмісту водяної пари в атмосфері і хмарах). Два канали мають просторову роздільну здатність 250 м, п'ять каналів — 500 м, і 29 каналів (у тому числі всі теплові інфрачервоні) характеризуються просторовою роздільною здатністю в 1000 м. Ширина смуги зйомки становить 2300 км. Широке розповсюдження даних MODIS насамперед обумовлено головними перевагами системи: порів-

няно високою часовою роздільною здатністю (знімки реєструються кожену добу, а в середніх і високих широтах можлива реєстрація кілька разів на добу через перекриття сусідніх трас зйомки), великою кількістю діапазонів, у яких виконується реєстрація зображень і наявністю великої кількості каналів із середньою просторовою роздільною здатністю. Завдяки своїм особливостям дані MODIS забезпечують вирішення різноманітних завдань по регулярному моніторингу природних явищ на регіональному рівні. Охоплення геосистем, які дозволяють вивчати ці знімки таке саме, як і у AVHRR, однак спектральна роздільна здатність системи MODIS істотно вище, що дозволяє виявляти тонкі відмінності між досліджуваними геосистемами.

Американська програма Landsat почала своє існування в 1972 р., з цього часу було запущено сім супутників. Зібраний архів знімків дозволяє аналізувати зміни, що відбулися на Землі протягом уже більше 40 років. На супутнику Landsat-3 працювала система зйомки MSS (Multi Spectral Scanner), отримувала знімки з просторовою роздільною здатністю 80 м у видимому і ближньому інфрачервоному діапазоні і 240 м у тепловому інфрачервоному. Супутники Landsat-4 і Landsat-5 були оснащені двома типами сканерів, що забезпечували зйомку земної поверхні з різною просторовою і спектральною роздільною здатністю — MSS і TM (Thematic Mapper, просторова роздільна здатність 30 м у видимій, ближній і середній інфрачервоних зонах, 120 м у тепловому діапазоні). MSS і TM — оптико-механічні сканери, що забезпечують зйомку в смузі шириною 185 км. Супутник Landsat-7 знаходиться на орбіті з 15 квітня 1999 р. Встановлений на супутнику радіометр ETM+ є вдосконаленим варіантом сканерів TM (enhanced). Основною відмінністю цього приладу є наявність панхроматичного каналу високої роздільної здатності (15 м) і збільшення просторової роздільної здатності в тепловому каналі до 60 м. З кінця травня 2003 р. у зв'язку з виходом з ладу одного з елементів системи зйомки, радіометр ETM+ працює некоректно, неполадки в роботі апаратури призвели до зниження якості даних. У зв'язку з проблемами була відновлена оперативна експлуатація супутника Landsat-5, який перебував на орбіті з 1984 р.

18 листопада 2011 р. зйомку з супутника Landsat-5 призупинено на 90 днів у зв'язку з технічними проблемами, 6 січня 2013 р. супутник передав останній знімок, 5 червня 2013 р. супутник повністю перестав функціонувати. Запуск нового супутника Landsat-8 (проект LDCM — Landsat Data Continuity Mission) відбувся в лютому 2013 р. Сканер теплового діапазону TIRS

(Thermal Infrared Sensor) веде зйомку в двох каналах 10,6–11,2 мкм і 11,5\* 12,5 мкм з просторовою роздільною здатністю 100 м. Слід зазначити найважливіший факт — знімки системи ETM+ характеризуються найбільш високим серед наявних у відкритому доступі теплових космічних знімків просторовою роздільною здатністю 60 м. Просторова роздільна здатність знімків у тепловому каналі системи TM — 120 м, системи TIRS — 100 м, часова роздільна здатність знімків систем TM, ETM+ і TIRS — 16 діб (у зоні перекриття витків — 8 діб). Ці параметри дозволяють вивчати геосистеми регіонального рівня.

**ASTER** — (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer — удосконалений космічний радіометр теплового випромінювання та відбиття) встановлений на космічній апарат Terra, який був запущений у грудні 1999 р.

ASTER — це багатоканальний сенсор високої роздільної здатності, що дозволяє проводити дистанційне зондування як у видимому, так і в тепловому інфрачервоному діапазоні. Програма ASTER введена для більш детального і глибокого вивчення явищ на земній поверхні і в атмосфері Землі в рамках американської програми EOS (Earth Observing System). Програма виконується спільно США і Японією — Японія розробила радіометр ASTER і наземні станції з прийому сигналів, а NASA відповідає за управління, запуски та розвиток системи. Як США, так і Японія рівною мірою здійснюють прийом й поширення даних, одержуваних цим інструментом. Радіометр отримує дані в 14 спектральних діапазонах: 3 — у видимій та ближній інфрачервоній зонах спектра, 6 — у середній інфрачервоній і 5 — у тепловій, з просторовою роздільною здатністю відповідно 15, 30 і 90 метрів і розміром кадру 60 × 60 км на місцевості. Дані середнього інфрачервоного діапазону перестали надходити на початку 2008 р. у зв'язку з перегрівом датчиків цього діапазону. Розробники цієї системи зйомки визначили коло завдань, що вирішуються за отриманими знімками: зони видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів призначені для вирішення широкого спектру завдань моніторингу та картографування поверхні Землі; зони середнього інфрачервоного діапазону найбільш корисні для розпізнавання мінералів і гірських порід; зони теплового діапазону призначені для реєстрації теплового випромінювання земної поверхні і дешифрування основних типів гірських порід, визначення температури поверхні суші, виявлення джерел тепла, моніторингу вулканічної активності та ін. Параметри цієї системи близькі до параметрів систем зйомки супутників серії Landsat, і призначення їх знімків схоже —

вивчення геосистем регіонального масштабу, однак спектральний дозвіл знімків системи ASTER вище.

Відзначимо, що з моменту появи перших космічних систем теплової зйомки відбулося істотне поліпшення їх технічних характеристик. Однак дотепер залишається невирішеним завдання теплової космічної зйомки надвисокої роздільної здатності, а також реалізації можливості вивчення добової динаміки інтенсивності теплового випромінювання по знімках високої роздільної здатності.

Сьогодні найкращою просторовою здатністю в тепловому діапазоні характеризуються знімки системи ETM+ (хоча з травня 2003 р. вони мають пропуски даних) — 60 м. Найвища просторова роздільна здатність якісних даних — 90 м (система ASTER) і 100 м (система TIRS). Такої просторової роздільної здатності достатньо для вивчення процесів і явищ, що відбуваються на регіональному рівні, тобто тих самих агломерацій у цілому.

При дослідженні агломерацій в Україні необхідно вибирати дані інфрачервоної зйомки в часовому інтервалі від кінця жовтня до початку квітня. В цей період урбанізовані території є найбільш активними в інфрачервоному діапазоні через роботу муніципальних інженерних систем та загальне охолодження земної поверхні. Аналіз супутникових знімків показав, що в агломераціях температура земної поверхні в самих містах значно перевищує таку у приміській зоні.

Усередині урбанізованих територій є певна різниця в теплових полях над різними об'єктами міської інфраструктури. Наприклад, постійні теплові аномалії в Києві та інших великих містах України (Харків, Одеса, Дніпро) [9] можна спостерігати над відкритими частинами основних теплотрас, біля великих очисних споруд та індустріальними зонами. Паркові зони, поверхня води та малоповерхова забудова мають значно нижчу температуру. Якщо ж розглядати багатоповерхову забудову, то максимальні втрати тепла спостерігаються в районах, забудованих з кінця 1950-х — кінця 70-х, у той же час багатоповерхові будинки, побудовані пізніше, показали найменші значення теплових втрат через кращу теплоізоляцію та інженерні споруди, як це видно з рисунку, побудованому за знімками супутника Landsat-8. Також необхідно звернути на значне зростання температури у центральній частині Києва протягом останніх 8–10 років. Це зв'язано зі швидким збільшенням щільності забудови. При порівнянні температури в березні 2003 р. з цим самим періодом в 2013 р. середня температура збільшилась на 7–10 градусів.

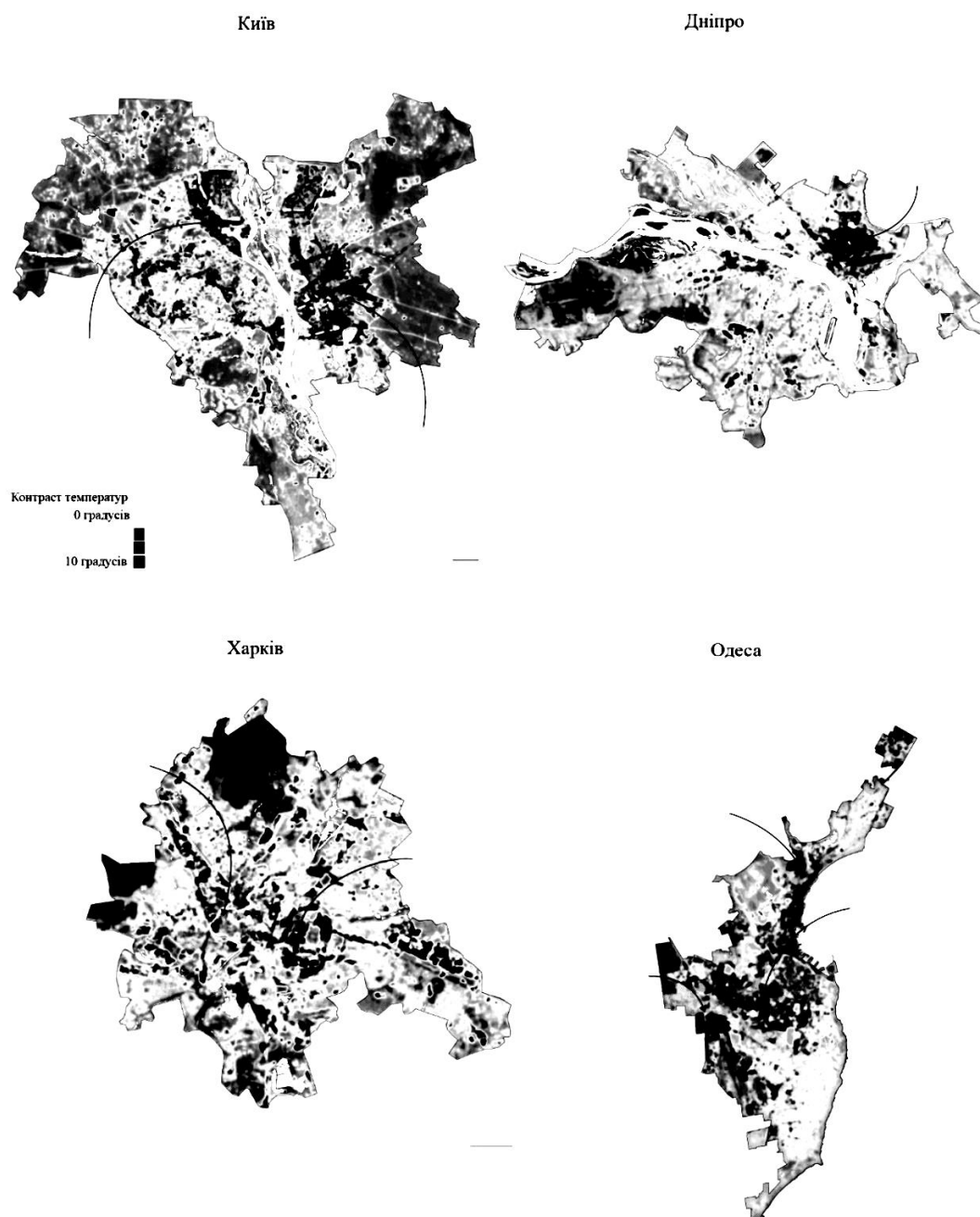


Рис. 1. Контрасти температур великих міст України (стрілками вказано райони найбільших перепадів температур)

З іншого боку, над парковими зонами кількість тепла залишається сталою. Так зване «пакування» ґрунту під бетон чи асфальт, взаємопов'язане з активним будівництвом, порушує природне циркулювання води та її випаровування, що призводить до зростання температури земної поверхні і подальшого збільшення «теплого острова» міста.

### Висновки

Отже, можна стверджувати, що супутникова інфрачервона зйомка є надзвичайно інформативною і корисною для аналізу просторового розпо-

ділення теплових полів в урбанізованих територіях. Вона дозволяє:

1. Визначити ділянки земної поверхні з максимальними втратами теплової енергії в періоди інтенсивного споживання тепла на території антропогенних ландшафтних структур;
2. Розробити рекомендації для стабілізації та зменшення міських «теплових островів» за допомогою кращого планування будівництва та облаштування паркових зон у містах.
3. Використовуючи супутникову інфрачервону зйомку, можна побудувати ефективну систему моніторингу втрат тепла на урбанізованих

ландшафтних структурах, що може визначати стан інженерних мереж та допомогти впровадити енергозберігаючі технології, що значно покращить енергоефективність управління міськими агломераціями.

4. Побудова тематичних карт теплових аномалій урбанізованих ландшафтів на основі космічного інфрачервоного знімання територій дозволяє виявити зміни геологічних і рельєфних утворень.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование земли: физические основы. — В 2 т. / Е. А. Шарков. — Т. 1. — М. : ИКИ РАН, 2014. — 544 с.
2. Hansen et al. Climate forcings in GISS SI2000 simulations // Journal of Geophysical Research, 2002. — Vol. 107, Issue D18. — ACL 2-1–ACL 2-37 [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JD001143/epdf>. Назва з екрана.
3. Chen Du, Huazhong Ren, Qiming Qin, Jinjie Meng and Shaohua Zhao. A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data // Remote Sensing. —

2015. — 7(1). — P. 647–665 [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4371/pdf>. Назва з екрана.

4. Джемисон Дж. Э. и др. Физика и техника инфракрасного излучения / Дж. Э. Джемисон. — М. : Сов. радио, 1967. — 632 с.
5. en.wikipedia.org [Електронний ресурс]. — Електрон. дані (15 файлів). — [https://en.wikipedia.org/wiki/Reconnaissance\\_satellite](https://en.wikipedia.org/wiki/Reconnaissance_satellite).
6. Stankevich S. A. Objects detection in infrared multispectral remote sensing (in Ukrainian) // Proceedings of National Academy, 1999. — Vol. 23. — No. 6. — P. 92–99.
7. Wan Z., Dozier J. Landsurface temperature measurement from space: Physical principles and remote sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989. Vol. 27. No.3. P. 268–278. doi.org/10.1109/36.17668
8. Voogt J. A., & Oke T. R. Thermal remote sensing for urban climates. / Remote Sensing Environment, 86, 2003, P. 370–384. doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8
9. Stankevich S., Filipovich V. Infra red satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine / Proceedings of 8th — International Green Energy Conference (IGEC-8). — Kiev : NAU, Ukraine, 2013, P. 219–223.

**Железняк О. О.**

### ЗАСТОСУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ЗЙОМКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ МІСЬКИХ АГЛОМЕРАЦІЙ ТА ОБ'ЄКТІВ НА ЇХ ТЕРИТОРІЇ

*Зроблено огляд застосування інфрачервоної зйомки для дослідження температурних аномалій урбанізованих ландшафтів. Проаналізовано основні параметри систем космічної інфрачервоної зйомки, що дозволяють досліджувати поле температур територій міських агломерацій. Обговорюється просторова роздільна здатність космічних систем інфрачервоного знімання. Показано, що проведення космічної інфрачервоної зйомки урбанізованих ландшафтів дозволяє виділяти ландшафтні структури з підвищеною температурою, а також виявляти контраст температур між територією міст і прилеглими приміськими зонами. Наведені приклади космічної зйомки міст України — Києва, Харкова, Одеси і Дніпра в інфрачервоному діапазоні. Виявлено, що кожне з міст має свої особливості контрастів температур. Звернуто увагу на антропогенне походження теплового випромінювання споруд урбанізованих ландшафтів.*

**Ключові слова:** космічна інфрачервона зйомка; міські агломерації; теплові поля.

**Железняк О. О.**

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ И ОБЪЕКТОВ НА ИХ ТЕРРИТОРИИ

*Сделан обзор применения инфракрасной съемки для исследования температурных аномалий урбанизированных ландшафтов. Проанализированы основные параметры систем космической инфракрасной съемки, позволяющие исследовать поле температур территорий городских агломераций. Обсуждается пространственное разрешение космических систем инфракрасной съемки. Показано, что проведение космической инфракрасной съемки урбанизированных ландшафтов позволяет выделять ландшафтные структуры с повышенной температурой, а также выявлять контраст температур между территорией городов и прилегающими пригородными зонами. Приведены примеры космической съемки городов Украины - Киева, Харькова, Одессы и Днепра в инфракрасном диапазоне. Выяснено, что каждый из городов имеет свои особенности контрастов температур. Обращено внимание на антропогенное происхождение теплового излучения сооружений урбанизированных ландшафтов.*

**Ключевые слова:** космическая инфракрасная съемка; городские агломерации; тепловые поля.

**Zheleznyak O. O.**

**THE USE OF INFRARED PHOTOGRAPHY FOR THE STUDY OF THERMAL FIELDS OF URBAN AGGLOMERATIONS AND OBJECTS ON THEIR TERRITORY**

*The article gives an overview of the infrared sensing usage for the study of urbanized landscapes' temperature anomalies. Main parameters of orbital infrared sensing systems that allow the research of metropolitan areas heat zones are analyzed. Spatial resolution of space-based infrared sensing systems is discussed. It is also shown that space-based infrared sensing allows to highlight landscape structures with heightened temperature and detect temperature contrast between city territories and nearby suburban areas. Examples of Ukraine's big cities infrared remote sensing are provided for Kyiv, Kharkiv, Odessa and Dnipro. It is shown that each city has its own temperature contrast features. Attention is drawn to anthropogenic origin of thermal emissions of urbanized landscapes' structures.*

**Keywords:** remote infrared sensing; metropolitan areas; thermal fields; heat islands.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017 р.

Прийнято до друку 04.11.2017 р.

Рецензент — д-р техн. наук, проф. Бойченко С. В.