

## ТЕПЛОВА ЗЙОМКА ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ З КОСМОСУ: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

*Інститут технічної механіки*

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,  
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: dakhramov@gmail.com*

Теплова зйомка Землі з космосу відіграє ключову роль у моніторингу природних та антропогенних процесів, таких як пожежі та вулканічна активність. Вона використовується для вимірювання температури поверхні, оцінки вологозабезпеченості сільськогосподарських культур та визначення складу гірських порід. Однак доступність і просторова роздільна здатність таких даних довгий час значно поступалася оптичним аналогом через низку технічних складнощів. В останні роки ситуація змінюється завдяки розвитку угруповань малих комерційних космічних апаратів (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і застосуванню нових технологій. У статті аналізуються сучасні тенденції та перспективи розвитку теплової інфрачервоної зйомки з борту малих КА, а також розглядаються проекти нічної оптичної зйомки. Особлива увага приділена комерційним угрупованням, таким як OTC (OroraTech / Spire Global), HotSat (SatVu / Leonardo), Hydrosat, FireSat (Muon Space), EarthDaily та ін. Досліджуються їх чисельність, параметри орбіти, періодичність зйомки, спектральні можливості, просторова роздільна здатність та корисне навантаження. Показано, що більшість угруповань теплової зйомки мають подвійне цивільне та військове призначення. Спостерігається перехід до мультиспектральної зйомки в середньохвильовому і довгохвильовому інфрачервоному діапазонах, а також застосування синхронної теплової та оптичної зйомки. Впроваджуються менш енергоємні неохолоджувані датчики (мікроболометри). Розвивається високодетальна оптична зйомка в нічний час, яку ведуть малі КА традиційного оптичного ДЗЗ американських і китайських компаній. Розширюється застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для попередньої обробки даних, підвищення їх просторової роздільної здатності, а також автономного виявлення аномалій безпосередньо на борту КА. Розвиваються дослідження в області автономного наведення і управління орієнтацією КА за допомогою ШІ.

**Ключові слова:** *теплова інфрачервона зйомка, малі космічні апарати, MWIR, LWIR, неохолоджувані мікроболометри, нічна оптична зйомка, штучний інтелект, обробка даних на борту.*

The spaceborne thermal imaging of the Earth plays a key role in monitoring natural and anthropogenic processes, such as wildfires and volcanic activity. It is used to measure the surface temperature, assess crop moisture levels, and determine the rock composition. However, the availability and spatial resolution of such data have long been significantly inferior to optical counterparts due to a number of technical difficulties. In recent years, the situation has been changing thanks to the development of small commercial Earth remote sensing spacecraft constellations and the application of new technologies. This article analyzes the current trends in and the prospects for the development of thermal infrared imaging by small satellites plus nighttime optical imaging projects. Particular attention is paid to commercial constellations, such as OTC (OroraTech / Spire Global), HotSat (SatVu / Leonardo), Hydrosat, FireSat (Muon Space), EarthDaily, etc. Their size, orbital parameters, imaging frequency, spectral capabilities, spatial resolution, and payload are investigated. It is shown that most thermal imaging constellations have a dual, civilian and military, purpose. A transition to multispectral imaging in the mid-wave and long-wave infrared ranges and the use of synchronous thermal and optical imaging are observed. Less energy-intensive uncooled sensors (microbolometers) are being introduced. Under development is high-detail nighttime optical imaging by American and Chinese companies' small satellites with traditional optical Earth observation capabilities. Increasing use is made of artificial intelligence (AI) methods for preliminary data processing, improving spatial resolution, and autonomous anomaly detection directly onboard satellites. Research is in progress in the field of autonomous guidance and attitude control of satellites using AI.

**Keywords:** *thermal infrared imaging, small spacecraft, MWIR, LWIR, uncooled microbolometers, nighttime optical imaging, AI, onboard data processing.*

© Д. О. Храмов, А. І. Маслова, О. О. Пироженко, 2026

The article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ISSN 1561-9184 (Print) ISSN 2616-6380 (Online)

Технічна механіка. 2026. № 1.

Теплова зйомка Землі з космосу фіксує інфрачервоне (ІЧ) випромінювання земної поверхні, нагрітої Сонцем, внутрішнім теплом Землі або штучними джерелами тепла, а також відбите сонячне випромінювання в діапазоні від 3 мкм до 15 мкм. Це випромінювання використовується для вимірювання температури поверхні планети і розрізнення об'єктів на ній. Дані теплової зйомки з супутників дозволяють вести цілодобове спостереження за переміщенням хмарних мас, що підвищує точність короткострокових прогнозів погоди. Теплова зйомка дозволяє виявляти ділянки земної поверхні з температурою, що різко відрізняється від фону, лісові пожежі, виверження вулканів, геотермальні джерела тощо.

Величина потоку випромінювання в тепловому ІЧ діапазоні залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу спостережуваної ділянки поверхні Землі. Цю залежність використовують для картографування хімічного та мінерального складу гірських порід. Амплітуда зміни температури поверхні Землі, виміряної в денний і нічний час доби, також дозволяє отримувати інформацію про склад земної поверхні.

Проходячи шлях від поверхні Землі до датчика в космосі, інфрачервоні промені поглинаються компонентами атмосфери (особливо  $H_2O$ ,  $CO_2$  і  $O_3$ ), і їх інтенсивність значно знижується. Хороша проникність є лише в середньохвильовому ІЧ-діапазоні з довжинами хвиль 35 мкм (англ. Medium-Wave Infrared, MWIR) і в довгохвильовому ІЧ-діапазоні 812 мкм (англ. Long-Wave Infrared, LWIR). Більшість приладів теплової ІЧ-зйомки працюють у цих двох піддіапазонах.

При температурі навколишнього середовища матеріали поверхні Землі, такі як ґрунт, вода і рослинність, випромінюють в LWIR. При нагріванні об'єктів вище температури навколишнього середовища випромінювання зміщується в бік більш коротких довжин хвиль. Спостереження в MWIR допомагають виявити гарячі поверхні, наприклад, лісові пожежі. Крім того, теплове ІЧ-випромінювання може проникати крізь дим (але не крізь хмарність), що робить теплові супутникові знімки особливо цінними для виявлення та моніторингу пожеж.

У цивільному ДЗЗ освоєння теплового ІЧ-діапазону для отримання зображень почалося в 1960-ті рр. на метеорологічних супутниках Землі. Сучасні метеосупутники, такі як європейський супутник MetOp-SG-A1 (запущений у 2025 р., маса 4,4 т), дозволяють вести зйомку в десятках спектральних каналів теплового ІЧ-діапазону. Аналіз можливостей подібних масивних і дорогих КА виходить за рамки даної роботи, оскільки вони не застосовуються в складі комерційних супутникових угруповань.

Теплова зйомка з космосу активно використовується у військових цілях, в першу чергу, в космічних системах виявлення пусків ракет. Робота таких систем базується на виявленні ракетних факелів у середньохвильовому ІЧ-діапазоні. Одна з перших подібних систем американська IMEWS (Integrated Missile Early Warning System) у складі трьох геостаціонарних супутників, розміщених над Індійським, Атлантичним і Тихим океанами була розгорнута на орбіті на початку 1970-х рр. Подібні системи ми також не будемо розглядати. Зазначимо лише, що в них було відпрацьовано ряд технічних новинок, які зараз впроваджуються в комерційному ДЗЗ, зокрема, апаратура лазерного міжсупутникового зв'язку (прототип створений на початку 1980-х рр. компанією McDonnell Douglas для КА моделі DSP-1 системи IMEWS).

Мета роботи полягає у виявленні тенденцій розвитку теплової зйомки Землі з космосу, що здійснюється малими КА. Крім того, будуть розглянуті

проекти з використання нічної зйомки Землі з космосу в оптичному діапазоні. Тенденції розвитку оптичного та мікрохвильового ДЗЗ, а також перспективи застосування цих методів у угрупованнях малих КА розглянуто раніше в [1, 2].

**Джерела інформації.** Якщо не вказано інших джерел, то дані про КА ДЗЗ та їх цільове обладнання взяті з веб-ресурсів: Satellite Missions catalogue (<https://www.eoportal.org/satellite-missions/>), Gunter's Space Page (<https://space.skyrocket.de>), WMO OSCAR (<https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>) та Satellite Sensors and Specifications (<https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors>). Параметри орбіт супутників взяті з Celestrak Satellite Catalog (<https://celestrak.org/satcat/>).

**Теплова зйомка.** Одним з перших спеціалізованих КА ДЗЗ для теплової зйомки земної поверхні став запущений в липні 1982 р. Landsat 4 з приладом Thematic Mapper. Він здійснював зйомку в LWIR-діапазоні (10,40–12,50) мкм одночасно з отриманням даних у видимому, ближньому та короткохвильовому ІЧ-діапазонах. Теплова зйомка в зазначеному діапазоні велася і наступними супутниками серії Landsat. У приладі TIRS КА Landsat 8 (запущений у лютому 2013 р.) використовуються вже два теплові діапазони, (10,6–11,19) мкм і (11,5–12,51) мкм, що дозволяє краще відокремлювати температуру поверхні Землі від температури атмосфери. Просторове розділення даних теплової зйомки Landsat 8 TIRS/Landsat 9 TIRS-2 становить 100 м. Періодичність зйомки одиночного КА Landsat становить 16 діб.

З початку 2000-х рр. теплова зйомка земної поверхні велася рядом масивних супутників з низькою просторовою роздільною здатністю, але високою періодичністю зйомки. Так, супутники NASA Terra і Aqua, оснащені приладом MODIS (роздільна здатність теплових каналів 1 км), забезпечують зйомку з періодичністю до 4-х разів на добу. Ще більш високу просторову і часову роздільну здатність забезпечують супутники NOAA з приладами VIIRS (3 КА; просторова роздільна здатність теплових каналів 750 м). Теплову зйомку Землі виконує також пара супутників ESA Sentinel-3 з приладом SLSTR (просторова роздільна здатність 1 км).

Таким чином, до початку 2020-х рр. теплова зйомка Землі здійснювалася одиничними КА з високою просторовою роздільною здатністю (~100 м) і низькою періодичністю зйомки (16 діб), а також з низькою просторовою роздільною здатністю (~1 км) і високою періодичністю зйомки (кілька разів на добу). Крім теплової зйомки, ці супутники вирішували й інші завдання ДЗЗ. Якщо перші подібні КА мали масу декілька тон, то маса КА Sentinel-3A, запущеного в 2016 р., становить вже 1250 кг, що впритул наближається до верхньої межі категорії малих супутників (1200 кг) за класифікацією Федерального управління цивільної авіації США [3]. Сучасні технології дозволяють знизити масу подібних КА до тони і менше, переводячи їх у клас малих КА.

Однією з фундаментальних проблем, що виникають при оцінці температури земної поверхні за даними дистанційних вимірювань, є те, що спостережуване (теплове) випромінювання залежить одночасно від температури поверхні і від її випромінювальної здатності (англ.: emissivity). Остання є безрозмірною фізичною величиною, яка показує, наскільки ефективно поверхня випромінює теплову енергію в порівнянні з ідеальним чорним тілом при тій же температурі.

Для розділення температури поверхні та її випромінювальної здатності за даними теплових датчиків супутників використовується алгоритм TES

(Temperature-Emissivity Separation) [4]. Для його застосування тепловий датчик повинен мати, принаймні, три канали теплового ІЧ-діапазону [5]. Першим приладом, що задовольняв цій умові, став ASTER, розміщений на супутнику Terra (1999 р.). Він має п'ять теплових каналів (центральні довжини хвиль: 8,291 мкм, 8,634 мкм, 9,127 мкм, 10,657 мкм і 11,318 мкм). Пізніше були запущені ECOSTRESS (2018 р., 5 теплових каналів) і SDGSAT-1 (2021 р., 3 теплових канали).

Коло завдань, для яких застосовуються дані теплової зйомки з космосу, постійно розширюється. Так, дані приладу ECOSTRESS, крім температури поверхні та випромінювальної здатності, служать для оцінки втрат води з ґрунту та рослин в атмосферу (евапотранспірації), що дозволяє розраховувати потреби рослин у воді та керувати іригацією [6].

Японський прилад ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) на борту супутника Terra веде зйомку в трьох спектральних каналах видимого і ближнього ІЧ-діапазонів, а також в шести каналах діапазону MWIR і п'яти каналах LWIR. Крім одночасної оцінки температури поверхні та її випромінювальної здатності, він вимірює характеристики хмар, індекс рослинності (NDVI) і топографію земної поверхні [7].

Дані ASTER широко застосовуються в геології для визначення мінералогічного складу поверхні [8–10]. Наявність п'яти спектральних каналів з досить вузькими смугами пропускання дозволяє розрізнити типи мінералів, що мають особливості поглинання в діапазоні 812 мкм. До таких мінералів відносяться кварц, польові шпати, карбонати (кальцит, доломіт та ін.), а також глинисті мінерали, включаючи каолініт і монтмориллоніт. Крім того, в геотемпературному полі, яке можна отримати за даними ASTER, виявляються поклади вуглеводнів.

Не менш важливою для визначення складу поверхні є можливість одночасної зйомки в діапазонах від видимого до LWIR. Канали видимого та ближнього ІЧ-діапазону використовуються для виявлення оксидів заліза ( $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ ) та рідкісноземельних елементів. Короткохвильові ІЧ-канали дозволяють виявляти в мінералах гідроксильні (OH-) і карбонатні групи.

Спираючись на досвід застосування ASTER, було запропоновано проєкт КА HypSPIRI, який передбачав використання гіперспектрометра для зйомки в діапазонах від видимого до короткохвильового ІЧ, а також восьмиканального датчика теплової ІЧ-зйомки (в діапазоні 713 мкм) [11]. Цей проєкт реалізований не був. Проте, досвід ASTER планується використовувати в інших місіях NASA.

Перспективні супутники NASA Landsat Next, запуск яких на орбіту планується здійснити після 2030 р., матимуть 26 спектральних каналів, з яких 5 належать до теплового ІЧ-діапазону. Канали Landsat Next обиралися з урахуванням досвіду ASTER. Вони стануть більш вузькими і, в поєднанні з одночасною зйомкою в більшій кількості каналів видимого, ближнього і короткохвильового ІЧ-діапазонів, дозволять, за попередніми розрахунками, перевершити результати ASTER в завданнях ідентифікації мінералів на земній поверхні [12].

Майбутня місія NASA Surface Biology and Geology (SBG) передбачає спільне проведення гіперспектральної зйомки в діапазонах від видимого до короткохвильового ІЧ-випромінювання, а також мультиспектральної теплової ІЧ-зйомки [13]. На відміну від HypSPIRI, в SBG передбачається використовувати 8 каналів в діапазоні 312 мкм, тобто буде задіяний діапазон

MWIR, який дозволяє працювати з високотемпературними об'єктами (наприклад, з вулканами).

Дані зйомки в тепловому ІЧ-діапазоні мають істотно нижчу просторову роздільну здатність у порівнянні з даними оптичної зйомки в діапазонах від видимого до короткохвильового ІЧ. Роздільна здатність найкращих на сьогоднішній день загальнодоступних даних теплової зйомки, таких як ASTER (1999 р.), ECOSTRESS (2018 р.) і SDGSAT-1 (2021 р.), становить десятки метрів: ASTER 90 м, ECOSTRESS 70 м і SDGSAT-1 30 м. Теплові канали перспективних КА Landsat Next і SBG матимуть просторову роздільну здатність 60 м.

Більш низька просторова роздільна здатність теплових датчиків пов'язана з тим, що енергія фотона в тепловому ІЧ-діапазоні (особливо для об'єктів з помірною температурою) значно менше енергії фотона видимого діапазону. Щоб надійно зафіксувати такий слабкий сигнал, космічний датчик повинен мати велику площу чутливого елемента (або довше інтегрувати сигнал), а це призводить до збільшення розміру пікселя на земній поверхні. Крім того, довжина хвилі теплового випромінювання в кілька разів більша, ніж у видимому діапазоні, що саме по собі обумовлює нижчу просторову роздільну здатність теплової зйомки.

Для зйомки в тепловому ІЧ-діапазоні потрібна більш складна і дорога знімальна апаратура, ніж для оптичної зйомки. Щоб виявити слабкі теплові сигнали, датчик повинен мінімізувати власний тепловий шум, що виникає через нагрівання компонентів. Досягається це шляхом охолодження датчика до низьких температур. Так, датчик ASTER охолоджується до 80 К, а датчик TIRS супутника Landsat 8 до ~40 К [7, 14]. Необхідність використовувати криогенну апаратуру довгий час перешкоджала поширенню теплових датчиків на малих КА.

Всі зазначені проблеми та обмеження призвели до того, що даних космічної теплової зйомки доступно значно менше, ніж даних оптичної зйомки, а їх просторова роздільна здатність не дозволяє вирішувати багато завдань детального спостереження.

В останні 5 – 7 років у космосі почали розгортатися відразу кілька комерційних угруповань малих КА, призначених для зйомки в тепловому ІЧ-діапазоні (табл. 1–3 дані на 01.11.2025).

Табл. 1 – Угруповання малих КА теплової зйомки

Назва	Корисне навантаження (країна)	Платформа (країна)	Рік
HiVE	Constellr (Німеччина) / OHB SE (Німеччина)	Kongsberg NanoAvionics (Литва)	2025
OTC	OroraTech (Німеччина)	Spire Global (США)	2022
Hydrosat	Hydrosat (США) / ABB (Канада)	Muon Space (США)	2024
HotSat	SatVu (Великобританія) / Leonardo (Італія)	Surrey Satellite Technology Ltd. (Airbus) (Великобританія)	2023
Albedo Space	Albedo Space (США)	Albedo Space (США)	2025
FireSat	Muon Space (США)	Muon Space (США)	2025
EarthDaily	EarthDaily Analytics (Канада) / INO (Канада)	Loft Orbital / Airbus Arrow (Франція/Канада)	2025
Jilin-1 GP	CGST (Китай)	CGST (Китай)	2019
WildFireSat	OroraTech (Німеччина)	Spire Global Canada (Канада)	2027
VISTAsat	NOVI Space (США)	NOVI Space (США)	2026
SatLeo Labs	SatLeo Labs (Індія)		2026

У колонці «Рік» табл. 1 наведено рік початку розгортання угруповання.

Як правило, супутникові угруповання теплової зйомки земної поверхні створюються консорціумами, де одна компанія відповідає за супутникову платформу, друга за корисне навантаження, третя за керування угрупованням (табл. 1). Поширена в області комерційного оптичного і мікрохвильового ДЗЗ вертикальна інтеграція, коли угруповання створюється переважно зусиллями однієї компанії, для теплової зйомки є винятком (Muon Space). Зате трапляються ситуації, коли компанія-власник угруповання не є ні розробником платформи, ні корисного навантаження, а відповідає за фінансове забезпечення і здійснює загальне керівництво проектом (Hydrosat, HotSat).

Всі відомі угруповання комерційних супутників теплового ДЗЗ використовують сонячно-синхронні орбіти (табл. 2). Періодичність зйомки вказана для повністю розгорнутого угруповання.

Табл. 2 – Параметри угруповань малих КА теплової зйомки

Назва	Висота, км	Планова чисельність	Поточна чисельність	Періодичність, час	Маса, кг
HiVE	510	30	2		120
OTC	550	96	8	0,5	12
Hydrosat	590	16	2		150
HotSat	512	9		1	130
Albedo Space	360	6	1		530
FireSat	590	50	1	0,5	150
EarthDaily	630	10	1		200
Jilin-1 GP	528	–	2		
WildFireSat	475	10			12
VISTA sat		40		1	
SatLeo Labs		12		12	–

Табл. 3 – Кількість каналів і просторова роздільна здатність знімальної апаратури угруповань малих КА теплової зйомки

Назва	Канали				Просторова роздільна здатність, м				Ширина смуги, км
	VNIR	SWIR	MWIR	LWIR	VNIR	SWIR	MWIR	LWIR	
OTC	–	–	1	2	–	–	–	200	400
WildFireSat	2		1	1	200		400	400	400
FireSat	2	1	1	1	–	–	50	50	1500
Hydrosat	7			2	30			70	–
HotSat			2				3,5		4,5
Clarity	1			1	0,1*			2	–
EarthDaily	12	6	–	4	5	95		120	240
HiVE	10			4	10			28	
Jilin-1 GP	20	4	1	1	5	100	100	150	110
NOVI Space VISTA sat	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SatLeo Labs	–			–	2,5			5	–

КА HotSat 1 британської компанії SatVu розрахований на зйомку тільки в діапазоні MWIR в одному з двох спектральних каналів денному (4,55,0 мкм) і нічному (3,75,0 мкм). Використання MWIR дозволяє здешевити знімальну апаратуру і досягти порівняно високої просторової роздільної здатності без охолодження датчика. Датчик HotSat 1 забезпечує просторову роздільну здатність від 3,5 м до 6,8 м (залежно від кута зйомки) і дозволяє знімати короткі відеоролики [16].

У ряді угруповань теплова зйомка доповнюється мультиспектральною оптичною зйомкою в діапазонах від видимого до короткохвильового ІЧ-випромінювання. На супутниках EarthDaily оптична зйомка ведеться в 18-ти спектральних каналах, а на Jilin-1 GP в 20-ти [17, 18]. На КА перспективної угруповання VISTA sat компанії NOVI Space (США), крім датчиків теплової зйомки, передбачається встановити камеру високої роздільної здатності для зйомки у видимому діапазоні і гіперспектральний датчик, що охоплює діапазон від видимого до короткохвильового ІЧ. Судячи з усього, угруповання VISTA sat буде гетерогенним, тобто складатиметься з супутників, що несуть різні комбінації корисних навантажень [19].

Для збільшення просторової роздільної здатності даних теплової зйомки в більшості угруповань використовуються алгоритми підвищення роздільної здатності (super-resolution, downscaling) на основі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання. Подібні алгоритми застосовуються як при наземній обробці даних, так і на борту КА.

Підвищення просторової роздільної здатності досягається не тільки за рахунок спеціальних алгоритмів обробки даних. Компанія Albedo планує створити супутникове угруповання на наднизькій навколоземній орбіті, тобто на орбіті висотою нижче 400 км [1]. Зниження орбіти дозволяє при тій же знімальній апаратурі досягти більш високої просторової роздільної здатності, а також полегшити зв'язок супутника з наземними станціями. Проблемою тут є підтримка висоти орбіти супутника протягом декількох років його експлуатації. Ключовим елементом, який повинен забезпечити вирішення цієї проблеми, є реактивний двигун, інформація про який не публікується.

Ще однією тенденцією є обробка даних на борту КА. Так, кожен супутник угруповання OTS оснащений бортовим блоком обробки даних за допомогою ШІ, який забезпечує виявлення лісових пожеж у реальному часі прямо в космосі. Працюючи в зв'язці з тепловим датчиком супутника, цей блок автономно обробляє і аналізує теплові зображення, запускаючи алгоритми виявлення теплових аномалій, які відрізняють справжні пожежі від помилкових спрацьовувань (гарячих дахів, факелів нафтовидобутку тощо). Виявивши пожежу, блок формує сповіщення з зазначенням місця розташування, інтенсивності та метаданих, виставляючи пріоритет для якнайшвидшої передачі повідомлення на Землю. Такий підхід, замість передачі цілого знімка, зменшує навантаження на канал зв'язку, що критично важливо для КА формату CubeSat 8U, що складають угруповання OTS. Блок також дозволяє прогнозувати поширення пожежі, виконувати кластеризацію вогнищ, стиснення зображень і підвищення роздільної здатності.

Крім охолоджуваних датчиків, для теплової зйомки з космосу використовують також неохолоджувані датчики на основі мікроблометрів. Ці прилади мають простішу конструкцію, меншу масу і вартість, але при цьому менш чутливі в порівнянні з охолоджуваними датчиками. Неохолоджувані

датчики використовують на наймініатюрніших КА теплової зйомки, зокрема, в угрупованнях OroraTech і Spire на базі CubeSat 8U [20].

Неохолоджуваний датчик з трьома каналами LWIR застосовувався на наносупутнику CIRiS (Compact Infrared Radiometer in Space), реалізованому на базі CubeSat 6U. Прилад забезпечував просторову роздільну здатність близько 166 м при висоті орбіти 500 км. CIRiS був запущений в 2020 р. і призначався для відпрацювання технологій створення простих і недорогих КА теплової зйомки на базі CubeSat'ів.

Характерною рисою супутникових угруповань теплової зйомки є їх подвійне призначення. Переважна більшість компаній (крім, ймовірно, Constellr) постачають дані військовим і розвідувальним організаціям. Серед останніх найчастіше фігурують Міністерство оборони США, Національне управління військово-космічної розвідки США (NRO) і Національне агентство геопросторової розвідки США (NGA).

Теплова зйомка з космосу активно проводиться в нічний час. У цей період вплив нерівномірного сонячного нагрівання зведений до мінімуму, що дозволяє легше виявляти незначні теплові аномалії, наприклад, викликані підземними вугільними пожежами. Нічна теплова зйомка використовується для спостереження за вулканічною активністю, лісовими пожежами, міськими островами тепла та в ряді інших застосувань. Так, дані триканального теплового сенсора китайського КА SDGSAT-1 (діапазони: (11,5–12,5) мкм, 810,5 мкм і (10,3–11,3) мкм) з просторовою роздільною здатністю 30 м використовуються для виявлення суден як у денний, так і в нічний час [21]. В останньому випадку дані теплового датчика доповнюються даними приладу GLIMMER, призначеного для нічної зйомки у видимому діапазоні. GLIMMER має панхроматичний канал з просторовою роздільною здатністю 10 м і три канали видимого світла з роздільною здатністю 40 м [22].

**Нічна оптична зйомка.** Дистанційне зондування нічної поверхні Землі в оптичному та ближньому ІЧ-діапазоні здійснюється з початку 1970-х рр. в рамках американської військової метеорологічної програми Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). Починаючи з 1976 р. супутники DMSP оснащувалися приладом Operational Linescan System (OLS), який застосовувався для виявлення хмар, льоду і снігу у видимому діапазоні при паданні на них місячного світла, а також для виявлення хмар в ІЧ-діапазоні за відсутності місячного освітлення. Дані OLS мають широкий спектральний відгук в діапазоні (0,44–0,94) мкм з найбільшою чутливістю в області (0,5–0,65) мкм. Це охоплює діапазон первинного випромінювання широко поширених ламп зовнішнього освітлення, що використовують пари ртуті (0,545 мкм і 0,575 мкм), натрій високого тиску (від 0,54 мкм до 0,63 мкм) і натрій низького тиску (0,589 мкм). Для посилення сигналу у видимому діапазоні в OLS використовувався фотопомножувач.

З 2011 р. нічна зйомка Землі здійснюється приладами Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), якими оснащуються низькоорбітальні метеорологічні супутники NOAA. Зйомка ведеться в панхроматичному каналі Day/Night band (0,5–0,9) мкм, що має високу чутливість в умовах низької освітленості.

Завдяки спостереженням OLS і VIIRS можливо побудувати безперервні часові ряди нічної освітленості земної поверхні, починаючи з середини 1990-х рр.

Китайські космічні апарати Luojia-1 і Yangwang-1 виконують завдання нічної оптичної зйомки [23, 24]. Перший дозволяє отримувати знімки з просторовою роздільною здатністю 130 м, другий здійснює зйомку в діапазоні (0,420–0,700) мкм з роздільною здатністю 40 м.

Нічні супутникові знімки в оптичному діапазоні фіксують випромінювання джерел людської діяльності – вогні населених пунктів, промислової та сільськогосподарської інфраструктури, розробки корисних копалин, газових факелів, рибальських суден, а також природних вогнів: блискавок, світла Місяця, полярних сьйв, світіння мікроорганізмів і тварин. Низка сучасних метеосупутників (наприклад, Meteosat Third Generation) оснащена окремими детекторами блискавок.

Разом з тим, нічна супутникова зйомка з високою просторовою і спектральною роздільною здатністю залишається порівняно маловивченою областю ДЗЗ [25]. Серед її застосувань переважають роботи з області соціальних наук [26]. Перспективи використання даних нічної зйомки з космосу, вимоги до апаратури, а також можливі проблеми та обмеження розглядаються в оглядах [25, 27].

Окрім спеціалізованих супутників та приладів, зйомку в нічний час здійснюють звичайні супутники оптичного ДЗЗ. Так, дані SWIR-каналів приладу OLI супутника Landsat 8 використовувалися для виявлення високотемпературних аномалій на території США [28].

Високодетаельну зйомку в нічний час ведуть малі КА оптичного ДЗЗ китайської компанії Chang Guang Satellite Technology [1]. Так, КА сімейства Jilin-1 Gaofen-03 (масою 42 кг кожен) дозволяють здійснювати нічну відеозйомку з роздільною здатністю краще 1,2 м і зоною покриття кадру 14,4 км x 6 км. З 2019 р. запущено понад 60 КА цього сімейства.

Розвідувальні супутники Gen-3 компанії BlackSky (США) оснащені датчиками видимого і SWIR випромінювання, призначеними, в тому числі, для роботи в умовах низької освітленості і в нічний час [29].

**Висновки.** 1. КА та угруповання комерційних КА теплової зйомки, як правило, створюються консорціумами компаній. Тільки компанія MuonSpace (США) створює подібне угруповання самостійно.

2. Переважна більшість комерційних угруповань КА теплової зйомки Землі має подвійне (військове і цивільне) призначення.

3. Відзначається перехід до мультиспектральних і дводіапазонних систем теплової зйомки Землі. Використання для зйомки декількох спектральних каналів дозволяє більш точно визначити температуру земної поверхні, а також розширити коло вирішуваних КА ДЗЗ завдань (включаючи, наприклад, завдання геологорозвідки). Зйомка одночасно в діапазонах MWIR і LWIR знаходить все більш широке застосування в завданнях виявлення та моніторингу лісових пожеж. Об'єднання даних теплових датчиків з синхронними даними зйомки в оптичному діапазоні дозволяє точніше виявляти об'єкти і визначати матеріали на земній поверхні.

4. Розробка не охолоджуваних або менш вимогливих до охолодження датчиків. Традиційно теплові датчики вимагають глибокого криогенного охолодження, що ускладнює їх використання на супутниках. Нові матеріали та технології, такі як неохолоджувані мікроболометри для LWIR або датчики з термоелектричним охолодженням для MWIR, знижують енергоспоживання і масу систем. Зокрема, неохолоджувані LWIR-камери на основі

мікроболометрів з оксиду ванадію (VOx) застосовуються в супутникових системах для моніторингу пожеж на базі КА формату CubeSat.

5. Використання ІІІ для обробки зображень теплових датчиків дозволяє підвищити просторову роздільну здатність, поліпшити якість зображень і автоматизувати аналіз даних, наприклад, для виявлення аномалій або класифікації об'єктів.

6. Інтеграція можливостей ІІІ та обробки даних безпосередньо на борту КА дозволяє передавати на Землю тільки стислі дані про знайдені об'єкти/явища, скорочуючи використання каналів зв'язку, що особливо важливо для малих КА.

7. Можливості бортового ІІІ вже зараз використовуються для прогнозування поширення лісових пожеж, тобто визначення майбутніх об'єктів зйомки. Розвиваються технології автономного наведення КА на об'єкт зйомки [30] і автономного управління орієнтацією КА [31]. У перспективі, КА з подібними ІІІ-системами будуть поводитися не як пасивні «збирачі даних», а як активні орбітальні вузли мережі виявлення та моніторингу об'єктів на земній поверхні.

1. Храмов Д. О., Пироженко О. О. Оптичні методи дистанційного зондування Землі та перспективи їх використання в комерційних космічних апаратах. *Технічна механіка*. 2024. № 4. С. 17–30. <https://doi.org/10.15407/itm2024.04.017>
2. Храмов Д. О., Маслова А. Л., Пироженко О. О. Мікрохвильові методи дистанційного зондування Землі з космосу та перспективи їх застосування. *Технічна механіка*. 2025. № 3. С. 98–113. <https://doi.org/10.15407/itm2025.03.098>
3. Botelho R. C., Xavier A. L. A Unified Satellite Taxonomy Proposal Based on Mass and Size. *Advances in Aerospace Science and Technology*. 2019. V. 4, N 4. P. 57–73. <https://doi.org/10.4236/aast.2019.44005>
4. Gillespie A. et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998. V. 36, N 4. P. 1113–1126. <https://doi.org/10.1109/36.700995>
5. Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C. Minimum configuration of thermal infrared bands for land surface temperature and emissivity estimation in the context of potential future missions. *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 148. P. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.027>
6. Li X. et al. ECOSTRESS estimates gross primary production with fine spatial resolution for different times of day from the International Space Station. *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 258. P. 112360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112360>
7. ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov> (дата звернення: 04.12.2025).
8. Abrams M., Yamaguchi Y. Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration. *Remote Sensing*. 2019. V. 11, N 11. P. 1394. <https://doi.org/10.3390/rs11111394>
9. Chen Q. et al. ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 1253. <https://doi.org/10.3390/rs14051253>
10. Gomez C. et al. Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2005. V. 30, N. 13. P. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.042>
11. Lee C. M. et al. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HypIRI) mission and preparatory activities. *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 167. P. 6–19. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.012>
12. Portela B. et al. Landsat Next current design for geological remote sensing: VNIR-SWIR-TIR data continuity and new opportunities. *Science of Remote Sensing*. 2025. V. 12. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100258>
13. Cawse-Nicholson K. et al. NASA's surface biology and geology designated observable: A perspective on surface imaging algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 257. P. 112349.
14. Barsi J. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration. *Remote Sensing*. 2014. V. 6, N. 11. P. 11607–11626. <https://doi.org/10.3390/rs61111607>
15. Goldberg A. C., Stann B., Gupta N. Multispectral, hyperspectral, and three-dimensional imaging research at the U.S. Army research laboratory. Sixth International Conference of Information Fusion, Cairns, QLD, Australia. 2003. P. 499–506. <https://doi.org/10.1109/ICIF.2003.177488>
16. SatVu Satellite Specification V 1.1 MARCH 2025. URL: [https://cdn.prod.website-files.com/664e1cfdaf0f190ac9bb6e1e/67d33d1f3a0df0f312281a0a\\_Satellite%20Specification.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/664e1cfdaf0f190ac9bb6e1e/67d33d1f3a0df0f312281a0a_Satellite%20Specification.pdf) (дата звернення: 14.12.2025).

17. Remote Sensing Instruments. EarthDaily satellite constellation. URL: <https://geospatialworld.net/gsi/2023/presentations/18-oct/new-space-economy/session-2/EarthDaily-Satellite-Constellation-B-V-Ramana-Kumar.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).
18. Jilin-1GP01\_02 Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. URL: [https://www.jl1.cn/EWeb/product\\_view.aspx?id=676](https://www.jl1.cn/EWeb/product_view.aspx?id=676) (дата звернення: 20.12.2025).
19. NOVI Sensor Suite. URL: <https://www.novispace.ai/sensor-suite> (дата звернення: 25.12.2025).
20. Canadian Space Agency: WildFireSat data sheet. URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/wildfiresat/data-sheet.asp> (дата звернення: 27.12.2025).
21. Li L., Yu J., Chen F. TISD: A Three Bands Thermal Infrared Dataset for All Day Ship Detection in Spaceborne Imagery. *Remote Sensing*. 2022. V. 14, N. 21. P. 5297. <https://doi.org/10.3390/rs14215297>
22. Xie Y. et al. The Potential of Using SDGSAT-1 TIS Data to Identify Industrial Heat Sources in the BeijingTianjinHebei Region. *Remote Sensing*. 2024. V. 16, N. 5. P. 768. <https://doi.org/10.3390/rs16050768>
23. Su Z. et al. High Sensitive Night-time Light Imaging Camera Design and In-orbit Test of Luojia1-01 Satellite. *Sensors*. 2019. V. 19, N. 4. P. 797. <https://doi.org/10.3390/s19040797>
24. Zhu X. et al. Assessment of a New Fine-Resolution Nighttime Light Imagery From the Yangwang-1 (“Look up 1”) Satellite. 2022. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. V. 19. P. 15. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3139774>
25. de Meester J., Storch T. Optimized Performance Parameters for Nighttime Multispectral Satellite Imagery to Analyze Lightings in Urban Areas. *Sensors*. 2020. V. 20, N. 11. P. 3313. <https://doi.org/10.3390/s20113313>
26. Combs C. L., Miller S. D. A Review of the Far-Reaching Usage of Low-Light Nighttime Data. *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 623. <https://doi.org/10.3390/rs15030623>
27. Schifano L., Hélière A. Advancements and challenges in nighttime light remote sensing. *Proc. SPIE 13699, International Conference on Space Optics ICSO 2024, 136992F* (28 July 2025). <https://doi.org/10.1117/12.3071580>
28. Wu H. et al. National-scale nighttime high-temperature anomalies from Landsat-8 OLI images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2024. V. 212. P. 212–229. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.05.002>
29. BlackSky Gen-3 Constellation. URL: <https://www.blacksky.com/wp-content/uploads/2025/02/BlackSky-Gen-3-Data-Sheet.pdf> (дата звернення: 27.12.2025).
30. Chien S. et al. Flight of Dynamic Targeting on CogniSAT-6 Update. 18<sup>th</sup> International Conference on Space Operations, Montreal, Canada, 2630 May 2025. ID #356. P. 16. URL: <https://ai.jpl.nasa.gov/public/documents/papers/dt-spaceops-2025.pdf> (дата звернення: 28.12.2025).
31. Djebko K. et al. LeLaR: The First In-Orbit Demonstration of an AI-Based Satellite Attitude Controller. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.19576> (дата звернення: 29.12.2025).

Стаття надійшла до редакції 19.01.2026;  
 прийнято до друку після рецензування 16.03.2026;  
 дата публікації 31.03.2026.