

КОМЕРЦІЙНІ УГРУПОВАННЯ МАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Інститут технічної механіки

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

У розвитку дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космосу за останні десять років провідну роль відіграють угруповання малих космічних апаратів (КА), що належать приватним компаніям. Аналіз подібних угруповань, проведений у цьому дослідженні, дав змогу виявити тенденції їх розвитку на найближчі роки, а також появу нових можливостей збирання та оброблення даних. У період 2011–2025 рр. спостерігається багаторазове зростання кількості та чисельності комерційних угруповань. Очікується, що до кінця 2025 р. на орбіті працюватиме 81 угруповання – майже в 12 разів більше, ніж у 2015 р. Найшвидше збільшується чисельність КА мультиспектральної оптичної зйомки. Найбільше нових угруповань з'явиться в галузі теплової інфрачервоної зйомки та гіперспектральної оптичної зйомки. Лідерами за кількістю угруповань і їхньою чисельністю є США і Китай, а серед компаній – Planet Labs (США) і Chang Guang Satellite Technology (Китай). Хоча кількість країн, що створюють власні угруповання малих КА ДЗЗ, постійно збільшується, угруповання країн-лідерів зростають вищими темпами. Дві третіх угруповань мультиспектральної оптичної зйомки призначені для збирання даних із просторовою роздільною здатністю понад 1 м, а три компанії забезпечують збирання даних із роздільною здатністю 30 см. Збільшується чисельність радарних КА за майже незмінної кількості угруповань. Більшість радарних КА ведуть спостереження в Х-діапазоні з роздільною здатністю до 50 см, а компанії ICEYE (Фінляндія/США) і Umbra-SAR (США) пропонують радарні дані з роздільною здатністю 25 см. Активно розвивається напрямок з використання наднизьких орбіт для підвищення якості зйомки. Збільшуються інвестиції в позаземну зйомку для відстеження космічних об'єктів на навколосеземних орбітах з метою запобігання можливих загроз супутниковим угрупованням. Впровадження засобів обробки даних на борту КА та успішні експерименти з лазерного зв'язку між КА відкривають перспективи отримання цільової інформації ДЗЗ у режимі, близькому до реального часу. Значно поширилось використання сигналів ГНСС для цілей ДЗЗ. Це призвело до появи угруповань, що складаються з десятків малих комерційних метеосупутників.

Ключові слова: дистанційне зондування, мультиспектральна зйомка, гіперспектральна зйомка, лідар, радарна зйомка, тепла зйомка, наднизькі орбіти, космічна ситуаційна обізнаність.

In the development of Earth remote sensing (ERS) over the last decade, small spacecraft constellations owned by private companies have played a leading role. The analysis of these constellations carried out in this study allowed one to identify trends in their development for the coming years and possibilities for data collection and processing. Since 2011, a many-fold increase in the number and size of commercial constellations has been observed. It is expected that by the end of 2025 the number of constellations will have reached 81, which is almost 12 times greater than in 2015. The number of multispectral optical imaging satellites is growing at the highest rate. The largest number of new constellations will be involved in thermal infrared imaging and hyperspectral optical imaging. In the number and size of constellations, the leading countries are the USA and China, and the leading companies are Planet Labs (USA) and Chang Guang Satellite Technology (China). Although the number of countries developing their own small-satellite constellations is steadily increasing, the constellations of the leading countries are growing at a higher rate. Two thirds of the multispectral optical imaging constellations are designed to collect data with a spatial resolution greater than 1 m, while three companies collect data with a 30 cm resolution. The number of radar satellites is increasing, while the number of constellations is almost unchanged. Most of the radar satellites work in the X-band with a resolution up to 50 cm, while ICEYE (Finland/USA) and Umbra-SAR (USA) offer radar data with a 25 cm resolution. The use of very low orbits to improve the quality of imagery is under active development. Investments into extraterrestrial imaging to track space objects in near-Earth orbits to prevent possible threats to satellite constellations are increasing. The introduction of onboard data processing facilities and successful experiments on laser communication between satellites open avenues for obtaining targeted ERS information in near-real time. The use of GNSS signals for ERS purposes has become widespread, thus resulting in constellations of dozens of small commercial weather satellites.

Keywords: remote sensing, multispectral imagery, hyperspectral imagery, lidar, radar imagery, thermal imagery, ultra-low orbit, space situational awareness.

Розвиток дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космосу в останнє десятиліття тісно пов'язаний з використанням малих космічних апаратів (КА). Їхнє застосування стало одним із чинників, які дали змогу створювати багатосупутникові угруповання, що зробило дані ДЗЗ доступнішими

широкому колу споживачів. Як правило, подібні угруповання належать комерційним компаніям.

Мета роботи полягає в оцінці наявних можливостей комерційних угруповань малих КА ДЗЗ і перспектив їхнього розвитку на найближчі роки. Аналіз розвитку подібних угруповань є актуальним завданням, розв'язання якого дасть змогу виявити тенденції у зміні параметрів угруповань, характеристик цільової апаратури ДЗЗ, а також появу нових можливостей збирання та оброблення даних.

Під комерційними КА ДЗЗ розуміють КА, якими володіють і керують приватні компанії. Розвиток приватних КА ДЗЗ можна розділити на кілька етапів [1]. Перший етап розпочався на межі 1990–2000-х рр., з появою перших комерційних КА ДЗЗ високої (< 1 м) просторової роздільної здатності – IKONOS і QuickBird. У цей період комерційні компанії управляли окремими КА ДЗЗ або угрупованнями з декількох КА. Початком другого етапу став 2008 р., коли було запущено КА GeoEye-1, що дав змогу одержувати знімки з просторовою роздільною здатністю вище 0,5 м, а поява технології потокового мовлення Google забезпечила швидкий доступ до даних надвисокої роздільної здатності. У серпні 2008 р. одним пуском ракети-носія було виведено на орбіту угруповання з п'яти ідентичних малих супутників RapidEye. Початок третього етапу у 2014 р. пов'язаний з розгортанням на орбіті угруповання Flock компанії Planet Labs. На відміну від створених раніше угруповань, що склалися з декількох супутників з масами понад 100 кг, нове угруповання створювалося з десятків дешевих супутників, заснованих на платформі CubeSat [2], маса яких не перевищувала 10 кг. У 2015 р. почалася експлуатація ракет багаторазового використання компанії SpaceX. Ці ракети дали змогу знизити вартість запуску і виводити на орбіту одночасно десятки КА.

Кількість малих комерційних КА на орбіті стрімко зростає. Так, у 2019 р. було запущено 389 малих КА, що майже вдвічі більше, ніж у 2018 р., і в 6 разів більше порівняно з 2017 р. Майже третину від загального числа КА склали КА ДЗЗ [3].

Інформацію про тенденції розвитку малих КА можна отримати зі щорічних оглядів, які готують компанії BryceTech, NovaSpace та ін. Однак у відкритому друці містяться тільки витяги з цих оглядів, які не розкривають методики отримання висновків. Повні версії оглядів коштують кілька тисяч доларів, що робить їх недоступними для академічної спільноти. Крім того, ці огляди присвячені малим КА загалом, а не зосереджені на аналізі розвитку КА ДЗЗ.

Ця робота дає змогу частково заповнити зазначену прогалину. Вона розвиває результати [4–6], розширюючи період дослідження угруповань КА ДЗЗ і спектр розв'язуваних ними завдань, а також містить оновлені відомості про супутники.

Загальні відомості. До категорії малих комерційних КА віднесено супутники масою від трьох кілограм до 1,2 т. (у заправленому стані), якими володіють і керують приватні компанії.

В якості нижнього порога обрано масу КА форм-фактора CubeSat 3U. КА меншого розміру і маси, як правило, є навчальними і не призначені для збору

даних ДЗЗ у промислових масштабах. Верхній поріг відповідає максимальній масі малих супутників згідно з класифікацією Федерального управління цивільної авіації США [7]. Зазначимо, що в оглядах BguseTech розглядаються т. зв. SmallSat – мініатюрні КА масою менше 600 кг.

Переважає більшість наявних угруповань КА ДЗЗ складається з малих КА і належать приватним компаніям. Виняток становлять супутники Махаг WorldView, суха маса яких перевищує 2 т. У частині володіння угрупованнями КА ДЗЗ винятки становлять Китай та Ізраїль, де значна кількість подібних КА створена і управляється державними компаніями.

Дані про угруповання малих КА ДЗЗ зібрано за період з 1 січня 2011 р. до 1 червня 2024 р. Ситуацію на початок 2008 р. описано в [2, 8]. Основними джерелами інформації про характеристики КА ДЗЗ є бази даних сайтів General Catalog of Artificial Space Objects, NewSpace Index, EOPortal.org, Gunter's Space Page, WMO OSCAR (розділ Space-based capabilities), а також сайти компаній-виробників і операторів супутникових угруповань. Зібрані дані перебувають у відкритому доступі на порталі Zenodo [9].

З початку 2011 р. 34 приватні компанії запустили 457 малих КА ДЗЗ у складі того чи іншого орбітального угруповання. 91 % КА (415) належить 12 компаніям зі США, Китаю, Фінляндії, Франції та Японії (табл. 1).

Табл. 1 – Приватні компанії-оператори найбільших угруповань малих КА ДЗЗ

Компанія	Країна	Число супутників
Planet Labs	США	134
CGST	Китай	124
Satellologic	США	52
ICEYE	Фінляндія	33
BlackSky	США	17
Zhuhai Orbita	Китай	12
Minospace	Китай	11
Geespace	Китай	9
Umbra Lab	США	8
Axelspace	Японія	5
Airbus Defence and Space	Франція	5
Orbital Sidekick	США	5

Прийнято, що угруповання складається з КА, які належать одній приватній компанії і мають ідентичні склад і характеристики знімальної апаратури за заданої висоти орбіти. Таке визначення призводить до того, що супутники Julin-1 китайської компанії Chang Guang Satellite Technology (CGST), які здійснюють мультиспектральну оптичну і відеозйомку земної поверхні, поділяються на 14 угруповань (табл. 2). Під роздільною здатністю в табл. 2 розуміється просторова роздільна здатність даних. Стовець «Рік» містить рік початку розгортання угруповання (запуск супутника-демонстратора вважається початком розгортання). У стовпчику «Число» вказано чисельність угруповання на 1 червня 2024 р.

Табл. 2 – Угрупування КА ДЗЗ китайської компанії CGST, що здійснюють мультиспектральну оптичну та відеозйомку

Назва	Висота , км	Періодич- ність, доб.	Роздільна здатність, м	Кількіст ь	Рік
Jilin-1 Gaofen-02	535	–	0.75	4	2019
Jilin-1 Gaofen-03	579	0.17	1	64	2019
Jilin-1 Gaofen-04	509	–	0.5	1	2022
Jilin-1 Gaofen-05	519	–	–	1	2023
Jilin-1 Gaofen-06	515	–	0.75	30	2023
Jilin-1 Guangxe-A	643	–	0.72	1	2015
Jilin-1 Kuanfu-01	530	1	0.75	3	2020
Jilin-1 Kuanfu-02	523	–	0.5	1	2023
Jilin-1 Mofang-02	535	–	1	4	2022
Jilin-1 Pingtai-01	489	–	–	1	2022
Jilin-1 Pingtai-02	515	–	–	2	2023
Jilin-1 Shipin-01, 02	656	2	–	2	2015
Jilin-1 Shipin-03	535	4.5	–	1	2017
Jilin-1 Shipin-04,...,-08	535	–	–	5	2017

З вимоги приналежності угруповання до однієї приватної компанії є два винятки: угруповання радарних супутників компаній ICEYE і Airbus Defence and Space.

Частина угруповання фінської компанії ICEYE належить і управляється американським підрозділом компанії – ICEYE US. Точної кількості цих супутників не розголошують. Оскільки загальна кількість супутників ICEYE відома, всі вони віднесені до одного угруповання.

Радарне угруповання Airbus складається з трьох супутників: TerraSAR-X, TanDEM-X і PAZ. Супутники TerraSAR-X (запущений 2007 р.) і TanDEM-X (2010 р.) створено в рамках державно-приватного партнерства між Німецьким центром авіації та космонавтики і компанією EADS Astrium (нині – Airbus Defence and Space), що виготовила супутники. Іспанський радарний супутник Paz (2018 р.), виготовлений Airbus, ідентичний TerraSAR-X/TanDEM-X і працює з ними в єдиному угрупованні під управлінням іспанської компанії Hisdesat. Ексклюзивні права на комерційну експлуатацію всіх трьох КА належать Airbus Defence and Space. З огляду на те, що дата запуску двох із трьох супутників угруповання виходить за межі розглянутого інтервалу часу, а їхня маса (приблизно 1200 кг) перебуває на межі розділу між малими і «звичайними» КА, ми виключили це угруповання з розгляду.

Найбільші за чисельністю супутникові угруповання має американська компанія Planet (табл. 1). Її угруповання оглядового знімання Flock складається з апаратів власного виробництва Dove і SuperDove. КА угруповання детального знімання Planet SkySat виготовлені компанією Maxar Space Infrastructure (США).

Другим за чисельністю «флотом» КА ДЗЗ володіє китайська компанія CGST, КА Jilin-1 якої виконують оптичну мультиспектральну, гіперспектральну, а також відеозйомку поверхні Землі (табл. 1, 2).

Дві наступні за чисельністю угруповань компанії пов'язані зі США (табл. 1). Satellogic спочатку була зареєстрована на Британських Віргінських островах, а її головний офіс знаходився в Аргентині. Зараз компанія зареєстрована у США і завершує процес переїзду в цю країну. Значна частина угруповання фінської ICEYE належить і управляється її американською

філією ICEYE US. Низка компаній (окрім китайських), що володіють меншими угрупованнями, також створили філії в США, сподіваючись отримати замовлення від американських військових і розвідувальних організацій.

На рис. 1 показано розподіл угруповань КА ДЗЗ за типами зібраних даних за 2011–2025 рр. Зазначимо загальне зростання кількості угруповань ДЗЗ, а також зростання різноманітності застосовуваних методів спостереження. Якщо в 2011–2015 рр. на орбіті працювало всього 7 угруповань комерційних КА ДЗЗ, призначених для мультиспектральної зйомки, то в наступні п'ять років з'явилися угруповання радарної, гіперспектральної та теплової зйомки, а загальне число угруповань зросло до 19. Кількість угруповань усіх видів продовжує зростати. Особливо різке зростання спостерігається в угруповань мультиспектральних, гіперспектральних і теплових КА. До кінця 2025 р. на орбіті має працювати 81 угруповання комерційних КА ДЗЗ – майже в 12 разів більше, ніж у 2015 р.

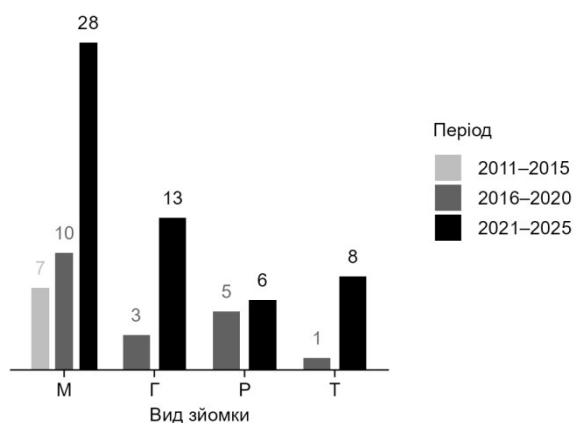


Рис. 1 – Число угруповань малих комерційних КА ДЗЗ з 2011 р. до 2025 р. за видами зйомки (М – мультиспектральна, Г – гіперспектральна, Р – радарна, Т – тепла)

Найпоширенішим видом спостереження з космосу протягом усього періоду 2011–2025 рр. є мультиспектральна оптична зйомка. Згідно з планами компаній, до кінця 2025 р. кількість угруповань гіперспектральної та теплової зйомки, перевищить кількість угруповань, що здійснюють радарну зйомку. Однак ці угруповання буде представлено поодинокими супутниками (масове їх розгортання передбачається після 2025 р.), тож загальна кількість радарних супутників буде більшою.

Розподіл супутникових угруповань КА ДЗЗ за країнами реєстрації компаній-операторів показано на рис 2.

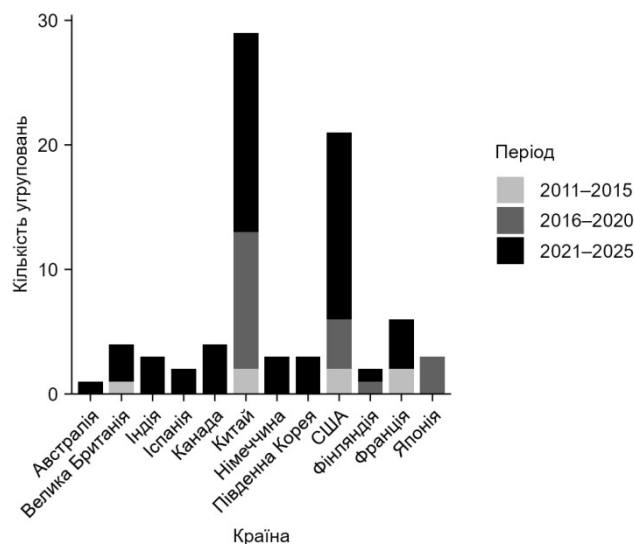


Рис. 2 – Чисельність угруповань малих комерційних КА ДЗЗ за країнами

Кількість країн, що створюють угруповання малих КА ДЗЗ, до 2025 р. зросте втричі порівняно з 2015 р. До лідерів, США і Китаю, прагне наблизитися низка країн, насамперед Японія, Франція і Велика Британія, які створюють одразу кілька угруповань.

Розподіл кількості запускених супутників за країнами показано на рис. 3.

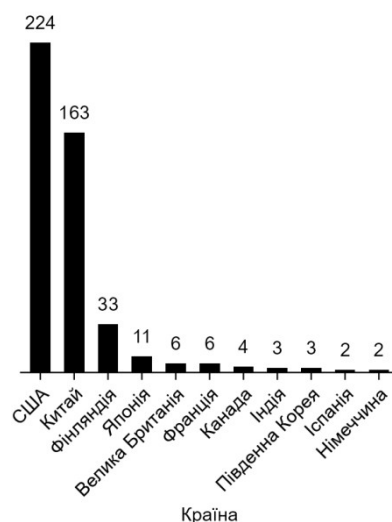


Рис. 3 – Кількість супутників за країнами

Розподіл угруповань малих КА ДЗЗ за роками початку розгортання наведено на рис. 4.

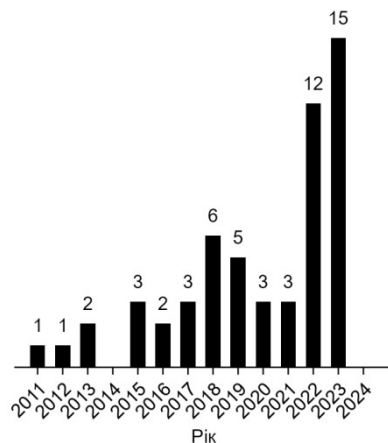


Рис. 4 – Угрупування малих комерційних КА ДЗЗ за роками початку розгортання

Переважає більшість угруповань складається з КА масою до 250 кг (рис. 5). Для чверті угруповань (23 із 81) дані про масу відсутні. Залежності між масою КА і часом початку розгортання угруповання не виявлено.

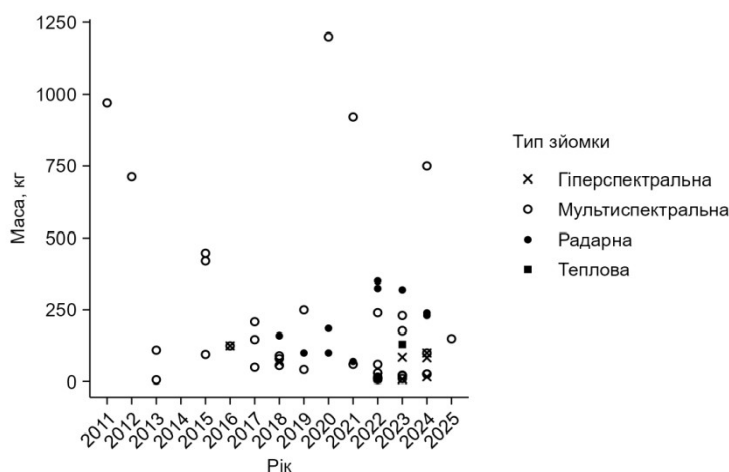


Рис. 5 – Маса КА ДЗЗ залежно від часу початку розгортання угруповання

Оптична мультиспектральна та відеозйомка. Оптична мультиспектральна зйомка здійснюється в декількох (десятках) спектральних каналах, що належать до діапазону видимого, ближнього інфрачервоного і короткохвильового інфрачервоного випромінювання (400–2500) нм. Відеозйомка земної поверхні, як правило, здійснюється в діапазоні видимого світла.

Наразі на орбіті перебувають 42 угрупування мультиспектральної та відеозйомки (два угрупування планують почати розгортати у 2025 р.), які складаються з 342 супутників (75 % від загальної кількості комерційних КА ДЗЗ). Серед них 53 % (180 КА) належать компаніям зі США, 42 % (142) – Китаю, і 6 % (20) іншим країнам. Понад 80 % супутників належать п'яти компаніям: трьом американським – Planet Labs, Satellogic і BlackSky, та двом китайським – CGST і Geespace.

Розподіл угруповань оптичної зйомки залежно від максимальної просторової роздільної здатності показано в табл. 3. Максимальна просторова роздільна здатність належить до панхроматичного каналу, а в разі його відсутності – до одного з каналів видимого світла.

Табл. 3 – Число угруповань КА оптичної зйомки залежно від максимальної просторової роздільної здатності

Максимальна просторова роздільна здатність, м	Число угруповань
0 – 0,3	5
0,3 – 0,5	4
0,5 – 0,7	3
0,7 – 1	11
1 – 5	11
5 – 10	1

Для 10 угруповань максимальна просторова роздільна здатність невідома.

Оптичні дані ДЗЗ із просторовою роздільною здатністю (0,1–1) м, призначені для розв'язання завдань високодетального і надвисокодетального спостереження Землі (моніторингу об'єктів), становлять 66 % від загальної кількості даних. 31 % становлять дані з просторовою роздільною здатністю (1–5) м, призначені для моніторингу територій.

Приватними КА з найвищою просторовою роздільною здатністю (30 см) володіють лише три компанії: американські Maxar і Planet Labs (сенсори вироблені Maxar), а також європейська Airbus Defence and Space. Запуск КА компанії Albedo на наднизьку навколоземну орбіту, який має виконувати зйомку у видимому діапазоні з роздільною здатністю 10 см, заплановано на 2025 р. Зазначимо, що на ринку даних ДЗЗ знімки з роздільною здатністю 30 см наразі пропонують чотири країни: Китай (SuperView Neo-1, Beijing-3N), США (WorldView Legion), Франція (Pléiades Neo) та Ізраїль (EROS-C).

Переважає більшість угруповань мультиспектральних КА здатна вести зйомку в діапазонах видимого (червоний, зелений і синій канали) та ближнього інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. Із 45 угруповань 6 мають канали «red edge», чутливі до змін параметрів фотосинтезу. КА перспективного канадського угруповання EarthDaily також матимуть короткохвильові ІЧ-канали.

КА угруповань SkySat (Planet), Jilin-1 Gaofen-03 (CGST), Jilin-1 Shipin (CGST) і Zhuhai-1 OVS (Zhuhai Orbita) мають можливості відеозйомки у видимому діапазоні (4K HD). Частота кадрів відео становить 25–30 кадрів на секунду. Тривалість запису коливається в межах від 60 с до 120 с.

Особливістю супутника Jilin-1 Kuanfu-02 (у перспективі – це перший супутник однойменного угруповання) є широка смуга огляду. Замість характерних для інших подібних супутників одиниць кілометрів вона становить 150 км.

Два перспективні угруповання ДЗЗ планують вести одночасно два види зйомки: французьке JAPETUS має здійснювати мульти- і гіперспектральну зйомку, а іспанське Guardian – мультиспектральну і теплову зйомку.

Оптична гіперспектральна зйомка здійснюється в десятках/сотнях спектральних каналах у діапазоні (400–2500) нм. Ширина спектральних каналів не перевищує 10 нм.

Загальна кількість угруповань КА гіперспектральної зйомки – 16. Наразі на орбіті перебуває 49 супутників (11 % від загальної кількості КА ДЗЗ).

Більше половини запускених приватних КА, що здійснюють гіперспектральну зйомку, належать компанії Satellogic (26 КА) і одночасно виконують мультиспектральну зйомку з високою роздільною здатністю. Друге і третє місця посідають китайська Zhuhai Orbita (8 КА) і американська Orbital Sidekick (5 КА). КА гіперспектральної зйомки запуснені дев'ятьма компаніями зі США, Китаю, Індії, Канади та Великої Британії. У найближчі кілька років подібні КА планують запустити Австралія, Фінляндія і Франція. На відміну від інших країн, Китай володіє значним угрупованням малих гіперспектральних КА, якими володіють державні компанії.

Майже половина угруповань (7 із 16) почне розгортатися у 2025 р. Найбільш амбітні плани щодо чисельності майбутніх угруповань у канадського GenMat (600 КА) і фінського Hyperfield (100 КА). В угрупованні GenMat передбачається обмежити спостереження видимим і ближнім ІЧ діапазоном. Розгортання Hyperfield має завершитися у 2030 р. і забезпечити зйомку будь-якої ділянки Землі у видимому, ближньому ІЧ і короткохвильовому ІЧ діапазонах із частотою 2–3 рази на добу. Компанія Kuva Space, власник Hyperfield, уклала п'ятирічний контракт із Європейською комісією на постачання гіперспектральних даних для програми Copernicus Contributing Mission.

У 12 із 16 угруповань просторова роздільна здатність даних становить (5–10) м, ще два угруповання забезпечують роздільну здатність (25–30) м. Лише одне перспективне угруповання XCraft обіцяє збирати дані з роздільною здатністю 2 м.

Передбачається, що КА XCraft матимуть можливість здійснювати відеозйомку, характеристики якої наразі невідомі.

Теплова зйомка ведеться в діапазоні теплового ІЧ випромінювання (8000–14000) нм. Наразі на орбіті перебуває 4 угруповання комерційних КА теплової зйомки, що налічують 12 супутників (менше ніж 3 % від загального числа малих КА ДЗЗ). Ще два угруповання передбачається почати розгортати у 2025 р. Лідерами є китайська CGST (8 КА) та німецька OroraTech (2 КА). По одному КА у британської компанії SatVu та іспанської Aistech Space.

Цільові характеристики китайських КА Jilin-1 Hongwai (CGST) невідомі. КА OroraTech ведуть зйомку з просторовою роздільною здатністю 80 м. Нагадаємо, що загальнодоступні дані Landsat TIRS мають роздільну здатність 100 м.

Супутник HotSat-1 британської SatVu здійснює спостереження в середньохвильовому ІЧ діапазоні (3400–5000) нм. Це дає змогу спростити датчики, знизити їхню вартість і досягти більш високої просторової роздільної здатності (3,5 м). Разом з тим, такий вибір діапазону обмежує застосування даних у завданнях спостереження низькотемпературних об'єктів.

Компанія Albedo (США) планує вести теплову зйомку з роздільною здатністю 2 м за рахунок використання наднизьких навколоземних орбіт.

Німецькі компанії OroraTech і Constellr планують у найближчому майбутньому створити угруповання зі 100 і 30 КА відповідно. Угруповання HYDRA іспанської компанії Aistech Space за планами налічуватиме 22 КА.

Мультиспектральна теплова зйомка на комерційних КА ДЗЗ не представлена. Теплова зйомка здійснюється в одному спектральному каналі.

Радарна зйомка. Перші комерційні угруповання радарних КА, ICEYE і Capella Space, почали розгортатися на орбіті у 2018 р. Наразі на орбіті

перебуває 11 угруповань КА, що виконують радарну зйомку поверхні Землі. До складу цих угруповань входить 60 супутників (13 % від загального числа малих КА ДЗЗ).

Радарні супутники запускають компанії зі США, Фінляндії, Китаю та Японії. Лідерами за чисельністю угруповань є фінська компанія ICEYE (33 КА, 55 % від загальної кількості радарних КА), а також американські Umbra Lab (8 КА) і Capella Space (4 КА).

Найбільше компаній, що створюють радарні угруповання, працює в Китаї: Spacety, Galaxy Space, Minospace і Zhihui Space Tech. Разом вони запустили 9 КА. Китайські компанії розпочали роботу зі створення радарних КА пізніше за ICEYE і компанії зі США, проте угруповання PIESAT (Galaxy Space), яке почали створювати у 2023 р., вже налічує 4 КА.

В Японії радарні угруповання компаній iQPS (QPS-SAR) і Synspective (StriX) разом налічують 6 КА.

Переважає більшість угруповань радарних КА ведуть спостереження в Х-діапазоні (довжини хвиль: (2,4–3,5) см.) Китайська Spacety створює угруповання з радарів Х- і С-діапазонів (3,8–7,5) см. Обидва діючі супутники компанії, Hisea-1 і Chaohu-1, ведуть зйомку в С-діапазоні. КА Taijing-4 03 (Minospace, Китай) здійснює зйомку в Ku-діапазоні (1,67–2,5) см.

Комерційні радарні КА ведуть зйомку в режимі однієї поляризації. Найчастіше використовується поляризація VV (Vertical-Vertical – випромінюваний і прийнятий сигнали мають вертикальну поляризацію). Угруповання Capella Space і Umbra-SAR ведуть зйомку в одній із поляризацій: VV або HH (Horizontal-Horizontal).

Більшість компаній досягла наземної просторової роздільної здатності 50 см у прожекторному режимі зйомки (Spotlight). ICEYE і Umbra-SAR з 2024 р. пропонують дані з роздільною здатністю 25 см. ICEYE стверджує, що така роздільна здатність дає змогу ідентифікувати типи транспортних засобів і військової техніки без додаткової розвідки [10].

Просторова роздільна здатність 25 см отримана ICEYE в режимі зйомки Dwell Precise – дуже тривалому прожекторному режимі. Завдяки малій масі (< 100 кг) і порівняно невеликому розміру антени, КА ICEYE може дивитися на одну й ту саму точку поверхні протягом 25 с. Застосування звичайних методів формування зображень до таких даних дає змогу домогтися дуже високої азимутальної роздільної здатності, яка зазвичай обмежує підсумкову просторову роздільну здатність даних [10].

Режими зйомки Dwell КА ICEYE також дають змогу знімати короткі відео (до 25 кадрів) [11, 12].

Відзначимо низку нових напрямів розвитку комерційного ДЗЗ, що з'явилися за останні кілька років.

Наднизькі навколоземні орбіти (Very Low Earth Orbit, VLEO) – це орбіти, які лежать нижче орбіти Міжнародної Космічної станції на висотах (160–400) км. Опір атмосфери на таких орбітах набагато вищий, ніж на традиційних орбітах супутників ДЗЗ (500–700) км, а отже час існування супутників буде набагато меншим. Проте використання VLEO обіцяє низку важливих переваг:

- зменшення висоти польоту супутника з 650 км до 160 км приводить до 64-кратного зниження потужності радара і 16-кратного зниження потужності антени зв'язку [13];

- зменшення висоти польоту приводить до чотирикратного зменшення оптичної апертури для досягнення вихідної просторової роздільної здатності даних. Таким чином малий КА з недорогою апаратурою зможе забезпечити якість зйомки, близьку до передових КА ДЗЗ. Вважається, що VLEO-супутники зможуть виконувати оптичну зйомку поверхні Землі з роздільною здатністю 10 см на піксель [14];

- виводити супутники на VLEO дешевше, а отже, скоротяться витрати на запуск. Проекти із запуску недорогих ракет-носіїв з непідготовлених стартових майданчиків підтримувалися DARPA у 2018–2020 рр. [15];

- опір атмосфери очищатиме VLEO від космічного сміття.

Основною проблемою використання VLEO є підтримання висоти орбіти КА протягом досить тривалого часу. У європейській місії GOCE (255 км, термін активного існування – 4,5 роки) і японській SLATS (200 км, майже 2 роки) висоту орбіти підтримували іонним двигуном, що працює на ксеноні [16]. Сучасні двигуни такого типу вимагають занадто великого запасу палива, що зводить нанівець переваги від використання наднизьких орбіт [17]. Необхідний більш економічний двигун, роботи зі створення якого ведуться в декількох країнах.

Наразі американські компанії Skeyeon, Earth Observant, Albedo і Redwire, а також європейська Thales Alenia Space, оголосили про плани зі створення і запуску протягом кількох найближчих років супутників на VLEO [13, 17]. При цьому Redwire розробляє відразу дві супутникові платформи для роботи на наднизьких орбітах – SabreSat і Phantom [18].

Зазначимо, що в межах VLEO, ймовірно, є свій поділ орбіт за висотою. У грудні 2024 р. було запущено Haishao-1 – китайський супутник ДЗЗ з розрахунковою висотою орбіти 350 км. Він оснащений мультиполяризаційним радаром, який веде зйомку в Х-діапазоні з просторовою роздільною здатністю понад 1 м, а також камерою для нічної зйомки. Haishao-1 є першим комерційним КА ДЗЗ, що дає змогу вести одночасно радарну й оптичну зйомку, і, одночасно, першим комерційним радарним супутником на VLEO. Однак, серед численних рекордів цього КА, немає згадок про двигун [19]. Можливо, що обрана висота орбіти Haishao-1 може підтримуватися традиційним іонним двигуном.

Позаземна зйомка. У 2021 р. Maxar Intelligence (США) стала першою компанією, яка отримала ліцензію на проведення позаземної зйомки (non-Earth imaging, NEI) для державних і комерційних цілей. Супутники Maxar можуть збирати і поширювати зображення космічних об'єктів на низькій навколоземній, середній навколоземній і геостаціонарній орбітах. Угруповання Maxar здатне отримувати зображення об'єктів на низькій навколоземній орбіті з роздільною здатністю менше ніж 15,24 см, а також підтримувати стеження за об'єктами на інших навколоземних орбітах [20]. Подібні можливості має й інша американська компанія – оборонний підрядник BlackSky.

Поява ліцензій на позаземну зйомку викликана інтересом до неї з боку урядових організацій США, зокрема, Національного агентства геопросторової розвідки (NGA). Позаземна зйомка є частиною заходів щодо забезпечення обізнаності про обстановку в космосі (space situational awareness, SSA), які передбачають стеження за космічними об'єктами в режимі реального часу. В умовах зростаючого використання космічного простору у військових цілях, країни НАТО планують збільшити інвестиції в

SSA для запобігання можливих загроз своїм супутниковим угрупованням [21].

Обробка даних на борту. Обчислювальні можливості супутників, які різко зросли останніми роками, дають змогу виконувати оброблення даних ДЗЗ безпосередньо на борту, не чекаючи передавання на Землю. Це дає змогу істотно скоротити навантаження на канали зв'язку. Наприклад, у задачі моніторингу руху морських суден замість передавання на Землю радарних знімків можна передавати лише координати суден, знайдені алгоритмом, застосованим на борту КА.

Впровадженню методів обробки даних на борту КА ДЗЗ сприяє розвиток спеціальних процесорів і алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) – основи сучасних методів вилучення цільової інформації з даних. Американські компанії Aptos Orbital і Sidus Space, а також ірландська Ubotica вже випробовують на орбіті свої пристрої для обробки даних ДЗЗ.

Супутник ESA Фsat-2 масою близько 6 кг, який запустили 2024 р., оснащений мультиспектральною камерою і потужним комп'ютером, здатним аналізувати й обробляти зображення в режимі реального часу. На борту супутника запущено шість ШІ-додатків, які виявляють на знімках хмари, виявляють і класифікують судна, стискають зображення, виявляють аномалії в морських екосистемах, а також виявляють лісові пожежі [22].

Міжсупутниковий зв'язок. Сучасні супутники ДЗЗ нагадують ізольовані комп'ютери, не пов'язані з хмарними середовищами. Їм заважають брак бортової обчислювальної потужності та багатогодинні проміжки між сеансами зв'язку. Для того щоб супутники ДЗЗ отримали можливість використовувати сторонні обчислювальні ресурси і стали такими ж доступними, як звичайні комп'ютери, необхідно поліпшити зв'язок між супутниками, а також зв'язок супутників з наземними станціями.

Низка компаній, що володіють геостационарними супутниками, надає послуги передачі даних через свої супутники. Передбачається, що супутники ДЗЗ, які перебувають на низьких орбітах, зможуть швидше передавати дані, скорочуючи час отримання знімків кінцевим користувачем [23]. Досліджуються можливості використання низькоорбітальних систем супутникового Інтернету для передавання даних ДЗЗ у режимі реального часу [24].

Суттєво підвищити оперативність передачі даних ДЗЗ дає змогу лазерний міжсупутниковий зв'язок. Замість того, щоб чекати на сеанс зв'язку з наземним пунктом, інформацію передають від супутника до супутника, і її скидають на Землю, щойно така можливість виникне хоча б в одного із супутників угруповання.

У 2021 р. Агентство космічних розробок Космічних сил США (SDA) випустило набір технічних специфікацій, яким мають відповідати лазерні термінали зв'язку, щоб претендувати на отримання контрактів SDA [25]. Лазерні термінали забезпечують набагато вищу швидкість передачі даних, ніж традиційні радіочастотні канали зв'язку, і їхні сигнали важче перехопити. Мережа супутників із лазерним зв'язком знижує залежність від наземних станцій і розширює зону покриття до віддалених районів, де наземні станції недоступні.

Низка успішних експериментів з реалізації лазерного міжсупутникового зв'язку на орбіті проведена китайськими фахівцями. Так, в експерименті на супутниках приватної компанії CGST було досягнуто швидкості передавання даних 100 Гб/с [26].

Можливості оперативної зйомки, які забезпечує велике супутникове угруповання, оброблення даних на борту супутника та їх передача на Землю в режимі реального часу відкривають нові можливості застосування систем ДЗЗ. Відомо відео, зняте КА Jilin-1 китайської компанії CGST, на якому, імовірно, зображено американський винищувач F-22 Raptor [27]. CGST має одне з найбільших супутникових угруповань і відпрацьовує лазерний зв'язок між супутниками. У перспективі, можливості подібних приватних компаній можуть звести нанівець переваги застосування стелс-технологій на військових літаках.

У 2024 р. Китайська аерокосмічна науково-промислова корпорація (CASIC) почала реалізацію проєкту зі створення супутникового угруповання ДЗЗ на наднизьких орбітах. Повністю розгорнуте угруповання до 2030 р. має складатися з 300 КА [28].

Уже запущено супутник-демонстратор угруповання (Chutian 001), а у 2025 р. планується запустити ще 9 КА для формування демонстраційного кластера. Паралельно створюється система доступу до даних ДЗЗ, яка має забезпечити виконання замовлень на зйомку протягом 1 доби.

На наступному етапі робіт буде побудовано угруповання різнотипних КА ДЗЗ, що включатиме КА мультиспектральної та гіперспектральної оптичної зйомки, теплової інфрачервоної зйомки, радарні та інші види ДЗЗ, з можливістю зйомки заданої ділянки поверхні протягом 15 хв. після отримання замовлення. На завершальному етапі робіт планується скоротити час доступу до даних ДЗЗ до 10 хв.

Створювана система ДЗЗ матиме набагато більше можливостей, ніж угруповання CGST, оскільки в ній представлено різні методи ДЗЗ, а наднизькі орбіти мають забезпечити надвисоку просторову роздільну здатність даних.

Використання сигналів наявних супутників. Новим напрямком ДЗЗ є використання для спостережень сигналів, випромінюваних супутниками навігації та зв'язку в мікрохвильовому діапазоні. Для опису цієї групи методів ДЗЗ використовується термін «signals of opportunity» (SoOp).

Методи SoOp зазвичай працюють за схемою бістатичного радару. У таких радарних передавач і приймач (або кілька приймачів) розташовуються окремо один від одного. Сигнали передавача розсіюються об'єктом спостереження (ціллю). Приймач приймає сигнали передавача разом із сигналами, розсіяними ціллю.

Широко поширені глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) працюють у мікрохвильовому L-діапазоні (довжини хвиль: (15–30) см). Універсальні та загальнодоступні сигнали ГНСС дають високоточний, безперервний і всепогодний інструмент ДЗЗ. За допомогою відбитих сигналів ГНСС визначають рівень поверхні океану, швидкість і напрямок вітру над океаном, вологість ґрунту, товщину льоду і снігу. Цей метод називається ГНСС-рефлектометриєю [29].

Методи SoOp потребують лише приймача сигналу, який має набагато менші габарити, масу та енергоспоживання, ніж передавач. Тому супутники для ГНСС-рефлектометрії можна зробити набагато легшими, дешевшими і простішими, ніж радарні супутники L-діапазону. У результаті космічний сегмент ГНСС-рефлектометрії, як правило, реалізується на базі малих КА. Крім того, методи SoOp не вимагають отримання дозволів на використання спектра, використовуючи сигнали передавачів, які вже мають таку ліцензію.

У Китаї ГНСС-рефлектометрія широко застосовується на метеорологічних супутниках як державних (FenYun), так і комерційних (YunYao-1 і Tianmu-1).

Другий вид методів SoOp – це використання сигналів у Р-діапазоні (240–500) МГц для вимірювання гідрологічних змінних: вологість ґрунту в прикореневій зоні та водного еквівалента снігу. У квітні 2024 р. на орбіту запущено КА SNOOPI (SigNals Of Opportunity: P-band Investigation), призначений для вимірювання вологості ґрунту крізь густу рослинність і оцінювання водного еквівалента снігу. КА являє собою наносупутник форм-фактора CubeSat 6U. Для вимірювань використовуються сигнали угруповання геостационарних супутників MUOS – системи вузькосмугового зв'язку Космічних сил США [30].

У [31] розглядається використання широкосмугових (~1 ГГц) сигналів зв'язку в Ku-діапазоні (12–18) ГГц і вище для вимірювань висоти (альтиметрії) морської поверхні з точністю до сантиметра. Угруповання пасивних приймачів SoOp, вартість якого оцінюють значно дешевше, ніж вартість одного активного радарного альтиметра, здатне істотно збільшити область покриття даними, особливо в прибережних регіонах.

У майбутньому, з впровадженням технологій лазерного зв'язку, відкриються можливості використання лазерних сигналів в цілях ДЗЗ [32].

Спостереження SoOp володіють деякими властивостями, спільними для активної радіолокації та пасивної радіометрії, але також мають унікальні особливості. Реалізація всього потенціалу SoOp потребуватиме розроблення нових приладів, алгоритмів обробки сигналів і методів асиміляції даних.

Метеорологічні супутники. В останнє десятиліття спостерігається розширення сфери застосувань комерційних КА ДЗЗ. Серед нових напрямів слід відзначити створення приватних метеорологічних супутників.

У 2016 р. Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) почало пошук постачальників комерційних метеоданих. Наразі NOAA використовує для прогнозування погоди дані радіозатемнених вимірювань, отримані супутниковими угрупованнями американських компаній Spire, GeoOptics і PlanetIQ [33].

Радіозатменні вимірювання використовують заломлення сигналів ГНСС і, таким чином, належать до методів SoOp. За ними можна відновити температуру, тиск і вологість атмосфери в площині орбіти. Крім того, радіозатменний метод дає змогу визначити значення електронної щільності в іоносфері.

У 2024 р. до використання комерційних даних радіозатемнених вимірювань для поліпшення прогнозів погоди приступило Китайське метеорологічне управління. Постачальниками даних є угруповання з 23 супутників Tianmu-1 і 12 супутників Yunyao-1 [34].

Компанія Tomorrow.io (США) розробляє угруповання малих метеорологічних КА, оснащених радаром і мікрохвильовими радіометрами в інтересах Військово-повітряних сил США [35]. Ще одна американська компанія, Muon Space, планує створення угруповання малих метеосупутників MuSat подвійного призначення. У перших супутниках угруповання для спостережень використовується метод ГНСС-рефлектометрії [36].

Висновки. Спостерігається значне зростання кількості комерційних угруповань малих КА ДЗЗ: до кінця 2025 р. на орбіті має працювати 81 подібне угруповання – майже в 12 разів більше, ніж у 2015 р. Найбільше нових угруповань з'явиться в галузі теплової інфрачервоної зйомки та

гіперспектральної оптичної зйомки (ефект низької бази). Найшвидше збільшується чисельність КА мультиспектральної оптичної зйомки.

Лідерами за кількістю угруповань та їхньою чисельністю є США і Китай. Незважаючи на те, що кількість країн, які розробляють власні угруповання малих КА ДЗЗ, постійно збільшується, угруповання країн-лідерів зростають швидшими темпами. Серед дванадцяти компаній, що володіють 91 % малих КА ДЗЗ, п'ять американських компаній і чотири китайських. Супутникові угруповання компаній Planet (США) і CGST (Китай) налічують понад сотню КА різних видів.

Дві третіх угруповань мультиспектральної оптичної зйомки призначені для збору даних із просторовою роздільною здатністю < 1 м для вирішення завдань детального спостереження. При цьому КА з найвищою просторовою роздільною здатністю (30 см) мають лише три компанії: американські Maxar і Planet Labs, та європейська Airbus Defence and Space.

Більшість наявних і перспективних угруповань радарних КА ведуть спостереження в Х-діапазоні. Радари угруповань китайських компаній Spacety і Minospace також здійснюють зйомку в С- і Ku-діапазонах. Більшість компаній досягла наземної просторової роздільної здатності 50 см, а компанії ICEYE (Фінляндія/США) і Umbra-SAR (США) пропонують радарні дані з роздільною здатністю 25 см.

Понад половина запущених приватних КА гіперспектральної оптичної зйомки належать компанії Satellogic, яка нині переїжджає до США. Майже половина угруповань гіперспектральної зйомки почне розгортатися у 2025 р. Подібна ситуація спостерігається і серед угруповань теплової зйомки.

Активно розвивається напрямок з використання наднизьких орбіт для підвищення якості зйомки. Однак проблему підтримання висоти таких орбіт усе ще не вирішено.

Збільшення інвестицій у космічну ситуаційну обізнаність для запобігання можливих загроз супутниковим угрупованням, передусім у США, викликало зростання інтересу до завдань позаземної зйомки для відстеження космічних об'єктів на навколоземних орбітах.

Обробка даних на борту і лазерний зв'язок між КА в найближчій перспективі дадуть змогу отримувати цільову інформацію з КА в режимі, близькому до реального часу, що відкриває нові можливості застосування систем ДЗЗ.

Широкого поширення набуло використання сигналів ГНСС для цілей ДЗЗ. Це дало змогу реалізувати космічний сегмент відповідних систем ДЗЗ на малих КА і призвело до появи угруповань комерційних метеосупутників. Наразі методи ГНСС-рефлектометрії та ГНСС-радіозатемнених вимірювань застосовуються на десятках КА.

1. Garg P. K. Remote Sensing: Theory and Applications. Boston, Mercury Learning and Information, 2024. <https://doi.org/10.1515/9781501522840>
2. Kramer H. J. Observation of the Earth and Its Environment. Berlin, Springer, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56294-5>
3. Bryce Space and Technology. Smallsats by the Numbers 2020. URL: https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2020.pdf (дата звернення: 09.01.2025).
4. Волошенюк О. Л. Світові тенденції розвитку низькоорбітальних космічних систем оптико-електронного спостереження Землі. Технічна механіка. 2020. № 3. С. 39–53. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.039>
5. Volosheniuk O. L., Pyrozhenko O. O. Requirements for the parameters of synthetic aperture radars onboard small satellites for Earth remote sensing. Технічна механіка. 2024. № 4. С. 55–65. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.055>

6. Храмов Д. О., Волошенко О. Л. Аналіз стану і тенденції розвитку орбітальних угруповань малих космічних апаратів для вирішення завдань землеробства. Технічна механіка. 2023. № 4. С. 31–39. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.031>
7. 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>
8. Kramer H. J., Cracknell A. P. An overview of small satellites in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. V. 29, N 15. P. 4285–4337. <https://doi.org/10.1080/01431160801914952>
9. Khramov D. Constellations of small commercial earth remote sensing satellites (2011 - 2025) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13956290>
10. ICEYE Dwell modes. URL: <https://www.iceye.com/sar-data/imaging-modes/dwell> (дата звернення: 09.01.2025).
11. Laurila P. CEYE SAR Videos Published: Technical Insights and Highlights. URL: <https://www.iceye.com/blog/iceye-sar-videos-published-technical-insights-and-highlights> (дата звернення: 09.01.2025).
12. ICEYE SAR Video. URL: <https://sar.iceye.com/5.2.4/productFormats/vid/> (дата звернення: 09.01.2025).
13. Bacon A., Olivier B. Skimsats: bringing down the cost of Earth Observation. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-34024-1_1 (дата звернення: 09.01.2025).
14. Werner D. How low can satellites go? VLEO entrepreneurs plan to find out. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/how-low-can-satellites-go-vleo-entrepreneurs-plan-to-find-out/> (дата звернення: 09.01.2025).
15. DARPA Launch Challenge. URL: <https://www.darpa.mil/launchchallenge> (дата звернення: 09.01.2025).
16. JAXA terminates the operation of TSUBAME, a Super Low Altitude Test Satellite (SLATS). URL: <https://global.jaxa.jp/press/2019/10/20191002a.html> (дата звернення: 09.01.2025).
17. Thales Alenia Space and QinetiQ to pave the way for small multimission satellites in Very Low Earth Orbit. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-and-qinetiq-pave-way-small-multimission> (дата звернення: 09.01.2025).
18. Foust J. Redwire announces second VLEO satellite platform. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/redwire-announces-second-vleo-satellite-platform/> (дата звернення: 09.01.2025).
19. Haishao-1. URL: <https://mp.weixin.qq.com/s/6AnwloNaquavx6D6fJMRg> (дата звернення: 09.01.2025).
20. Maxar. Non-Earth Imaging. URL: <https://www.maxar.com/maxar-intelligence/products/non-earth-imaging> (дата звернення: 09.01.2025).
21. Flewelling B. Op-Ed: NATO Must Prioritize Tracking, Info Sharing in Orbit. *Payload*. URL: <https://payloadspace.com/op-ed-nato-must-prioritize-tracking-info-sharing-in-orbit/> (дата звернення: 09.01.2025).
22. ESA - Фсат-2. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Phsat-2 (дата звернення: 09.01.2025).
23. Chen J. et al. A remote sensing data transmission strategy based on the combination of satellite-ground link and GEO relay under dynamic topology. *Future Generation Computer Systems*. 2023. N. 145. P. 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.02.016>
24. Zhang P. et al. Near Real-Time Remote Sensing Based on Satellite Internet: Architectures, Key Techniques, and Experimental Progress. *Aerospace*. 204. V. 11, N 2. P. 167. <https://doi.org/10.1016/j.aerospace.2023.1020167>
25. SDA. Optical Communications Terminal (OCT). Standard Version 3.0. URL: <https://www.sda.mil/wp-content/uploads/2022/04/SDA-OCT-Standard-v3.0.pdf> (дата звернення: 09.01.2025).
26. Chinese company completes ultra-high-speed remote sensing image laser transmission test. *Xinhua*. URL: <https://english.news.cn/20241229/bf791f77f5ba4d44b6bff61f9af0087f/c.html> (дата звернення: 09.01.2025).
27. Video shows Chinese Satellite has tracked a seeming F22 fighter jet flying through sky. *Infoworld*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=VxKSJck7gls> (дата звернення: 09.01.2025).
28. Sky Constellation Technology Validation Star Planned for Launch This Year: 300 Satellites to be Grouped in the Network. URL: <https://tech.ifeng.com/c/8Z6DNqUpQcP> (дата звернення: 09.01.2025).
29. Rodriguez-Alvarez N., Munoz-Martin J. F., Morris M. Latest Advances in the Global Navigation Satellite System–Reflectometry (GNSS-R) Field. *Remote Sens.* 2023. N 15. P. 2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157>
30. Garrison J. L. et al. SNOOP: Demonstrating Earth remote sensing using P-band signals of opportunity (SoOp) on a CubeSat. *Advances in Space Research*, 2024. V. 73, N 6. P. 2855–2879. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.10.050>
31. Ho S. C. et al. Wideband Ocean Altimetry Using Ku-Band and K-Band Satellite Signals of Opportunity: Proof of Concept. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2019. V. 16, N 7. P. 1012–1016. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2891976>
32. Dmytryshyn M., Crook M., Sands T. Lasers for Satellite Uplinks and Downlinks. *Science*. 2021. V. 3, N 1. P. 4. <https://doi.org/10.3390/sci3010004>
33. Werner D. GeoOptics, PlanetIQ and Spire to supply NOAA with space weather data. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/noaa-cwdp-space-weather/> (дата звернення: 09.01.2025).
34. WMO. Data from commercial meteorological small satellites were allowed to enter China's meteorological operational system for the first time. URL: <https://wmo.int/media/news-from-members/data-from-commercial-meteorological-small-satellites-were-allowed-enter-chinas-meteorological> (дата звернення: 09.01.2025).
35. Erwin S. Tomorrow.io gets DoD contract to launch two microwave weather sensor satellites. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/tomorrow-io-gets-dod-contract-to-launch-two-microwave-weather-sensor-satellites/> (дата звернення: 09.01.2025).

36. Muon Space Establishes Communications, Confirms Health of Weather Satellite. URL: <https://www.muonspace.com/press/muon-space-establishes-communications-confirms-health-of-weather-satellite> (дата звернення: 09.01.2025).

Отримано 17.01.2025,
в остаточному варіанті 28.02.2025