

СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лейко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: oksana.volosheniuk@gmail.com*

Мета роботи полягає у визначенні світових тенденцій використання низькоорбітальних угруповань космічних апаратів (КА), що мають ряд суттєвих переваг у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ). Значну увагу приділено побудові великих угруповань однотипних і різнотипних КА зарубіжними компаніями і операторами, такими як Digital Globe, Planet Labs, Black Sky, Satellogic S.A., а також планам розгортання таких угруповань в США, Китаї, Японії, Канаді, Росії, країнах Європи та інших країнах. Розглянуто характеристики різних, в основному комерційних низькоорбітальних угруповань КА оптико-електронного спостереження Землі, виведених на орбіту за останні п'ять років. Показано ефективність використання низькоорбітальних угруповань космічних апаратів у вирішенні багатьох соціально-економічних завдань: геодезії і картографії, міського будівництва, транспортної інфраструктури, оцінки врожайності, екологічного моніторингу, моніторингу в області охорони здоров'я і т. п. Показано також ефективність використання розглянутих угруповань у вирішенні нових задач, націлених на постійний оперативний моніторинг різних об'єктів. Проведено порівняльний аналіз технічних реалізацій та способів досягнення основних цільових характеристик КА, таких як інформаційна продуктивність, смуга захвату, періодичність спостереження, точність геоприв'язки, оперативність зйомок, можливість отримання стереозображень та проведення відеозйомки угрупованнями КА. Показано, що створення великих низькоорбітальних угруповань є новою тенденцією в світовій космонавтиці, що потребує застосування системних методів проєктування і керування ними. Отримані результати дають можливість виробити рекомендації щодо проєктування низькоорбітальних угруповань вітчизняних КА ДЗЗ, зокрема створення моделей і алгоритмів визначення параметрів необхідних орбіт, моделей динаміки КА.

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі, низькоорбітальні угруповання космічних апаратів, оптико-електронна система спостереження, просторова роздільна здатність, інформаційна продуктивність, оперативність.*

The aim of this work is to identify the global trends in the use of low-orbit spacecraft constellations, which have a number of substantial advantages in Earth remote sensing (ERS). Much attention is given to the construction of large constellations of single- and different-type spacecraft by foreign companies and operators, such as Digital Globe, Planet Labs, Black Sky, Satellogic S.A. etc., and to the plans of deployment of constellations of this type in the USA, China, Japan, Canada, Europe, and other countries. The characteristics of the various, mainly commercial, low-orbit constellations of optoelectronic Earth observation spacecraft put into orbit over the past five years are considered. It is shown that low-orbit spacecraft constellations can be used to good advantage in the solution of numerous socio-economic problems, such as geodesy and cartography, urban development, transport infrastructure, crop estimate, environmental monitoring, health monitoring, etc., and new problems aimed at prompt continuous monitoring of various objects. The paper presents a comparative analysis of the technical implementations and ways of achievement of the main target spacecraft characteristics, such as information performance, capture range, revisit time, geodetic connection accuracy, imaging immediacy, and the possibility of stereo and video imaging by satellite constellations. It is shown that the construction of large low-orbit constellations is a new trend in the world astronautics, which requires systematic methods for their design and control. The results obtained allows one to make recommendations on the design of low-orbit constellations of home ERS spacecraft, in particular on the development of orbit determination models and algorithms and spacecraft dynamics models.

Keywords: *Earth remote sensing, low-orbit spacecraft constellation, optoelectronic observation system, spatial resolution, information performance, immediacy.*

Вступ. Створення і розвиток космічних засобів і технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є в даний час одним з найважливіших напрямків застосування космічної техніки для соціально-економічних і наукових цілей [1]. Основними тенденціями у розвитку галузі ДЗЗ є: поява нових космічних апаратів (КА) ДЗЗ високої і надвисокої роздільної здатності з покращеними характеристиками оптико-електронної системи спостереження (ОЕСС); розширення поляризаційних можливостей у радарних КА, крім підвищення просторової роздільної здатності і збільшення числа режимів зйомки; розвиток можливості оперативної і глобальної зйомки ділянок поверхні Землі з висо-

кою роздільною здатністю за допомогою низькоорбітальних угруповань КА.

Таким чином, більшість практичних підходів, пов'язаних зі зміною схем спостереження, висоти орбіти, характеристик ОЕСС, її габаритів, розмірів супутникових платформ спрямовано на підвищення роздільної здатності КА і забезпечення високої періодичності спостереження, заснованої на розгортанні угруповань КА високої і надвисокої роздільної здатності на відносно низьких навколоземних орбітах (ННО). Звичайно, угруповання КА існували і раніше, вони створювалися і розгорталися поступово. За кількістю запускених КА ДЗЗ лідирують США, Китай. Їх лідерство забезпечується, в основному, за рахунок багатоцільових угруповань мікро- і наносупутників. У число країн, що володіють угрупованнями з 10-ма і більше КА входять також Німеччина, Японія, Росія, Франція, Індія. Державами, що самостійно розробляють апарати і оптико-електронну апаратуру, є США, Росія, Франція, Китай, Індія, Ізраїль, Канада, Японія, Італія, Великобританія, Німеччина, Корея [2].

Оптико-електронні системи спостереження КА ДЗЗ. Поняття і визначення. Сучасні КА ДЗЗ проводять зйомку в панхроматичному, мульти-спектральному і гіперспектральному режимах. Панхроматичні (ПХ) зображення займають практично весь видимий діапазон електромагнітного спектра (0,45–0,90) мкм, тому є чорно-білими. Мультиспектральні (МС) (багатозональні) знімальні системи формують кілька окремих зображень для широких спектральних зон в діапазоні від видимого до інфрачервоного (ІЧ) електромагнітного випромінювання. Гіперспектральні (ГС) знімальні системи формують зображення одночасно для вузьких спектральних зон на всіх ділянках спектрального діапазону. Для ГС зйомки важлива не кількість спектральних зон, а ширина зони (чим менше, тим краще) і послідовність вимірювань. Так, знімальна система з 20-ма каналами буде ГС, якщо вона покриває діапазон (0,50–0,70) мкм, при цьому ширина кожної спектральної зони не більше 0,01 мкм, а знімальна система з 20-ма окремими каналами, що покривають видиму, ближню, короткохвильову, середню і довгохвильову інфрачервоні області спектра буде вважатися мультиспектральною системою.

Важливим показником космічної зйомки є просторова роздільна здатність, що характеризує розмір найменших об'єктів, помітних на зображенні. Космічні знімки можуть мати низьку (більше 10 м), середню (від 10 м до 2,5 м), високу (від 2,5 м до 1 м) і надвисоку (менше 1 м) здатність. Частина прийнятого з КА потоку даних називається сценою. Схеми нарізки потоку на сцени, так само як і їх розмір для різних апаратів, мають свої відмінності.

Основні підходи до створення угруповань КА оптичного спостереження. Спочатку, і у міру розвитку комерційних КА ДЗЗ [3], виділялось два підходи до створення як КА, так і угруповань КА, вибору їх орбіт. Перший підхід орієнтований на створення повнофункціональних КА, що мають великогабаритну оптичну систему з робочими орбітами (700–800) км. За рахунок великої висоти такі КА мають широку смугу огляду і гарну оперативність спостереження об'єктів на поверхні Землі. Другий підхід орієнтований на використання малих КА з оптичною системою менших розмірів і орбітами (400–500) км. У цьому випадку, за рахунок зниження висоти орбіти змінюються технічні характеристики КА (зменшується смуга огляду, знижується оперативність), але зберігаються характеристики по роздільній здатності, як і в першому підході.

В таблиці 1 наведено технічні дані деяких КА, що доповнили існуючі та створили нові угруповання КА оптичного спостереження високої і надвисокої роздільної здатності, виведених в період (2015–2020) рр. Ці дані дозволяють виділити провідні країни в розвитку ДЗЗ, визначити підходи до побудови угруповань КА, провести порівняльні оцінки характеристик окремих КА, зокрема, роздільної здатності, в залежності від висоти і маси КА, ширини смуги захвату, в залежності від ОЕСС і висоти КА.

Таблиця 1 – Дані КА та угруповань КА оптичного спостереження, виведених на орбіту з 2015 р.

КА	Країна	Рік	Роздільна здатність, м		Смуга захвату, км	Висота орбіти, км	Маса, кг
			ПХ	МС			
KompoSat-3A	Корея	2015	0,55	2,2	13	528	1000
IGS O5-O7	Японія	2015–2020	0,4	–	–	500	4100
DMC-3 A,B,C	Китай	2015	1	4	23,4	650	447
Jilin-1	Китай	2015	0,72	2,88	11,6	650	430
CartoSat-2C	Індія	2016	0,65	2,0	11,0	510	727
Ресурс-П	Росія	2016	0,7	2,1	38,6	475	6270
SkySats 1–5	США	2016	0,7	1,56	6,25	500	90–120
WorldView-4	США	2016	0,31	1,24	13,1	617	2087
SuperView-01, 02	Китай	2016	0,5	2	12	500	500
SkySats 6–21	США	2017–2020	0,5–0,7	1,56	6,25	400–575	100/120
Канопус-В-ІЧ	Росія	2017	2,1	10	23	510	600
Канопус-В № 3–6	Росія	2018	2,1	10,5	23; 40	510	500
BSG 1–4, 7, 8	США	2018–2020	1	–	–	450	44–65
CSO-1, 2, 3	Франція	2018	0,35/0,2	4	23	800/480	3565
GF 1-02–04, 5–7, 11, 12	Китай	2018, 2019	2	8	90	500–700	805
Jilin-1 GF-02A, 02B	Китай	2019	0,76	3,1	40	535	230
Jilin-1 GF-03A	Китай	2019	1,06	4,24	18,5	579	42
Jilin-1 Guanpu-01,02	Китай	2019	–	5	110	528	202
GF 9-02, 03	Китай	2020	0,8	3,2	48	500	–
CAS-500-1/2	Корея	2020	0,5	–	12	600	500
Jilin-1 GF-01	Китай	2020	1	4	136	485	1250

Аналіз даних табл. 1 показує, що загальною тенденцією розвитку ДЗЗ є покращення характеристик роздільної здатності ОЕСС, зниження висоти орбіт КА, прагнення до мініатюризації КА. На прикладі декількох компаній, світових лідерів ДЗЗ розглянемо нові підходи в побудові угруповань КА.

Особливості угруповань КА компанії Planet Labs. Очевидними є успіхи приватної компанії Planet Labs (США) [4]. За останні 6 років компанія успішно розгорнула 351 КА, що суттєво більше, ніж у будь-якого конкурента. Planet Labs об'єднала 3 угруповання КА: 21 апарат SkySats, загальне число яких буде доведено до 24-х; 5 апаратів RapidEye, викуплених у збанкрутілої

компанії BlackBridge; 179 апаратів PlanetScope (Flock). Об'єднання угруповань КА одним оператором говорить про постановку нових завдань, спрямованих на постійний моніторинг поверхні Землі, включаючи промислові об'єкти, транспортні перевезення, зберігаючи при цьому пріоритети в зборі даних для сільського та лісового господарств. За даними компанії 100 КА зможуть надавати інформацію з добовою продуктивністю 250 млн. км², в середньому по 1 200 зображень будь-якої ділянки Землі. Запуск 3-х КА (SkySats 16–18, табл. 1) в червні 2020 р. і 3-х КА (SkySats 19–21) в серпні дозволить проводити оперативну зйомку всієї поверхні Землі до 7 разів на добу, а можливість зйомки будь-якого об'єкта в середніх широтах, зокрема, на широті 53° до 12 разів на добу [4]. Така можливість у поєднанні з покращеними характеристиками роздільної здатності до 0,5 м і новою панеллю керування дозволить проводити оперативну оцінку стану та інформаційного забезпечення будь-якої ділянки поверхні Землі. Розглянемо більш детально технічні рішення кожного угруповання компанії Planet Labs.

КА **RapidEye** з роздільною здатністю 6,5 м можна назвати першим угрупованням КА комерційного призначення [5]. До теперішнього часу угруповання RapidEye здійснювало глобальний сільськогосподарський моніторинг, але згідно із заявою компанії від 31.03.2020 р. після 11 років функціонування угруповання RapidEye було видалено, клієнти були переведені на угруповання Flock наступного покоління [4].

Угруповання КА **Flock** має різну роздільну здатність – від 2,7 м до 5 м. Основна частина угруповання (близько 3/4) знаходиться на сонячно-синхронних орбітах (ССО) і має роздільну здатність близько 3,7 м. За оцінками компанії добова продуктивність системи становить 150 млн. км². Корисним навантаженням є телескоп Максудова–Касегрена діаметром 90 мм і фотоприймач на основі кадрової ПЗЗ-матриці. Цікаво відзначити, що телескоп займає 11/12 обсягу всього апарату. Поле зору телескопа на апаратах Flock-3Р збільшилось, якість зображення значно покращилась, і разом з ним стала використовуватись матриця форматом 29 Мп. З висоти орбіти 475 км проєкція пікселя дорівнює 3,73 м, а розмір кадру (24,6×16,4) км, тобто 403 км². Точність геоприв'язки – близько 20 м [6].

Основною особливістю ОЕСС **SkySats** є те, що зйомка ведеться кадрами з частотою ~ 40 Гц. Розмір кадру становить (11×6) км, тобто 66 км². Бортове сховище даних 768 Гб, швидкість передачі даних 450 Мбіт/с. Поєднання тангажного відстеження та покадрової зйомки з частотою 40 Гц забезпечує отримання 90 секундних відеороликів у форматі HD (1920×1080 пікселів) з частотою кадрів 30 Гц. Можуть також надаватися дані в розширеному форматі HD (2560×2160 пікселів – 5,5 Мп). За час зйомки одного відеоролика апарат пролітає близько 640 км. Формується відео (2,0×1,1) км і єдина сцена шириною 8 км. Обробка даних і отримання зображення цілої сцени або ролика в необхідному форматі відбувається на наземній станції.

Аналіз технічних рішень, використаних на КА Flock і SkySats, показує різке зменшення їх маси і відповідно вартості. Відносно низька величина витрат на розробку, виготовлення і виведення на орбіту пояснює перетворення малих КА в масовий продукт, доступність їх використання в ДЗЗ, у відпрацюванні нових технологій і систем в наукових дослідженнях космічного простору та Землі. Широке застосування малих КА служить стимулом розробки інноваційних технологій вдосконалення службових систем і цільової апарату-

тури [7]. Так, сучасний розвиток приладової бази (оптичні системи з масою (20–50) кг для середньої і високої роздільної здатності при споживанні (40–80) Вт дозволило орієнтуватися на КА ДЗЗ, що відносяться до класу мікросупутників (до 100 кг). Крім того, з метою досягнення комерційного ефекту на ринку ДЗЗ розробляються проекти зі створення і розгортання угруповань з великою кількістю мікросупутників (100 і більше), які вже орієнтовані на приватного споживача. Угруповання КА компанії Planet Labs є яскравим прикладом цього. За даними Euroconsult [8] всього кілька компаній (Planet Labs, Black Sky, Maxar, Satellogic S.A.) запускають більше ніж 1400 малих КА до 2025 р. Для прикладу, в таблиці 2 наведено деякі проекти угруповань КА (не менше 6-ти апаратів), запланованих до запуску до 2025 р.

Таблиця 2 – Характеристики угруповань КА високої і надвисокої роздільної здатності, запланованих до запуску до 2025 р.

Угруповання	Компанія	Країна	Роздільна здатність, м	Маса, кг
Flock	Planet Labs	США	3,7	4,5
Pelican	Planet Labs	США, Німеччина	0,29	–
BSG	BlackSky	США	0,9–1,1	44–65
NuSat	Satellogic S.A.	Аргентина	1,0	37,5
Landmapper	Astrodigital	США	2,5	20
Zhuhai-1	Zhuhai Orbita Aerospace	Китай	1,98	55
SkySats	Planet Labs	США	0,7–0,9	83/120
WorldView-Legion	Digital Globe	США	0,35–0,5	500–700
Grus	Axel Space	Японія	2,5	80
OptiSar Optical	Urthe Cast	Канада, Великобританія	0,25–0,50	340–670
UrtheDaily	UrtheCast	Канада, Великобританія	5	340
Super View	SuperView	Китай	0,5	500

Особливості угруповань КА компанії Digital Globe. Компанія Digital Globe [9], що в даний час є дочірньою компанією Maxar Technologies (Канада), займає лідируюче положення на світовому ринку геоданих. Компанії належить найбільше світове угруповання п'яти КА (WorldView-1, 2, 3, 4 і GeoEye-1) надвисокої роздільної здатності, дані з якої формують ринок послуг в області ДЗЗ. Добова продуктивність зйомки кожного з перерахованих КА близько 700 тис. км². Дане угруповання дозволяє знімати об'єкти в середньому до 4,5 разів на добу. Так, WorldView-3, 4, що мають просторову роздільну здатність 0,25 м і періодичність спостереження одних і тих же ділянок поверхні Землі в одну добу, забезпечили компанії лідируюче положення серед постачальників даних оптико-електронної зйомки надвисокої роздільної здатності. Компанія також займає лідируючі позиції і з оперативності зйомки і з періодичності спостережень. Щоб не поступитися своїми позиціями (тій же компанії Planet Labs) Digital Globe бере участь в розробці проектів зі створення і запуску низькоорбітальних угруповань малих КА. Компанія оголосила про створення угруповання КА під назвою WorldView-Legion для заміни застарілих КА WorldView-1, 2. Запуск шести КА WorldView-Legion планується на 2021 р. Апарати будуть виведені на ССО і орбіти середніх широт. Дане угруповання КА зможе спостерігати окремі ділянки поверхні Землі до 15 разів на добу [10]. WorldView Legion збільшить продуктивність космічної

зйомки Digital Globe. Щодня нове угруповання КА, з роздільною здатністю 0,29 м, зможе знімати до 5 млн. км² (кожен КА до 700 тис. км² зі смугою захвату 10 км) і точністю геоприв'язки до 5 м [10].

Паралельно, у співпраці з компаніями Taqnia Space і The King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) із Саудівської Аравії компанія працює над створенням угруповання із 6-ти КА WorldView-Scout з роздільною здатністю менше 1 м (0,8 м в ПХ і 3,2 м в МС режимах), запуск якого планується у 2021 р. [11]. Передбачається, що угруповання КА матиме можливість спостерігати задані об'єкти до 40 разів на добу. КА будуть отримувати зображення з роздільною здатністю 0,8 м, які будуть доповнені знімками з високою роздільною здатністю 0,3 м з КА WorldView-3, 4.

Таким чином, створюючи низькоорбітальні угруповання КА, компанія Digital Globe прагне максимально гарантувати собі оперативне отримання інформації та максимально здешевити її.

Особливості угруповання КА компанії BlackSky. Великий інтерес представляє нова компанія BlackSky [12], заснована в 2013 р. і націлена на комерціалізацію доступу до високопродуктивних супутникових зображень. Компанія планує розгорнути угруповання BlackSky Global (BSG) з 60-ма КА з роздільною здатністю (0,75–1) м і масою (44–65) кг, щоб надавати інноваційні глобальні рішення для моніторингу та служби розвідки на основі геопросторової діяльності. Планується, що пара апаратів буде забезпечувати глобальне покриття з ССО, а решта будуть розділені на вісім орбітальних площин. Близько 90 % населення планети проживає між 55° північної і південної широти, що дозволяє оптимізувати угруповання КА для максимального збільшення часу (до декількох годин) спостереження заданих ділянок.

На даний час компанія BlackSky має 8 КА BSG на орбіті, останні – BSG 7, 8 були запуснені 07.08.2020 р., ще шість повинні бути запуснені до кінця 2020 р. На початок 2021 р. BSG планує мати 16 КА в своєму угрупованні. КА повинні функціонувати на орбітах висотою 450 км. Апарати також зможуть передавати відео зі швидкістю 1 кадр/с, а час відвідування деяких ділянок Землі скоротиться до (10–15) хв. [12].

Корисним навантаженням угруповання КА BSG є оптико-електронна камера SV-24TM з діаметром головного дзеркала (апертурою) всього 0,24 м. Камера виробляється американською компанією Harris Corporation і є «молодшою» моделлю в цілому сімействі оптико-електронних камер (під торговою маркою SpaceViewTM) з апертурою від 0,24 м до 0,7 м для мікро- і мінісупутників [13]. Тобто, якщо спочатку на КА для отримання роздільної здатності в 1 м використовувались камери діаметром (0,5–0,7) м, то в даний час на КА BSG ті ж значення роздільної здатності реалізуються при значеннях апертури 0,24 м.

Основна відмінність компанії BlackSky від інших комерційних компаній – це можливість клієнтів безпосередньо підключатись до КА (але без можливості керування ними) через вебпортал компанії для вибору об'єктів, знімки яких потрібно отримати.

Таким чином, на прикладі розглянутих комерційних компаній Planet Labs, Digital Globe, BlackSky ми бачимо, що оперативне виконання замовлень, в тому числі і по площинній зйомці, досягається не тільки за рахунок хорошої смуги захвату і мінімізації часу повторного спостереження, а й за рахунок великої кількості КА в низькоорбітальних угрупованнях.

Угрупування КА ОЕСС високої і надвисокої роздільної здатності з'явилися не тільки в США, але і в інших країнах. На прикладі провідних країн світу у використанні багатоцільових угруповань КА ДЗЗ проведемо аналіз побудови та розгортання таких угруповань.

Особливості угруповань КА ДЗЗ Китаю. Як відомо, якісні характеристики китайських КА ДЗЗ до кінця невідомі в зв'язку з відсутністю у відкритому доступі достовірної інформації. Але в цілому, Китай постійно нарощує своє угруповання КА ДЗЗ, причому рухається відразу по декількох напрямках: картографія (Tianhui, Ziyuan-3), висока і надвисока роздільна здатність (ряд КА з серій Yaogan, Gaofen, Jilin-1), відеозйомка (Lingqiao) [14, 15] і т. п. Роблячи ставку в основному на власні сили і промисловість, китайські фахівці не нехтують і зарубіжним досвідом. Так, на замовлення Китаю, в 2015 р. на орбіту одним пуском було виведено відразу 3 КА DMC-3 з роздільною здатністю 1 м, що розроблені і виготовлені фахівцями компанії Surrey Technology Ltd (SSTL, Великобританія).

Важлива роль відводиться і міжнародному розвитку космічної промисловості Китаю. China Great Wall Industry Corporation (CGWIC) є єдиною комерційною організацією, яка на світовому ринку надає свої послуги із запусків та експорту КА, будівництва наземних супутникових станцій і станцій керування, супутникових програм, фінансування проєктів. У 2019 р. CGWIC було підписано угоду з компанією Satellogic S.A. (Аргентина) щодо запуску угруповання КА ДЗЗ – NuSat. На сьогоднішній день успішно запущено перші 8 КА NuSat, і планується, що повне угруповання складатиме 90 КА [16].

Серед виведених Китаєм на орбіту КА ДЗЗ слід відзначити найбільш цікаве комерційне угруповання КА з високою просторовою роздільною здатністю і можливістю стереозйомки – серію КА SuperView-1. Ці КА є тільки частиною більш глобального комерційного проєкту зі спостереження Землі з космосу під загальною назвою SuperView Constellation. Таке угруповання КА повинно буде включати в себе, крім угруповання маневрених легких КА SuperView-1, ще й інші складові угруповання: КА з високою і надвисокою роздільною здатністю (можливо високоорбітальні), легкі маневрені радарні КА, КА для відео- і гіперспектрального моніторингу [17].

На прикладі угруповань малих КА ДЗЗ з високою роздільною здатністю SuperView-1, Gaofen, Jilin-1 проведемо аналіз сучасних тенденцій в розвитку можливості оперативної і глобальної зйомки поверхні Землі. Основні технічні дані кожного КА (маса, висота, смуга захвату) наведено в табл. 1.

З 2016 р. на орбіту одним пуском виведена і приступила до роботи пара легких (масою до 500 кг) китайських КА, що мають комерційне найменування SuperView-01, 02 (інша назва Gaojing-1-01, 02) з роздільною здатністю 0,5 м [18]. На початку 2018 р. на орбіту виведено ще 2 КА (Gaojing-1-03, 04), а до 2022 р. планується розгорнути угруповання з 16 таких КА. Апарати мають високу маневреність і працюють в декількох режимах зйомки, включаючи режим смуги, декількох смуг, точкову зйомку по декількох об'єктах і стереозйомку. Сканер здатний відхилятися від надира $\pm 30^\circ$. Максимальний розмір сцени, що знімається (60×70) км [19].

Інше китайське угруповання КА Gaofen 1 (GF 1) – це серія цивільних КА, розроблених і запущених для Китайської системи спостереження Землі з високою роздільною здатністю. Програма China High-Definition System

Observation System (CHEOS) спонсорується державою і спрямована на розробку глобальної метеорологічної мережі спостереження в реальному часі. Апарати GF 1 дозволяють надавати дані спостережень про природні ресурси, екологічний стан навколишнього середовища і про стихійні лиха. GF 1 використовуються також для потреб транспортних служб, сільського та лісового господарств, океанографічних досліджень. GF 1-02, 03, 04 – це оптичні КА, створені на базі введеного в експлуатацію у квітні 2013 р. КА з високою роздільною здатністю – GF 1, проте конструктивно вони відрізняються покращеними технічними характеристиками [20]. Встановлені на кожному з апаратів дві мультиспектральні камери дозволяють проводити кольорову зйомку з роздільною здатністю 2 м в ПХ і 8 м в МС режимах.

Слід зазначити, що продовжуючи формувати систему спостереження Землі, Китай провів ще ряд запусків КА із серії GF 1 [15].

GF 7 – перший в Китаї КА цивільного призначення для стереоскопічної зйомки і картографування, який виконує зйомку з роздільною здатністю краще 1 м. КА був запущений 3.11.2019 р. Передбачається, що інформація з КА дозволить виконувати 3D картографування в масштабі 1:10000. Точність горизонтального позиціонування наземних об'єктів знаходиться в межах 5 м, а точність вимірювання висоти – близько 1,5 м.

Запуск КА GF 9 є частиною Пекінської програми по зниженню залежності від іноземних технологій в топографічній картографії. КА GF 9-02, 03, запуск яких відбувся 31.05.2020 р. і 17.06.2020 р. – це оптичні КА, з можливістю отримувати зображення з роздільною здатністю 0,8 м у ПХ і 3,2 м в МС режимах, зі смугою захвату 48 км в режимі сканування «Pushbroom» (мітлою по курсу), глобальний огляд можливий протягом 2-х місяців. Ці КА плануються використовувати в геодезії, міському плануванні, проєктуванні дорожньої мережі, сільському господарстві та ліквідації наслідків стихійних лих.

Також Китай планомірно нарощує угруповання КА орієнтоване на відеозйомку поверхні Землі. У 2015 р. було запущено 2 КА Lingqiao Video-A, B. КА оснащені камерами форматом 4K (3840×2160 пікселів), розмір кадру (4,3×2,4) км², тривалість відеозапису до 120 с. Зазначені характеристики апаратури Lingqiao суттєво перевищують аналогічні показники КА SkySats. На початку 2018 р. було запущено чергові апарати для відеозйомки Lingqiao-08, 09, які в подальшому увійшли до угруповання Jilin-1.

КА Jilin-1 є ще одним угрупованням КА ДЗЗ, призначеним для продажу зображень в комерційних цілях. Це багатофункціональні КА, що забезпечують відеозображення з високою роздільною здатністю [14].

Перший КА Jilin-1 було виведено 7.10.2015 р. на ССО висотою 650 км. Апарат дозволяє проводити зйомку в ПХ і МС режимах з роздільною здатністю 0,72 м і 2,88 м відповідно. Ширина смуги захвату дорівнює 11,6 км, частота огляду – 3,3 доби. Призначення КА: геодезія і картографія, мінеральні ресурси, міське будівництво, транспортна інфраструктура, оцінка врожайності, екологічний моніторинг, моніторинг в області охорони здоров'я і т. п.

Jilin-1 Gaofen 03A, запуск якого відбувся 5.06.19 р. – це КА нового покоління, в якому використано інноваційні технології, полегшена конструкція, високоінтегрована електронна система, камера з високою роздільною здатністю ультралегкої маси. Ширина смуги захвату дорівнює 18,5 км. Підтримуються режими зйомки «pushbroom», «multi-target pushbroom», «space target»,

кут крену $\pm 45^\circ$. Можливість зйомки до 5 хвилин, точність геоприв'язки до 100 м [14].

Jilin-1 Gaofen 02 A, B [14], запуск яких відбувся 13.11.2019 р. і 7.12.2019 р. відповідно – це КА ДЗЗ, які розроблені і управляються Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd (CGSTL) [14]. Основним призначенням КА є забезпечення відеозйомки Землі в HD якості. Апарати оснащені ІЧ камерами. Згідно з відкритими даними КА може проводити зйомку в ПХ режимі з роздільною здатністю краще ніж 0,76 м, в МС режимі з роздільною здатністю 3,1 м. Ширина смуги захвату становить близько 40 км; можливість зйомки до 300 с, швидкість передачі даних на Землю – 1,8 Гб/с.

КА Jilin-1 Guapu 01, 02 – це два ідентичних гіперспектральних КА ДЗЗ. Метою створення КА є надання комерційних послуг та допомоги у використанні природних ресурсів. Планується запуск 60-ти таких КА до кінця 2020 р. і 138 КА до кінця 2030 р. На КА встановлено гіперспектральні камери: короткохвильові, середньохвильові, довгохвильові ІЧ камери, а також КА оснащено бортовою інтелектуальною системою обробки даних, яка дозволяє отримувати дані ДЗЗ з роздільною здатністю в ближньому ІЧ діапазоні – 5 м, в короткохвильовому і середньохвильовому ІЧ діапазоні – 100 м, довгохвильовому ІЧ – 150 м, шириною смуги огляду – 110 км, кількість сегментів спектру – 26. Висота ССО – 528 км, нахил – $97,54^\circ$, періодичність зйомки 2–3 доби, час зйомки – 1 хвилина. Швидкість передачі даних по кожному із зазначених діапазонів: 600 Мб/с, 300 Мб/с, 150 Мб/с, 900 Мб/с. Точність геоприв'язки – 50 м, кут крену $\pm 45^\circ$.

КА Jilin-1 GF-01, виведений 15.01.2020 р. на орбіту висотою 485 км, повністю успадкував технічну основу КА Jilin-1 [21]. Jilin-1 GF-01 має можливість візуалізації з роздільною здатністю в ПХ режимі 0,75 м і в МС режимі 3 м, і шириною смуги огляду більш ніж 136 км. Він може отримувати близько 1000 км² субметрових зображень в секунду і може досягати продуктивності більше 1 млн. км² на добу. Jilin-1 FG-01 використовує накопичувач інформації з встановленою ємністю 40 Тб, який може забезпечити високошвидкісний запис даних 22,4 Гб/с. Швидкість передачі даних на Землю може досягати 1,8 Гб/с, з можливістю зйомки і передачі в режимі реального часу, що значно покращує можливості служби апарату. Цей КА може працювати і отримувати знімки Землі з роздільною здатністю 0,29 м з висоти орбіти (250–550) км і нахилом в межах 40° – 60° і 96° – 99° . Таким чином, Jilin-1 GF-01 – найбільший в Китаї субметровий оптичний КА ДЗЗ з високою роздільною здатністю, надвеликою шириною смуги огляду, високошвидкісною системою запису і передачі даних. Після виведення апарату на орбіту сформовано угруповання з 15-ти раніше запускених КА Jilin-1, яке дозволяє надавати урядовим та галузевим користувачам досить повні дані ДЗЗ.

Слід зазначити, що політика Китаю в області створення систем КА ДЗЗ відрізняється потужною державною підтримкою, практичною спрямованістю і високими темпами реалізації. Китай створює і успішно впроваджує орієнтовані на внутрішній і зовнішній ринок передові космічні технології ДЗЗ. В даний час Китай (CAST) самостійно розробляє і виробляє КА з оптико-електронною і радіолокаційною апаратурою зйомки поверхні Землі, які не поступаються за якістю світовим виробникам. Впевнено нарощується орбітальне угруповання КА ДЗЗ і зростає кількість майбутніх щорічних запусків

таких апаратів. Також Китай є рівноправним членом Міжнародної хартії «Space and Major Disaster» (Космос і великі катастрофи).

Особливості угруповань КА ДЗЗ Японії. Японія є однією з провідних країн світу в космічній галузі. Основною особливістю ДЗЗ Японії є широта тематики при мінімальних витратах завдяки створенню та оснащенню сучасним технічним та випробувальним обладнанням науково-дослідних центрів, що дозволяє проводити роботи як для підтримки існуючих угруповань КА, так і проєктувати нові системи з інноваційними технологіями в мінімальні строки.

В даний час в Японії функціонують два основних угруповання КА видової розвідки та подвійного призначення – IGS (Information Gathering Satellites) і Alos (Advanced Land Observation Satellite) відповідно.

Угруповання КА IGS експлуатується з 2003 р. і призначено як для розвідки, так і для моніторингу стихійних лих. В його складі функціонують 4 оптичних і 4 радарних КА масою до 1,2 т. Всі КА використовують кругові орбіти з періодом повторення трас близько 4-х діб. Апарати розміщені на ССО висотою (468–526) км і нахилом 97°–98°. КА IGS Optical 7, виведений на орбіту 09.02.2020 р – це КА третього покоління угруповання IGS оснащений ОЕСС надвисокої просторової роздільної здатності (до 0,4 м), маса апарата 4,1 т.

Угруповання КА ДЗЗ Alos призначено для зйомки поверхні Землі. Апарати розміщені на ССО висотою (631–640) км і нахилом 98°. На КА Alos можлива оптична зйомка з роздільною здатністю 2,5 м в ПХ і 10 м в МС режимах, а також радарна зйомка в L-діапазоні з роздільною здатністю до 1 м.

Крім того, планується розгортання угруповання на основі малогабаритних КА Asnaro, перший з яких було запущено в 2014 р. Японська космічна програма Asnaro була створена NEC Corp. і інститутом USEF (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer) в 2008 р. В основі програми лежать сучасні тенденції створення мініспутникових систем надвисокої роздільної здатності, масою від 100 кг до 500 кг, які б могли конкурувати з супутниками інших країн, аналогічними за своїми характеристиками, за рахунок здешевлення даних і можливості проєктувати і виготовляти апарати в більш стислі строки [22]. Основні характеристики КА: можливість проведення зйомки в ПХ режимі з роздільною здатністю 0,5 м, в МС режимі – 2 м, ширина смуги захвату – 10 км, швидкість передачі даних – 800 Мбіт/с. В майбутньому також планується запуск гіперспектрального КА Asnaro-3.

У найближчій перспективі планується ввести в експлуатацію угруповання КА ДЗЗ нового покоління на базі КА CE-SAT-1B. Так, 23.06.2017 р. відбувся запуск експериментального КА CE-SAT 1A (Canon Electric Satellite 1A) розміром (0,5×0,5×0,7) м, масою 50 кг. КА здатний знімати з роздільною здатністю до 1 м з висоти 600 км, розмір кадру (6×4) км. Також на КА встановлено експериментальну систему відводу КА з орбіти. А 05.07.2020 р. відбувся запуск CE-SAT-1B. На орбіті КА повинен продемонструвати технологію зйомки Землі від Canon Electronics Inc. за допомогою камер високої роздільної здатності та ширококутних камер, а також протестувати КА для масового виробництва. Аналогічно CE-SAT 1A, даний КА може знімати з роздільною здатністю до 0,9 м з висоти орбіти 600 км, маса апарата дорівнює 67 кг.

В рамках проекту AxelGlobe японська компанія AxelSpace Corp. запланувала до кінця 2022 р. вивести на орбіту угруповання з 50-ти КА Grus. Grus – це 100-кілограмові мікросупутники ДЗЗ, розміром (0,6×0,6×0,8) м. Вони оснащені високопродуктивною ОЕСС, що дозволяє робити знімки з роздільною здатністю 2,5 м в ПХ і 5 м в МС режимах, зі смугою захвату понад 57 км і можливістю зйомки 850 000 км² на добу. Апарати будуть виведені на ССО висотою 600 км. Перший КА з цієї серії (Grus-1A) запущено 27.12.2018 р.

Особливості угруповань КА ДЗЗ Європи. Незважаючи на тісний контакт і багато в чому повне переплетення космічних програм і технічних засобів західноєвропейських країн в рамках Європейського космічного агентства (ЄКА), кожен учасник агентства має свою програму з розвитку ДЗЗ, в рамках якої створює свої КА або бере участь в програмах своїх партнерів. Активну участь у створенні власної системи КА ДЗЗ беруть провідні країни Європи (Франція, Німеччина, Італія, Великобританія і т. п.). Європа вже сьогодні має всі необхідні технічні можливості для того, щоб в світовому масштабі пропонувати дані з КА ДЗЗ.

В космічній діяльності **Великобританії** провідну роль відіграє компанія Surrey Technology Ltd, яка є світовим лідером в технології виробництва малих КА. В процесі розгортання угруповання DMC (Disaster Monitoring Constellation) для спостереження за обстановкою в місцях стихійних лих на орбіту було виведено більше 10 КА трьох поколінь з оптичною апаратурою і можливістю відвідувати один і той же район Землі щонайменше один раз на добу. Угруповання КА DMC 3, що виведено на ССО в 2015 р. зі стартовою масою кожного апарату 447 кг, складається з 3-х ідентичних оптичних КА надвисокої роздільної здатності. КА рівномірно розподілені в одній орбітальній площині (на відстані 120° один від одного) з щоденною зйомкою заданих ділянок поверхні Землі, що має вирішальне значення для виявлення змін, моніторингу стихійних лих і реагування, а також для отримання зображень без хмар. І наземний, і космічний сегмент розроблено таким чином, щоб забезпечити максимально ефективне та швидке отримання інформації користувачами та замовниками [23].

У **Франції** основним комерційним оператором КА ДЗЗ є компанія Astrium GEO-Information Services – геоінформаційний підрозділ міжнародної компанії Astrium Services. Компанія Astrium GEO Information Services є оператором оптичних КА високої і надвисокої роздільної здатності SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre) і Pleiades, а також радарних КА нового покоління TerraSAR-X і TanDEM-X. Компанія Astrium Services входить до складу європейської аерокосмічної корпорації EADS (European Aeronautic Defence and Space Company).

З запуском у 2011–2012 рр. КА Pleiades-1A, 1B Франція почала програму зйомки Землі з надвисокою роздільною здатністю. Програма Pleiades High Resolution є складовою частиною європейської системи КА ДЗЗ і ведеться під керівництвом Національного космічного агентства Франції (CNES). КА Pleiades-1A, 1B синхронізовані на одній орбіті таким чином, щоб мати можливість забезпечити щоденну зйомку заданої ділянки поверхні Землі. Використання космічних технологій нового покоління, таких як оптиковолоконні системи гіростабілізації, дає КА, обладнаним найсучаснішими системами, високу маневреність. Вони можуть проводити зйомку в будь-якому місці 800-

кілометрової смуги менше ніж за 25 секунд з точністю геопозиціонування менш 3 м без використання наземних опорних точок, і 1 м з використанням наземних точок. КА здатні знімати більш 1 млн км² на добу. Для продовження місії Pleiades в 2020–2021 рр. планується запустити ще 4 оптичних КА надвисокої роздільної здатності. У порівнянні з нині діючими КА буде значно покращено технічні характеристики, щоб відповідати зростаючим вимогам ринку, забезпечуючи вирішення нових завдань для бізнесу та аналітики.

КА CSO-1/2/3 (Composante Spatiale Optique), запуск яких відбувся 19.12.2018 р., є орбітальним угрупованням ДЗЗ. Ці КА будуть обслуговувати військових Франції і допоможуть їм замінити на орбіті угруповання Helios. Розробка КА здійснювалася спільними зусиллями DGA (Directorate General of Armaments) і CNES. КА мають масу 3565 кг. Роздільна здатність CSO-1 (з висоти 800 км) становить 0,35 м, ширина смуги захвату 23 км. У той же час, при знаходженні CSO-2 на орбіті висотою 480 км роздільна здатність становить близько 0,2 м. В цілому корисне навантаження на CSO вийшло на 30 % більше, проте час розробки КА скоротився на 40 % [24].

Особливості угруповань КА ДЗЗ Росії. Формування сучасного російського орбітального угруповання КА ДЗЗ почалося в червні 2006 р. запуском першого цивільного КА високої роздільної здатності Ресурс-ДК1. В даний час у складі російського орбітального угруповання КА ДЗЗ налічується 12 апаратів, 8 з яких забезпечують надання даних високої роздільної здатності:

- 3 КА «Ресурс-П» зі знімальною апаратурою, що має роздільну здатність в ПХ режимі – 0,8 м, в МС режимі – 12/24 м і ГС режимі – 30 м;

- 5 КА «Канопус-В» зі знімальною апаратурою з роздільною здатністю в ПХ режимі – 2,5 м і в МС режимі – 12 м;

- 2 КА гідрометеорологічного призначення «Метеор-М» зі знімальною апаратурою з роздільною здатністю (50–70) м, шириною смуги зйомки 1000 км і глобальним моніторингом території Росії протягом 2–3-х діб;

- 2 КА гідрометеорологічного призначення на геостаціонарній орбіті «Електро-Л» з апаратурою глобального спостереження Землі кожні 30 хвилин.

Російські КА ДЗЗ середнього розміру (від 500 кг до 1000 кг) серії «Канопус-В» побудовані на платформі SSTL-300S1 з розмірами (0,9×0,9×0,75) м. В даний час на орбіті висотою 500 км працює 5 таких КА, роздільна здатність в ПХ режимі дорівнює 2,1 м при смузі захвату 23 км. У 4-х мультиспектральних каналах роздільна здатність – 10,5 м.

Серія російських цивільних КА ДЗЗ «Ресурс-П», що складається з 3-х КА, є розвитком проекту «Ресурс-ДК1». Основною перевагою «Ресурс-П» є: надвисока просторова роздільна здатність – менше 1 м; використання RPC-поліномів, інструментів для підвищення точності і прискорення процесу обробки даних; проведення стереоскопічної зйомки (можливість створення тривимірних моделей).

Цільова апаратура КА «Ресурс-П» забезпечує зйомку земної поверхні в панхроматичному, спектральному, широкозахватному і гіперспектральному режимах в будь-якому поєднанні. Продуктивність зйомки оцінюється в 80 000 тис. км² на добу, максимальна протяжність території земної поверхні, відзнятої за одне включення складає 2100 км (за 300 с). Передача інформації може здійснюватися в реальному часі і в записі по високошвидкісній радіолінії.

За сукупністю своїх характеристик апарати серії «Ресурс-П» показують, що розробники прагнули реалізувати на КА граничні значення просторової

роздільної здатності, продуктивності, точності геоприв'язки. Продукти, що створюються на основі даних цих КА, за якістю і оперативністю отримання наближаються до кращих іноземних аналогів. Але збільшення обсягу даних і їх детальності ставить на перші місця проблеми їх обробки, зберігання, вилучення та відповідності результатів вимогам. Так, наприклад, мозаїка на всю територію Росії з роздільною здатністю 0,5 м буде займати більше 600 Тб даних – і це вже готовий продукт, обсяг же вихідних даних для створення такої мозаїки перевищує 2,5 Петабайт. Для обробки і зберігання даних необхідно розгортання спеціалізованих систем зберігання даних [25].

Ще однією важливою характеристикою, що постійно змінюється (збільшується) з розвитком систем спостереження, є довжина строки фотоприймальних пристроїв на матрицях ПЗС. Довжина строки в 54024 пікселя в оптико-електронних перетворювачах знімальної апаратури КА «Ресурс-П» разом з великим діаметром телескопа «Геотон-Л1» забезпечила смугу захвату в 38,6 км, що є високим показником при просторовій роздільній здатності 0,7 м серед світових і російських КА. У порівнянні зі своїм попередником Ресурс-ДК, у «Ресурс-П» кількість пікселів в рядку збільшилася в 1,5 рази, а розмір пікселів зменшився в 1,5 рази до 6 мікрон. Для прикладу, розмір фотоприймального елемента на КА WorldView становить 8 мікрон.

Відомо, що Росія планує протягом наступних 3-х років довести орбітальне угруповання КА ДЗЗ до 20-ти апаратів і підтримати його на тому ж рівні до 2030 р. Також Росія працює над проектом глобального супутникового зв'язку «Сфера», який до 2030 р. має включати 638 КА, з них 249 КА ДЗЗ. Проект «Сфера» буде включати багатосупутникове угруповання ДЗЗ на базі малих КА, в тому числі радарних. В цілому повинно функціонувати 17 орбітальних угруповань КА [26].

Особливості угруповань КА ДЗЗ Канади. Канадська компанія UrtheCast зробила наступний крок у розвитку космічної техніки ДЗЗ, оголосивши про створення, запуск та експлуатацію двох унікальних угруповань КА ДЗЗ. Так, в 2015 р. UrtheCast оголосила про створення першого в світі інтегрованого комерційного угруповання КА ДЗЗ – OptiSAR, об'єднавши радарні і КА оптичного спостереження [27]. Угруповання складається з 8 пар оптичних і радарних КА. Кожна пара буде вести зйомку синхронно. КА будуть знаходитися в двох орбітальних площинах: 8 КА на полярній ССО і 8 – на орбіті із середнім нахилом до екватора (в межах між 20° і 45°).

Радарні КА масою 1400 кг будуть оснащені двома сенсорами для зйомки в Х-діапазоні (з роздільною здатністю 1 м) і L-діапазоні (з роздільною здатністю 5 м). Оптичні КА масою 670 кг будуть оснащені сенсорами для фотозйомки з роздільною здатністю 0,5 м і кольорової відеозйомки з роздільною здатністю 0,4 м, а в режимі фото – до 0,25 м.

З 2016 року UrtheCast оголосила про створення ще одного угруповання – UrtheDaily. Система із 8-ми КА оптичного спостереження буде проводити зйомку з роздільною здатністю 5 м. КА будуть функціонувати на полярній орбіті, їх продуктивність складе 145 млн. км² на добу, що дозволить здійснювати щоденний глобальний огляд природних і техногенних змін. Апарати для обох угруповань побудує компанія Surrey Satellite Technology Ltd.

Таким чином, ми бачимо, що Канада паралельно з угрупованнями оптичних КА розвиває серію радарних КА, зміцнюючи лідируючі позиції на ринку радарної зйомки.

Особливості угруповань КА ДЗЗ Аргентини. Ще однією компанією орієнтованою на відеозйомку Землі є аргентинська компанія Satellogic S.A. [16]. КА NuSat (Aleph) утворюють угруповання з 8-ми апаратів, розробленого і введеного в експлуатацію Satellogic S.A. У травні 2016 р. компанія здійснила запуск перших 2-х КА свого майбутнього угруповання. NuSat 7, 8 були запуснені в січні 2020 р., NuSat 6 – у вересні 2020 р. Кожен з КА розміром (0,51×0,57×0,82) м, масою 37,5 кг здійснює у видимому і ближньому ІЧ-діапазонах як зйомку окремими кадрами, так і відеозйомку. Угруповання КА надає дані в ПХ і МС режимах з роздільною здатністю 1 м, в ГС режимі з роздільною здатністю 30 м (150 км смуги при висоті польоту 470 км), в тепловому ІЧ діапазоні з роздільною здатністю 90 м. Дане угруповання дозволяє проводити глобальний огляд кожні 6 тижнів, а надавати дані заданих ділянок до 6 разів на добу. За даними компанії, при розгортанні 25 КА повторна зйомка заданої ділянки поверхні Землі можлива через 1,2 години, при 100 КА – через 15 хвилин, а при 300 КА – через 5 хвилин.

Планується, що спочатку угруповання NuSat буде включати 90 КА з можливістю проведення щотижневого глобального огляду, в подальшому буде створено угруповання з 300 КА з можливістю проведення щоденного глобального огляду. Така інформація з'явилася після того, як компанія Satellogic уклала угоду з китайським постачальником послуг із запусків – CGWIC.

В рамках проведеного аналізу в таблиці 3 представлено деякі з реалізованих проєктів угруповань КА ДЗЗ з можливістю проведення відеозйомки.

Таблиця 3 – Угруповання КА з високою роздільною здатністю з апаратурою для проведення відеозйомки

КА	Рік	Маса, кг	Формат кадру, піксель	Розд. здатність в ПХ режимі, м	Розмір кадру, км	Час зйомки, с
SkySats	2013–2020	80–120	1920×1080	1,1	2,0×1,1	90
Lingqiao Video-A, B	2015	95	3840×2160	1,13	4,6×3,4	120
Jilin-1GF 03A	2019	165	HD	0,92	11×4,5	300
Carbonite-1	2015	90	HD	1,5	–	15
Carbonite-2	2018	100	UHD, 4096×2160	1,2	5,9×5,9	120
Jilin-1 GF 02A, 02B	2019	208	HD	0,76	19×4,5	300
NuSat	2016–2020	37,5	HD	1,0	–	–

Висновки. Показано, що основними тенденціями останніх років є поява нових угруповань КА високої і надвисокої роздільної здатності з покращеними характеристиками оптико-електронної системи спостереження Землі (наприклад, угруповання компанії Planet Labs). Також, розробляються сучасні концепції оперативної і глобальної зйомки земної поверхні з високою роздільною здатністю за допомогою угруповань малих КА (угруповання КА NuSat, SkySats, BSG, Jilin-1 Guanpu і т. п.). У технологіях ДЗЗ, крім традиційних напрямків (підвищення просторової роздільної здатності, додавання нових спектральних каналів, автоматизація процесів обробки і оперативного надання даних), з'являються розробки, пов'язані з оперативною відеозйомкою об'єктів з космосу (наприклад, Lingqiao Video A, B, серія Jilin-1 GF).

Показано, що в усьому світі продовжує зростати попит на дані ДЗЗ, продукти і сервіси на їх основі. КА ДЗЗ вже сьогодні виконують зйомку в різних спектральних каналах і з різною роздільною здатністю, з високою точністю, періодичністю та продуктивністю. Технічні характеристики продовжують удосконалюватися, з'являється можливість отримувати дані з будь-якого району Землі в будь-який час. Одна з основних тенденцій, яка буде тільки посилюватись з часом – суттєве збільшення обсягів даних, що отримуються з КА за одиницю часу, які необхідно в оперативному режимі обробити і проаналізувати для прийняття ефективних рішень.

1. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли. Геоматика. 2013. № 2. С. 16–36.
2. Данилова Т. Д., Нафиева Е. Н., Тарасова П. Д. Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2018 г. и дальнейшие перспективы. Геопроефи. 2019. № 1. С. 16–19.
3. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. № 3. С. 17–28. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.17.28>
4. Planet Labs Inc. URL: www.planet.com (accessed 20.08.2020).
5. RapidEye imagery product specifications. URL: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf> (accessed 15.06.2020).
6. PlanetScope Full Archive. URL: <https://earth.esa.int/web/guest/data-access/view-data-product/-/article/planetscope-full-archive> (accessed 15.03.2020).
7. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности. Международный научный исследовательский журнал. 2018. № 12(78). С.84–91.
8. \$22 Billion Market Value for Small Satellites over Next Ten Years 3,600 smallsats expected to be launched through 2025. URL: https://euroconsult-ec.com/7_July_2016 (accessed 14.07.2020).
9. About Digital Globe. URL: <https://www.digitalglobe.com/company/about-us> (accessed 16.04.2020).
10. WorldView- Legion. URL: <https://www.maxar.com/splash/worldview-legion> (accessed 12.05.2020).
11. WorldView-Scout. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/worldview-scout.htm (accessed 12.05.2020).
12. BlackSky Global Commercial Imaging Constellation. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/b/blacksky-constellation> (accessed 18.05.2020)
13. SpaceView Small Satellite Imaging Solutions. URL: <https://www.harris.com/solution/spaceview> (accessed 24.05.2020).
14. Sat and parts. URL: <http://www.charmingglobe.com/EWeb/product2.aspx?tid=33&id=23> (accessed 19.08.2020).
15. Satellite Programme: Gao Fen. URL: <https://www.wmo-sat.info/oscar/satelliteprogrammes/view/240> (accessed 19.08.2020).
16. Satellogic. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Satellogic> (accessed 13.07.2020).
17. Ming Li. Remote sensing satellite planning in Chinese National Space infrastructure for next eight years. Proceedings of the 68th International Astronautical Congress (IAC 2017), Australia, 2013. IAC-13-B1.2.1.
18. GaoJing / SuperView Earth Observation Constellation. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaojing> (accessed 21.07.2020).
19. GaoJing-1 01, 02, 03, 04 (SuperView 1) URL: <https://mapgroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/37-kitaj/1642-gaojing-1-01-02-03-04-superview-1> (accessed 22.07.2020).
20. Mission Overview GaoFen-5. URL: http://ceos.org/document_management/Virtual_Constellations/ACC/Meetings/AC-VC-12/Day%201/5.%20Linagfu%20Chen%20-%20GaoFeng-5%201013.pdf (accessed 21.06.2020)
21. Jilin-1 Kuanfu-01 (Jilin-1 Wideband-01). URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/jilin-1-wideband-01.htm (accessed 23.07.2020).
22. ASNARO (Advanced Satellite with New System Architecture for Observation). URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/asnaro> (accessed 25.07.2020).
23. DMS 3/Triplesat constellation-1,2,3. URL: <https://innoter.com/sputniki/dmc3-triplesat-constellation-1-2-3/> (accessed 27.07.2020).
24. Спутник ДЗЗ. CSO-1. URL: <https://ecorospace.me/CSO-1.html> (дата звернення 28.07.2020).
25. Панин Д. Н., Карягина М. В., Малахова Д. С., Салмина Я. А. Опыт международного сотрудничества в сфере дистанционного зондирования Земли: проблемы и перспективы. Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 1 (91). С. 53–56.
26. Sfera satellite constellation. URL: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=45849.0> (дата звернення 28.07.2020).
27. OptiSAR (Optical and SAR) Commercial Constellation of UrtheCast. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/optisar> (accessed 29.07.2020).

Отримано 14.09.2020,
в остаточному варіанті 25.09.2020