

АНАЛІЗ СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОРБІТАЛЬНИХ УГРУПОВАНЬ МАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЗЕМЛЕРОБСТВА

Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,

вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна;

e-mail: dakhrmov@gmail.com, oksana.volosheniuk@gmail.com

Мета роботи полягає в оцінці наявних можливостей орбітальних угруповань космічних апаратів (КА) дистанційного зондування Землі, дані яких використовуються для вирішення завдань землеробства, а також перспектив їхнього розвитку в найближчі роки. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку сучасних орбітальних угруповань малих КА дистанційного зондування Землі, створюваних приватними компаніями та використовуваних при вирішенні завдань землеробства. Опрацьовано важливі джерела інформації в космічній індустрії, а саме NewSpace Index, Gunter's Space Page, WMO OSCAR. Розглянуто 52 угруповання КА, які здійснюють різні види зйомки: оптичну мультиспектральну та гіперспектральну, теплову та мікрохвильову (радарну). Показано, що такі угруповання забезпечують повторюваність зйомки кілька разів на добу. Просторова роздільна здатність приладів оптико-електронного спостереження становить не гірше 1 м (у панхроматичному каналі). Це дозволяє розв'язувати завдання внутрішньопольового рівня, проводити квазібезперервний моніторинг стану рослин, використовувати спектральні закономірності та текстурні ознаки при вирішенні прикладних завдань землеробства. Всі угруповання радарних КА ведуть спостереження в X-діапазоні, крім радарів китайського угруповання Spacety, які ведуть зйомку в C-діапазоні. Показано, що кількість угруповань малих КА дистанційного зондування в період 2021–2025 рр. зростає більш ніж утричі, порівняно з періодом 2016–2020 рр. Значно збільшилася кількість країн, які розробляють угруповання КА дистанційного зондування Землі. Лідерами за кількістю угруповань та їхньою чисельністю серед країн є США та Китай, а серед компаній – Planet (США) і Chang Guang Satellite Technology Corporation (Китай). Особливий інтерес приватні розробники виявляють до даних теплової інфрачервоної зйомки та гіперспектральної оптичної зйомки. Новим напрямом у приватній космонавтиці, який у перспективі вплине на вирішення завдань землеробства, є створення угруповань малих метеорологічних супутників.

Ключові слова: дистанційне зондування, землеробство, супутникове угруповання, малий космічний апарат, оптична зйомка, гіперспектральна зйомка, теплова інфрачервона зйомка, радар.

The goal of this paper is to assess the existing capabilities of orbital constellations of agriculture-oriented Earth remote sensing spacecraft and the prospects for their development in the nearest future. The paper analyzes the state of the art and the trends in the development of modern orbital constellations of private companies' small Earth remote sensing satellites used in solving agricultural problems. Important sources of information in the space industry, such as NewSpace Index, Gunter's Space Page, and WMO OSCAR, were analyzed. 52 constellations of spacecraft for optical multispectral and hyperspectral, thermal, and microwave (radar) imaging are considered. It is shown that they provide a survey frequency of several times a day. The minimum spatial resolution of optoelectronic surveillance sensors is 1 m (in the panchromatic channel). This allows one to solve problems at an intrafield level, quasi-continuously monitor the plant condition, and use spectral patterns and texture features in solving applied agricultural problems. All the constellations of radar satellites use the X-band, except for the radars of the Spacety constellation (China), which use the C-band. It is shown that the number of constellations of small remote sensing spacecraft in the period 2021–2025 is to be increased by more than three times compared to the period 2016–2020. The number of countries developing constellations of Earth remote sensing satellites has increased significantly. The leading countries and companies in the number and size of constellations are the United States and China and Planet (USA) and Chang Guang Satellite Technology Corporation (China), respectively. Private developers are particularly interested in thermal infrared imaging and hyperspectral optical imaging data. A new line in the private space industry, which is expected to facilitate the solution of agricultural problems, is the deployment of constellations of small meteorological satellites.

Keywords: remote sensing, agriculture, satellite constellation, small satellite, optical imagery, hyperspectral imagery, thermal infrared imaging, synthetic aperture radar.

Вступ. Поява в останнє десятиліття орбітальних угруповань малих космічних апаратів (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), створених і керованих приватними компаніями, істотно розширила коло практичних завдань, які вирішуються за допомогою даних ДЗЗ. Однією з галузей, в яких дані таких угруповань набули широкого застосування, є землеробство [1].

Землеробство є однією з ключових галузей економіки України. Воно забезпечує близько (17–18) % ВВП (на 2019 рік) і є провідною експортною галуззю країни. Розвиток землеробства, що спирається на застосування найсу-

© Д. О. Храмов, О. Л. Волошенюк, 2023

часніших технологій, робить важливий внесок в економіку України.

Перспективи розвитку землеробства багато в чому пов'язані з удосконаленням технологій управління продуктивністю посівів, які враховують внутрішньопольову варіабельність довкілля рослин – так званого точного землеробства [2]. Застосування точного землеробства дозволяє підвищити ефективність на кожному етапі сільськогосподарських робіт, оптимізувати кількість внесених матеріалів, знизити витрати і збільшити врожайність.

Точне землеробство передбачає, що обробка полів проводиться відповідно до потреб рослин, які вирощуються у конкретному місці поля. Для цього використовується комплекс технологій, що включає глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), географічні інформаційні системи (ГІС), методи прогнозування та оцінки врожайності, технології змінного нормування (Variable Rate Technology, VRT), а також технології ДЗЗ.

Технології ДЗЗ містять супутникове та авіаційне спостереження. Останнє здійснюється за допомогою безпілотних літальних апаратів і в останні роки розвивається стрімкими темпами. Активно розвивається і «верхній ярус» ДЗЗ. Супутникові методи спостереження дозволяють охоплювати великі площі, забезпечуючи повторюваність зйомки, при цьому рік у рік зростає інформативність супутникових даних.

Мета роботи полягає в оцінці наявних можливостей орбітальних угруповань КА ДЗЗ, дані яких використовуються для вирішення завдань землеробства, а також перспектив їхнього розвитку в найближчі роки.

Як базовий стан, стосовно якого проводиться порівняння, приймемо цілковиті характеристики орбітальних угруповань малих КА ДЗЗ, розгортання яких розпочалося в 2016–2020 роках. Порівняємо їх із можливостями подібних угруповань, розгортання яких розпочалося (або почнеться) в період 2021–2025 років.

Відома велика кількість оглядів [1–4], присвячених використанню даних ДЗЗ у завданнях сільського господарства та, зокрема, точного землеробства. Багато з них зачіпають перспективи застосування цих даних, появу нових видів даних. Проте, наскільки відомо авторам, у подібній постановці завдання є новим.

Види даних ДЗЗ. ДЗЗ здійснюється шляхом спостереження та вимірювання енергетичних і поляризаційних характеристик випромінювання спостережуваного об'єкта в різних діапазонах електромагнітних хвиль. Робочий діапазон довжин хвиль, які приймає знімальна апаратура супутників, становить від часток мікрометра (видиме оптичне випромінювання) до одиниць метрів (радіохвилі). Діапазони хвиль, які використовуються в ДЗЗ, а також результати вимірювань істотно залежать від прозорості атмосфери. Методи ДЗЗ бувають активними і пасивними. В активних методах прилад опромінює земну поверхню, а потім реєструє відбитий від неї сигнал. У пасивних методах прилад тільки приймає електромагнітне випромінювання, що йде від досліджуваного об'єкта (власне випромінювання об'єкта або відбите сонячне випромінювання).

Для розв'язання завдань землеробства, як правило, використовують три види знімальних приладів: оптичні сенсори, теплові сенсори та радари. Найбільшого поширення в практиці ДЗЗ набули прилади оптичного спостереження, що працюють у діапазонах видимого, ближнього інфрачервоного та короткохвильового інфрачервоного світла (400–2500) нм. Діапазон довжин хвиль від видимого до ближнього інфрачервоного світла (400–1000) нм має назву VNIR (visible and near-infrared). Електромагнітне випромінювання з

довжинами хвиль (1000–2500) нм належить до короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR).

Оптичні сенсори і дані, які вони збирають, підрозділяють на мультиспектральні та гіперспектральні. Мультиспектральний сенсор робить знімок об'єкта в декількох смугах спектра (спектральних каналах), кількість яких коливається від одиниць до кількох десятків.

Чим більше спектральних каналів, тим точніше буде представлено спектр відображення об'єкта. Найкращі результати дає гіперспектральна зйомка, що дозволяє отримати майже безперервний спектр відбиття. Досягається це за рахунок застосування великої кількості вузьких (шириною (5–10) нм) спектральних каналів. Як правило, гіперспектральні сенсори нараховують сотні спектральних каналів.

У теперішній час оптичні дані є найпоширенішим видом даних ДЗЗ, застосовуваним для вирішення широкого кола завдань. Переважну більшість оптичних даних складають дані мультиспектральних сенсорів.

Теплові сенсори працюють у діапазоні теплового інфрачервоного випромінювання (Thermal InfraRed, TIR): (8000–14000) нм. Ці прилади служать для визначення температури поверхні, дозволяють виявити осередки загорянь, а також служать для оцінювання вологості ґрунту.

Третім видом знімальної апаратури є радары – прилади, які випромінюють сигнал у мікрохвильовому діапазоні (від 1 мм до 1 м), і реєструють характеристики відбитого поверхнею сигналу. Радари дозволяють отримувати зображення вдень і вночі, в тому числі, крізь хмарний покрив і дим, що перешкоджають спостереженням за допомогою оптичних та теплових сенсорів. Таким чином, радары дозволяють забезпечити регулярний моніторинг поверхні Землі. Радарні дані дозволяють оцінити вологість ґрунту, стан рослин (наприклад, висоту рослин та густоту посадки). За ними можна відстежити низку агротехнічних операцій, а також судити про техніку їх виконання.

Пошук інформації. Основними джерелами інформації послужили бази даних сайтів: NewSpace Index (<https://www.newspace.im>), Gunter's Space Page (<https://space.skyrocket.de/index.html>) та WMO OSCAR Space-based capabilities (<https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>).

До результатів пошуку включено угруповання малих КА, масою від кількох кілограмів (CubeSat 6U) до 250 кг. Розглянуто приватні компанії, які офіційно заявили про використання своїх супутників, серед іншого, для вирішення сільськогосподарських завдань.

Запуск супутника-демонстратора вважався початком розгортання орбітального угруповання.

Результати. Відомості про знайдені угруповання супутників ДЗЗ розміщено в табл. 1–4 [5]. Під роздільною здатністю в таблицях розуміється просторова роздільна здатність даних. В стовпці "Країна" вказано країну, де зареєстрована компанія-оператор угруповання. Стовпець "Рік" містить рік початку розгортання угруповання. В стовпці "Чисельність" у дужках зазначено заплановану чисельність угруповання.

Всі угруповання, будучи повністю розгорнуті, повинні забезпечувати час повторної зйомки менше 1 доби, тому час повторної зйомки в таблицях не вказано.

Угруповання супутників ДЗЗ, що проводять мультиспектральну оптичну зйомку й відеозйомку, збирають (або планують збирати) дані високої і надвисокої просторової роздільної здатності представлено в табл. 1. Зазначимо, що просторова роздільна здатність в 1 м, що часто зустрічається в літературі

як границя між високою і надвисокою роздільною здатністю, належить до панхроматичного каналу. У стовпці "Роздільна здатність" (табл. 1) наведено просторову роздільну здатність спектральних каналів діапазону VNIR або пари панхроматичний канал і VNIR.

Табл. 1 – Угрупування супутників, що здійснюють мультиспектральну оптичну та відеозйомку

Назва	Роздільна здатність, м	Чисельність	Компанія	Країна	Рік
Flock	3,7	424	Planet	США	2014
SkySat	0,9–2	21	Planet	США	2013
Jilin-1 Gaofen 02	0,75	4	Chang Guang Satellite (CGS)	Китай	2019
Jilin-1 Gaofen-03	1–4	64	Chang Guang Satellite	Китай	2019
Jilin-1 Gaofen-04	0,5	1 (?)	Chang Guang Satellite	Китай	2022
Jilin-1 Gaofen-06	0,5–5	30	Chang Guang Satellite	Китай	2023
Jilin-1 Kuanfu-02	0,5–3	1 (?)	Chang Guang Satellite	Китай	2023
Jilin-1 Mofang	< 1	4	Chang Guang Satellite	Китай	2022
Jilin-1 Pingtai	–	3	Chang Guang Satellite	Китай	2022
Jilin-1 Shipin	1	6	Chang Guang Satellite	Китай	2017
NuSat (NewSat)	0,7–4	38	Satellologic	США	2016
Zhuhai-1 OVS	< 1,9	4	Zhuhai Orbita Aerospace Science & Technology	Китай	2017
Tianyi	–	2 (?)	Spacety	Китай	2019
GRUS-1	2,5–5	5 (9)	Axelspace	Японія	2018
STORK	5	5 (14)	SatRev	Польща	2022
Jinzijing (Golden Bauhinia)	4	9 (132)	Beijing Zero G Lab	Китай	2021
Pleiades Neo	0,3–1,2	4 (?)	Airbus Intelligence	Німеччина	2021
Sejong	5	1 (50)	Hancom Inspace	Південна Корея	2022
EOS SAT	1,4–2,8	1 (7)	EOS Data Analytics	США	2023
Open Constellation	2,5	1 (25)	Open Cosmos	Великобританія	2023
EarthDaily	–	0 (8)	EarthDaily Analytics	Канада	2024
Pelican	0,3	0 (32)	Planet	США	2023
JAPETUS	1	0 (20)	Prométhée Earth Intelligence	Франція	2023
SatSure	1– ?	0 (4)	SatSure	Індія	2024
Guardian	–	1 (20)	Aistech	Іспанія	2022

Американська компанія Planet має найбільші за чисельністю супутникові угруповання. Її угруповання Flock складається з апаратів власного виробництва (Dove і SuperDove), загальна кількість яких перевищує сумарну чисельність всіх інших супутникових угруповань ДЗЗ. КА угруповання SkySat, що ведуть зйомку надвисокої роздільної здатності, виготовлені компанією Maxar Space Infrastructure.

Китайська компанія Chang Guang Satellite Technology Corporation володіє другим за чисельністю флотом КА оптичного спостереження, що складається з декількох угруповань КА Jilin-1. У планах компанії досягти до 2025 р. періодичність зйомки в 10 хвилин [6].

Угруповання SkySat, Jilin-1 Gaofen-03, Jilin-1 Shipin і Zhuhai-1 OVS мають можливості відеозйомки у видимому діапазоні (табл. 1). КА двох останніх угруповань виконують тільки відеозйомку, а SkySat і Jilin-1 Gaofen-03 дозволяють також отримувати мультиспектральні знімки. 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 захвату, порівняно з іншими супутниками надвисокої роздільної здатності: замість одиниць кілометрів вона становить 150 км.

Французьке угруповання JAPETUS (табл. 1, 2), крім мультиспектральних, буде містити і КА, що ведуть гіперспектральну зйомку. Кількість апаратів обох видів у загальній чисельності угруповання наразі не відома. Також невідома кількість апаратів із тепловими сенсорами у складі іспанського угруповання ДЗЗ Guardian (табл. 1, 3). У відповідних таблицях вказано загальні заплановані чисельності цих угруповань.

На відміну від переважної більшості угруповань ДЗЗ, що виконують мультиспектральну зйомку в діапазонах VNIR та SWIR, КА південнокорейського угруповання Sejong ведуть зйомку тільки в діапазоні VNIR.

В табл. 1 не вказано угруповання КА BlackSky, оскільки однойменна компанія не заявляє про застосування своїх даних для вирішення завдань землеробства. Угруповання WorldView Legion компанії Maxar не включено в таблицю, оскільки масу одного КА оцінюють у 750 кг, що виходить за межі розглянутого нами діапазону.

В табл. 2 представлено угруповання КА ДЗЗ, що здійснюють гіперспектральну оптичну зйомку.

Серед розгорнутих угруповань найбільшу чисельність мають китайське Zhuhai-1 OHS та американське GHOS. Найамбітішні плани за кількістю КА – у канадського GenMat (600) і фінського Hyperfield (100). В угрупованні GenMat передбачається обмежити спостереження діапазоном VNIR. Розгортання Hyperfield має завершитися в 2030 р. і забезпечити зйомку будь-якої ділянки Землі в діапазонах VNIR і SWIR із частотою 2 – 3 рази на добу. Компанія Kuva Space, власник Hyperfield, уклала п'ятирічний контракт з Європейською комісією на постачання гіперспектральних даних для програми Copernicus Contributing Mission [7].

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

Зазначимо також плани компанії Planet щодо розвитку угруповання Tanager. Запуск двох КА цього угруповання заплановано на 2023 р. [8].

Характеристики угруповань КА, що здійснюють теплову зйомку поверхні Землі, наведено в табл.3.

Табл. 2 – Угрупування супутників, що ведуть гіперспектральну оптичну зйомку

Назва	Роздільна здатність, м	Чисельність	Компанія	Країна	Рік
Jilin-1 Guanpu	5	2	Chang Guang Satellite	Китай	2019
Zhuhai-1 OHS	10	8	Zhuhai Orbita Aerospace Science & Technology	Китай	2018
Hyperfield	25	0 (100) ²	Kuva Space	Фінляндія	2023
GHOSSt	8	3 (6)	Orbital Sidekick	США	2023
Pixxel	10	2 (20)	Pixxel	Індія	2022
Wyvern	5,3	2 (36)	Wyvern	Канада	2023
Tanager (Carbon Mapper)	30	0 (?)	Planet	США	2023
Esper	6	0 (18)	Esper Satellite Imagery	Австралія	2023
Hypersat	9	0 (6)	Hypersat	США	2023
HySpecIQ	1 – 5	0 (12)	HySpecIQ	США	2023
JAPETUS	5	0 (20)	Prométhée Earth Intelligence	Франція	2023
GenMat	5	0 (600)	GenMat	Канада	2023
XCraft	2	0 (12)	Xplore	США	2023

Табл. 3 – Угрупування супутників, які здійснюють теплову зйомку

Назва	Роздільна здатність, м	Чисельність	Компанія	Країна	Рік
Jilin-1 Hongwai	–	8	Chang Guang Satellite	Китай	2022
Constellr	30	0 (30)	Constellr	Німеччина	2024
FOREST	80	2 (100)	OroraTech	Німеччина	2022
Hydrosat	–	1 (16)	Hydrosat	США	2023
HotSat	3,5	1 (8)	SatVu	Великобританія	2023
Guardian	–	1 (20)	Aistech	Іспанія	2022

Найбільшу кількість КА серед розгорнутих угруповань має китайська Jilin-1 Hongwai, цільові характеристики якої невідомі. Зазначимо активність німецьких компаній OroraTech і Constellr, які планують створити угруповання, що складаються зі 100 і 30 КА відповідно.

Супутники HotSat британської компанії SatVu проводять спостереження в середньохвильовому інфрачервоному діапазоні (MIR): (3400–5000) нм. Це дозволяє спростити датчики та знизити їх вартість. Разом з тим, такий підхід може створити труднощі у перетворенні отриманих на знімку значень яскравості в температуру земної поверхні.

Угрупування КА ДЗЗ, що здійснюють радарну зйомку земної поверхні представлено в табл. 4. В якості просторової роздільної здатності вказано наземну просторову роздільну здатність у маршрутному режимі зйомки (Stripmap).

Усі зазначені в табл. 4 угруповання КА ведуть спостереження в Х-діапазоні (2,4–3,5) см, окрім китайської компанії Spacety, яка створює угруповання з радарів С- (3,8–7,5) см і Х-діапазонів.

Лідерами за чисельністю угруповань є фінська компанія ICEYE, а також американські Capella Space та Umbra Lab. В табл. 4 вказано чисельність КА угруповання ICEYE, які належать материнській компанії й управляються з Фінляндії. Частина угруповання ICEYE належить дочірній компанії в США і працює в інтересах безпеки. Ще два КА, виготовлені ICEYE (Carcara 1 і 2), належать Військово-повітряним силам Бразилії.

Табл. 4 – Угрупування супутників, що здійснюють радарну зйомку

Назва	Роздільна здатність, м	Чисельність	Компанія	Країна	Рік
Capella-2 (Sequoia, Whitney)	1,2	9	Capella Space	США	2020
Capella-3 (Acadia)	–	1 (30)	Capella Space	США	2023
ICEYE	3	20	ICEYE	Фінляндія	2018
Spacety (Chaohu)	1	2 (?)	Spacety	Китай	2022
QPS-SAR	< 0,5 (Spotlight)	3 (36)	iQPS	Японія	2019
StriX	3	1 (25)	Synspective	Японія	2022
Umbra-SAR	< 0,5	6 (24)	Umbra Lab	США	2021
PIESAT	0,5 (Spotlight)	4	Galaxy Space	Китай	2023
XpressSAR	3	0 (4)	XpressSAR	США	2024

В табл. 4 не вказано угруповання КА CHORUS, GenMap та SAR-XL. Канадська компанія MDA (розробник RADARSAT'ів) заявила про плани зі створення угруповання CHORUS, яке має складатися з радарів С- і Х-діапазонів. Однак маса супутників, чисельність угруповання та терміни його запуску наразі невідомі. Також немає даних щодо канадського угруповання GenMap, крім того, що воно має складатися з радарів S- (7,5–15) см і Х-діапазонів [9]. Канадська Space Alpha планує стати першою компанією, що збирає радарні дані з кожного КА угруповання SAR-XL одночасно в двох діапазонах: Х і L (15–30) см. Терміни запуску супутників цього угруповання наразі невідомі.

На рис. 1 показано розподіл супутникових угруповань за типами даних, що збираються (Г – гіперспектральні, М – мультиспектральні, Р – радарні, Т – теплові). Зазначимо загальне зростання кількості угруповань ДЗЗ за 2021–2025 рр. порівняно з попереднім п'ятирічним періодом, а також значне зростання інтересу до гіперспектральних даних та даних теплової зйомки (угруповання для збору даних останнього типу в 2016–2020 рр. були відсутні).

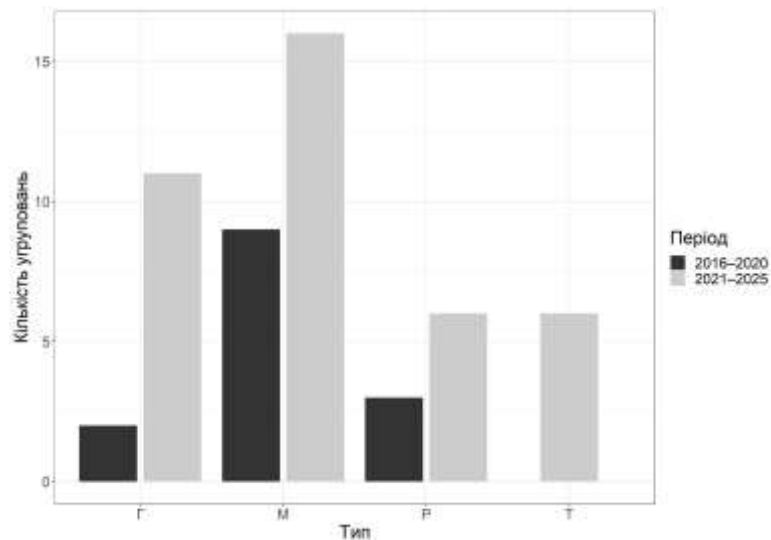


Рис. 1 – Розподіл супутникових угруповань за типами даних (Г – гіперспектральні, М – мультиспектральні, Р – радарні, Т – теплові)

Розподіл супутникових угруповань КА ДЗЗ за країнами, де зареєстровані компанії-оператори, показано на рис. 2. Кількість країн, що створюють подібні угруповання, зросла більш ніж утричі: до 2021 р. їх 4, після 2021 р. – 13. До лідерів – США, Китаю і Японії – намагається підтягнутися ряд країн, на-самперед Канада та Німеччина, які створюють одразу кілька супутникових угруповань.

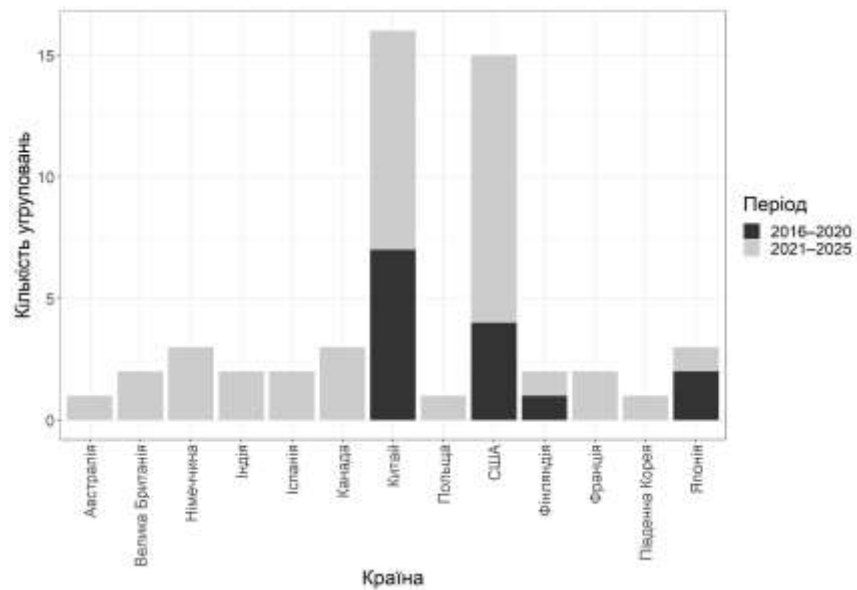


Рис. 2 – Розподіл супутникових угруповань за країнами

Серед нових напрямів у галузі приватної космонавтики, що впливають на вирішення завдань землеробства, необхідно відзначити створення приватних метеорологічних супутників. Так, американська компанія Muon Space запустила у 2023 р. 70-ти кілограмовий супутник-демонстратор MuSat-1 і планує створення угруповання для моніторингу та прогнозу погоди [10]. Починаючи з 2024 року, на вдосконалених супутниках MuSat-2 і -3 будуть проводитися випробування мікрохвильових і гіперспектральних датчиків. Tomorrow.io

(США) також розробляє угруповання малих метеорологічних супутників, оснащених радаром і мікрохвильовими зондами. В 2022 р. компанія виграла контракт ВПС США вартістю 19,3 млн. дол. на підтримку розроблення метеорологічних супутників і надання даних в якості сервісу військовим та іншим урядовим установам [11].

Висновки. Відзначається значне зростання інтересу приватних компаній до створення угруповань малих КА ДЗЗ: кількість таких угруповань за період 2021–2025 рр. зросла більш ніж утричі порівняно з 2016–2020 рр. Особливий інтерес приватні розробники виявляють до даних теплової інфрачервоної зйомки та гіперспектральної оптичної зйомки.

Значно збільшилася кількість країн, що розробляють угруповання малих КА ДЗЗ. Лідерами за кількістю угруповань і їх чисельністю є США та Китай. Американська компанія Planet і китайська Chang Guang Satellite Technology Corporation створюють угруповання, що виконували всі види зйомки, крім радарної.

Усі створювані угруповання КА ДЗЗ планують забезпечити просторову роздільну здатність не гірше 1 м (в панхроматичному каналі) і повторюваність зйомки кілька разів на добу.

Всі існуючі та перспективні угруповання радарних супутників ведуть спостереження в Х-діапазоні. Радари китайського угруповання Spacety ведуть також зйомку в С-діапазоні. Інтерес до створення мультидіапазонних угруповань радарних КА, вочевидь, втілиться в конкретні рішення після 2025 р.

Новим напрямом у приватній космонавтиці, що в перспективі може вплинути на вирішення завдань землеробства, є створення угруповань малих метеорологічних супутників.

1. Sishodia R. P., Ray R. L., Singh S. K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 19. P. 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
2. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 2013. Vol. 114, № 4. P. 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
3. Mani P. K. et al. Remote Sensing and Geographic Information System: A Tool for Precision Farming. *Geospatial Technologies for Crops and Soils*. Springer, Singapore. 2020. P. 528. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6864-0_2
4. Segarra J. et al. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 5. P. 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
5. Khramov D., Volosheniuk O. Commercial orbital constellations of small spacecraft used for agriculture: 2016 – 2025. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8429960>
6. Jones A. Chinese commercial remote sensing satellite firm to double size of constellation. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/chinese-commercial-remote-sensing-satellite-firm-to-double-size-of-constellation/> (дата звернення: 09.10.2023).
7. Werner D. Kuva Space wins 5-million-euro award for hyperspectral data. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/kuva-space-wins-5-million-euro-award-to-supply-hyperspectral-data/> (дата звернення: 12.10.2023).
8. Werner D. Planet shares information on Tanager hyperspectral constellation. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/planet-hyperspectral-details/> (дата звернення: 12.10.2023).
9. Williams A. Exobotics wins contract to build GenMat prospecting satellite. *Electronics Weekly*. URL: <https://www.electronicsweekly.com/news/exobotics-wins-contract-to-build-genmat-prospecting-satellite-2022-11/> (дата звернення: 10.10.2023).
10. Werner D. Muon celebrates launch of first satellite in Climate Constellation. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/muon-celebrates-launch-of-first-satellite-in-climate-constellation/> (дата звернення: 10.10.2023).
11. Werner D. Tomorrow.io wins Air Force funding for weather satellite constellation. *SpaceNews*. URL: <https://spacenews.com/tomorrow-io-wins-air-force-contract> (дата звернення: 09.10.2023).

Отримано 17.11.2023,
в остаточному варіанті 05.12.2023