УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2024.04.017

Д. О. ХРАМОВ, О. О. ПИРОЖЕНКО

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В КОМЕРЦІЙНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТАХ

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

Комерційні космічні апарати (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) наразі використовують методи оптичної мультиспектральної та гіперспектральної, теплової інфрачервоної, а також радарної зйомки. Водночас можливості наявних і перспективних методів ДЗЗ використовуються в комерційних КА далеко не повністю. Проведено аналіз тенденцій розвитку оптичних методів ДЗЗ, метою якого є визначення перспектив застосування даних методів у комерційних КА ДЗЗ. Розглянуто оптичну мультиспектральну, гіперспектральну та лідарну зйомку, а також методи, засновані на вимірюванні флуоресценції хлорофілу. Показано, що мультиспектральна оптична зйомка розвивається шляхом збільшення кількості спектральних каналів, використання вужчих каналів, підвищення просторової роздільної здатності в задачах детальної й оглядової зйомки, а також збільшення повторюваності зйомки без зниження просторової роздільної здатності завдяки використанню угруповань недорогих малих КА. Гіперспектральна і лідарна зйомки стикаються з проблемами опрацювання і передавання великого обсягу даних. Перспективним способом розв’язання цієї проблеми є оброблення даних безпосередньо на борту КА. У галузі лідарної зйомки є передумови до створення угруповання КА, що забезпечує регулярне щорічне глобальне покриття земної суші. Методи ДЗЗ, що використовують флуоресценцію хлорофілу, перебувають на стадії накопичення та узагальнення експериментального матеріалу. Разом з тим, ці методи відкривають нові можливості у вирішенні багатьох екологічних завдань, а також завдань землеробства. Інтеграція спектральної та структурної інформації, що надається методами оптичної зйомки і лідарами, в перспективі може бути використана для вирішення широкого кола завдань. При цьому можливе створення орбітальних угруповань, у яких окремі КА використовуватимуть різні методи ДЗЗ, а також угруповань універсальних КА, що несуть кілька видів знімальної апаратури.

Ключові слова: *дистанційне зондування, мультиспектральна зйомка, гіперспектральна зйомка, лідар, сонячно-індукована флуоресценція хлорофілу.*

Commercial remote sensing spacecraft currently use optical multispectral and hyperspectral, thermal infrared and radar imaging methods. At the same time, the capabilities of existing and promising remote sensing methods are not fully utilized in commercial satellites. Trends in the development of optical remote sensing methods are analyzed with the aim to determine prospects for the application of these methods in commercial remote sensing satellites. Optical multispectral, hyperspectral, and lidar imaging and methods based on chlorophyll fluorescence measurement are considered. It is shown that multispectral optical imaging is developing by way of increasing the number of spectral channels, using narrower channels, and increasing the spatial resolution in tasks of detailed and survey imaging and by way of increasing the repeatability of imaging without reducing the spatial resolution due to the use of constellations of inexpensive small satellites. Hyperspectral and lidar imaging face the problems of processing and transmission of a large amount of data. A promising way to solve these problems is to process data immediately onboard the spacecraft. In lidar imaging, there are prerequisites for the formation of a constellation of satellites to provide a regular annual global coverage of the Earth’s dry land. Remote sensing methods based on chlorophyll fluorescence are at the stage of accumulation and generalization of experimental data. At the same time, these methods open new opportunities in solving many ecological and agricultural problems. The integration of spectral and structural information provided by optical imaging methods and lidars may be used in the future to solve a wide range of problems. It is possible to form orbital constellations in which individual satellites will use different remote sensing methods and constellations of universal satellites equipped with several types of imaging devices.

Keywords: *remote sensing, multispectral imaging, hyperspectral imaging, lidar, solar-induced chlorophyll fluorescence.*

Вступ. Збільшення чисельності та розширення сфери застосування малих комерційних космічних апаратів (КА) є тенденцією останніх десяти років розвитку галузі дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Багато подібних КА об’єднані в орбітальні угруповання, які можуть налічувати десятки супутників. Переважна більшість подібних КА та угруповань використовують методи оптико-електронного та радарного спостереження Землі. Разом з тим, методів ДЗЗ з космосу існує набагато більше, і далеко не завжди їх застосуванню на малих КА перешкоджають технічні обмеження. Крім того, постійно вдосконалюються технології створення малих КА. Нині низка компаній здатна здійснювати промисловий випуск супутникових платформ масою 150–300 кг із темпом виробництва до кількох десятків апаратів на рік. У зв'язку з цими обставинами актуальним є завдання виявлення перспективних методів ДЗЗ, придатних для використання на малих КА та їхніх угрупованнях.

Мета роботи полягає в тому, щоб виявити перспективні напрямки ДЗЗ з космосу для реалізації на малих КА ДЗЗ. Для цього необхідно розглянути наявні та перспективні методи ДЗЗ і встановити, чи можлива їхня реалізація на орбітальних угрупованнях малих комерційних КА ДЗЗ. Наскільки відомо авторам, такої задачі у вітчизняній науковій літературі за останні десять років не розглядали.

24 вересня 1999 року з космодрому Ванденберг (шт. Каліфорнія, США) було запущено на орбіту IKONOS – перший комерційний КА ДЗЗ з надвисокою (<1 м) просторовою роздільною здатністю. Розроблена фірмою Kodak оптико-електронна камера супутника давала змогу отримувати зображення в смузі огляду завширшки 11 км у панхроматичному каналі з роздільною здатністю від 0,8 м та в чотирьох каналах видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів з роздільною здатністю від 3,2 м.

Наразі комерційні КА ДЗЗ освоїли застосування оптичної мультиспектральної та гіперспектральної, теплової інфрачервоної, а також радарної зйомки. Водночас можливості наявних і перспективних методів ДЗЗ використовуються в комерційних КА далеко не повністю. У роботі проводиться аналіз тенденцій розвитку оптичних методів ДЗЗ, метою якого є визначення перспектив застосування даних методів у комерційних КА ДЗЗ.

Дистанційне зондування є методом отримання інформації про об'єкт або явище без безпосереднього фізичного контакту з ними. ДЗЗ з космосу здійснюється шляхом вимірювання енергетичних і поляризаційних характеристик електромагнітного випромінювання спостережуваного об'єкта в ділянках спектра, які не поглинаються атмосферою Землі. Робочий діапазон довжин хвиль, які приймає знімальна апаратура супутників, становить від часток мікрометра (ультрафіолетове випромінювання) до одиниць метрів (радіохвилі).

Методи ДЗЗ бувають активними і пасивними. В активних методах знімальний прилад (датчик) випускає електромагнітний сигнал, опромінюючи земну поверхню, а потім реєструє відбите від неї випромінювання. У пасивних методах прилад тільки приймає електромагнітне випромінювання, що йде від досліджуваного об'єкта – власне випромінювання об'єкта або відбите сонячне випромінювання.

Технології ДЗЗ охоплюють наземне, повітряне (від безпілотних літальних апаратів до стратосферних платформ) і супутникове спостереження. Далі будуть розглянуті методи ДЗЗ з космосу, призначені для спостереження поверхні Землі. Методи ДЗЗ, спрямовані на вимірювання параметрів атмосфери та іоносфери, залишаються за рамками цієї роботи.

Джерела інформації. Якщо не вказано іншого джерела інформації, то дані про КА ДЗЗ до 2002 року взято з [1], а після 2002 року – з веб-ресурсів: General Catalog of Artificial Space Objects, eoPortal Satellite Missions catalogue, Gunter's Space Page, Satellite Imaging Corp. Satellite Sensors and Specifications і WMO OSCAR Space-based capabilities. Дані про супутники Landsat і Hyperion взято з сайту Геологічної служби США (U.S. Geological Survey), дані про КА Sentinel – з веб-ресурсу Sentinel Online.

Оптична мультиспектральна зйомка. Оптичні методи спостереження Землі фіксують відбите земною поверхнею сонячне випромінювання в діапазоні від ультрафіолетового до короткохвильового інфрачервоного (0,3 – 3) мкм.

На самому початку освоєння космічного простору зйомка з космосу велась в єдиному діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра. Найчастіше – в діапазоні видимого випромінювання (0,38 – 0 ,75) мкм. З розвитком техніки, зйомку стали виконувати в декількох діапазонах, а до видимого випромінювання додалися діапазони інфрачервоного (ІЧ) випромінювання – ближнього (0,75 – 1,4) мкм і короткохвильового (1,4 – 3) мкм. Використання декількох спектральних діапазонів для отримання інформації про об’єкт називається мультиспектральною зйомкою. Нині кількість діапазонів, у яких здійснюється мультиспектральна зйомка, коливається від чотирьох до кількох десятків.

Перші мультиспектральні знімки земної поверхні, виконані на рубежі 1960–1970 років астронавтами «Аполлонів» і космонавтами «Союзів», являли собою фотознімки в трьох спектральних діапазонах видимого світла і в діапазоні ближнього ІЧ-випромінювання. Подібні можливості мала знімальна апаратура супутника Landsat 1, запущеного в липні 1972 р. Наявність ближнього ІЧ-діапазону дає змогу досліджувати стан рослинності, відбивна здатність якої в цьому діапазоні значно вища, ніж у діапазоні видимого світла. Крім того, ІЧ-випромінювання краще проникає крізь хмари, серпанок і дим, що дає змогу отримувати зображення в несприятливих погодних умовах. Конфігурація чотирьох каналів видимого і ближнього ІЧ-діапазонів (англ.: VNIR = Visible + Near InfraRed) на довгі роки стала стандартом для супутників ДЗЗ.

Через 10 років, на запущеному в липні 1982 р. Landsat 4 був встановлений прилад Thematic Mapper, що давав змогу, крім зазначених вище діапазонів, вести зйомку в діапазоні короткохвильового ІЧ-випромінювання (SWIR2: (2,08 – 2,35) мкм). Цей діапазон, зокрема, дає змогу розділяти ділянки відкритої землі та рослинного покриву, що нефотосинтезує, а також виявляти джерела відкритого вогню. У приладі Enhanced Thematic Mapper Plus супутника Landsat 7, запущеного у квітні 1999 р., додався ще один діапазон короткохвильового ІЧ-випромінювання: SWIR1 (1,55 – 1,75) мкм.

Супутники Landsat стали орієнтиром під час вибору складу спектральних каналів апаратури MultiSpectral Instrument (MSI) КА Sentinel-2 (перший апарат цієї серії, Sentinel-2A, було запущено в червні 2015 р.). У MSI з’явилися три нові спектральні канали: 0,705 мкм, 0,740 мкм і 0,783 мкм, що належать до так званого червоного краю (Red Edge) фотосинтезу. За зміщенням червоного краю в ту чи іншу область спектра можна діагностувати стан рослин.

КА сімейства Landsat Next, що є продовженням програми Landsat, зі свого боку увібрали досвід, накопичений під час експлуатації супутників Sentinel-2. Запуск першого КА Landsat Next передбачається у 2030 р. На цих апаратах має бути по 26 спектральних каналів (з них 4 належать до теплового ІЧ-випромінювання). З’являться жовтий і помаранчевий канали, два червоні канали, два канали червоного краю, а канал SWIR2 розділиться на три вужчі канали.

Крім збільшення числа спектральних каналів, змінювалася їхня ширина. Ранні супутники Landsat мали спектральні канали шириною (70 – 80) нм. Згодом стали з'являтися вужчі канали. Так, три канали червоного краю у Sentinel-2 MSI мають ширину (15 – 20) нм, а у Landsat Next таких каналів буде більше десятка. Вузькі спектральні канали дають змогу отримувати менш зашумлену інформацію про відбивну здатність об'єктів у конкретній ділянці спектра, а отже, краще виявляти фізичні та хімічні процеси, які стоять за зміною відбивної здатності.

Тенденція до збільшення кількості спектральних каналів і зменшення їхньої ширини спостерігається у багатьох супутників. Наприклад, на зміну КА Planet Dove з чотирма каналами VNIR приходять КА Planet SuperDove з восьмома спектральними каналами, включно з каналом Red Edge. Проте в низці випадків спостерігається рух у зворотному напрямку. Так, КА WorldView Legion американської компанії Maxar, порівняно з попереднім сімейством КА, WorldView, позбулися короткохвильових ІЧ-каналів. Очевидно, пріоритет при використанні WorldView Legion буде віддаватися розвідувальним завданням, де зазначені канали не є необхідними. Зате їхня відсутність дасть змогу знизити масу і вартість КА.

Тенденцію до підвищення має і просторова роздільна здатність знімальної апаратури КА ДЗЗ. Однак ця тенденція далеко не така очевидна, як може здатися на перший погляд. В останнє десятиліття з'явилися комерційні КА ДЗЗ із просторовою роздільною здатністю 0,3 м і вище (WorldView Legion, Pleyades Neo та ін.), які по суті є КА подвійного призначення. При цьому просторову роздільну здатность 0,6 м, мабуть, було досягнуто ще на американських розвідувальних супутниках KH-7 Gambit у другій половині 1960-х років, а КА наступних серій мали й вищу роздільну здатність [2].

Сучасні комерційні КА ДЗЗ досягли просторової роздільної здатності (0,25 – 0,3) м на низьких навколоземних орбітах висотою від 400 км до 2000 км. Розвиваються проєкти зі створення супутників на наднизьких орбітах (висотою нижче 400 км). Це дасть змогу здійснювати оптичну зйомку поверхні планети з просторовою роздільною здатністю близько 10 см. Проблемою тут є занадто короткий термін існування супутників на таких орбітах через сили аеродинамічного опору, що значно збільшуються. Тривають активні дослідження з розробки двигунів для підтримання висоти орбіти подібних КА. Зазначимо, що ще в другій половині 1970-х років розвідувальні КА KH-11 KENNEN, ймовірно, досягали просторової роздільної здатності <10 см, розташовуючись на еліптичних орбітах 250 км × 500 км. Термін активного існування таких супутників не перевищував 2 – 3 років.

Поряд із завданнями оперативного високодетального спостереження існують і завдання оглядового спостереження, які вимагають регулярної зйомки великих площ земної поверхні. Найдосконалішими КА, використовуваними для розв'язання оглядових завдань, нині є КА Dove і SuperDove компанії Planet (США). Знімальна апаратура цих КА має просторову роздільну здатність (3 – 5) м, а їхнє вдосконалення відбувається насамперед шляхом збільшення частоти зйомки і кількості спектральних каналів. В останньому випадку зразком виступав КА Sentinel-2 з максимальною роздільною здатністю 10 м і тринадцятьма спектральними каналами.

Збільшення частоти зйомки в оглядових завданнях раніше досягалося використанням КА з низькою просторовою роздільною здатністю (100 – 1000) м.

Такі КА мають велику ширину смуги огляду, що дає змогу досягти високої частоти зйомки завдяки використанню одиничних КА. Зараз подібне завдання вирішується створенням орбітальних угруповань з безлічі малих КА, які мають середню і високу просторову роздільну здатність. До таких угруповань належать Flock компанії Planet, що складається з КА Dove і SuperDove, а також Jilin-1 компанії Chang Guang Satellite (Китай). Кожне з угруповань налічує понад кілька десятків активних КА.

Слід також відзначити тенденцію до універсалізації малих КА ДЗЗ. З одного боку, завдяки розвитку електроніки та інших технологій знижується маса КА. Великі КА ДЗЗ початку 2000-х років, оснащені кількома корисними навантаженнями, як-то Terra (маса понад 5 т), Aqua (понад 3 т) або ENVISAT (понад 8 т), змінилися в 2010-х років апаратами на кшталт Sentinel-3 з масою 1,2 т. Сучасні технології, вочевидь, дадуть змогу знизити масу подібних КА до тонни і менше, переводячи їх у клас малих КА. Ранні комерційні КА ДЗЗ мали єдине корисне навантаження, що давало змогу спростити конструкцію, знизити масу і вартість КА. Зараз комерційні компанії розробляють супутникові платформи, що дають змогу розмістити кілька корисних навантажень, залишаючись у рамках КА з масою менше ніж 1 т.

Оптична гіперспектральна зйомка, як і мультиспектральна, здійснюється в діапазоні довжин хвиль від ультрафіолетового до короткохвильового ІЧ-випромінювання. Відмінність полягає в тому, що під час гіперспектральної зйомки використовується набагато більше спектральних каналів і ці канали мають меншу ширину. Сучасна апаратура для гіперспектральної зйомки налічує від кількох десятків до кількох сотень спектральних каналів, ширина яких не перевищує 10 нм. Це дає змогу більш повно відновити профіль кривої спектральної відбивної здатності спостережуваної поверхні. По суті, гіперспектральна зйомка являє собою оптичну спектроскопію з космосу.

Вперше експеримент із гіперспектральної зйомки з космосу природних утворень на Землі було здійснено в жовтні 1969 р. під час польоту космічного корабля «Союз-7». Зйомку проводили в діапазоні видимого світла (0,430 – 0,69) мкм за допомогою модифікованого ручного спектрографа РСС-2. Результати її дали змогу класифікувати основні типи природних утворень за спектрами, виміряними за межами земної атмосфери [3].

У подальших дослідженнях діапазон вимірювань було розширено до ближнього ІЧ, а потім і до середньохвильового ІЧ-діапазону. Уже в приладі Hyperion супутника EO-1 (запущений у листопаді 2000 р.) зйомка охоплювала діапазон від 0,357 мкм до 2,576 мкм, розділений на 220 спектральних каналів шириною 10 нм. Сучасні можливості космічних гіперспектральних сенсорів описано в огляді [4].

Переваги гіперспектральної зйомки перед мультиспектральною досягаються завдяки більш точному відтворенню спектра відбиття знімаємої поверхні. Це розширює сферу застосування гіперспектральних даних порівняно з даними мультиспектральної зйомки.

Гіперспектральна зйомка дає змогу вирішувати завдання пошуку корисних копалин як на відкритій землі, так і під пологом рослинності [5]. Експерименти, що проводились наприкінці 1970-х років, дали змогу виявити за допомогою авіаційного гіперспектрометра ділянку мідної мінералізації під пологом хвойного лісу за аномаліями в спектрі відбиття, які не могли бути виявлені під час візуального огляду. Тому природно, що можливості гіперспектральної зйомки використовуються для демаскування військової техніки.

Гіперспектральні зображення можуть використовуватися для виявлення поживних речовин, стану водного стресу, а також для раннього виявлення хвороб і шкідників рослин [6]. Ключовим тут є раннє виявлення проблем рослин, оскільки наявні мультиспектральні дані, зокрема високої роздільної здатності, дають змогу спостерігати лише наслідки цих проблем. Мультиспектральні оптичні сенсори зазвичай не володіють діагностичними можливостями для виявлення конкретного типу стресу або визначення причин, через які біомаса перебуває на певному рівні [7].

Переваги та потенціал гіперспектральної зйомки обговорюють уже понад двадцять років, але за ці роки вона так і не стала не тільки основним видом спостережень із космосу, але навіть не набула масового характеру. На тлі десятків щорічних запусків КА для мультиспектральної зйомки, до 2021 р. на навколоземній орбіті було розгорнуто всього 19 гіперспектральних сенсорів [4]. Річ у тім, що багато переваг гіперспектральної зйомки є потенційними, і вигода від їхнього використання може бути отримана у віддаленому майбутньому. Натомість проблеми, пов’язані з цим видом зйомки, проявляються ще на етапі проєктування відповідних КА.

Наразі широкому застосуванню гіперспектральних технологій спостереження Землі перешкоджає:

1) мала кількість супутників, обладнаних гіперспектрометрами;
2) висока розмірність даних гіперспектральної зйомки;
3) складність формування, передавання, зберігання й опрацювання великих обсягів гіперспектральних даних;
4) складнощі інтерпретації гіперспектральних даних.

Впровадженню засобів ДЗЗ з космосу, зокрема для гіперспектральної зйомки, завжди передує розробка аналогічних інструментів наземного і повітряного базування. Досвід, набутий під час робіт над проєктами авіаційного гіперспектрального спостереження, може значно підвищити шанси на успіх майбутніх космічних місій. Реалізація проєктів гіперспектральних сенсорів на аероносіях, як-от метеозонди і повітряні змії, дасть змогу суттєво скоротити витрати на створення багатьох бортових систем і сконцентруватися на завданнях гіперспектральної зйомки.

Наступною проблемою є висока розмірність даних гіперспектральної зйомки. Обсяг даних зростає пропорційно кількості спектральних каналів, тому, за інших рівних умов, під час переходу від мультиспектральної до гіперспектральної зйомки обсяг даних збільшується в десятки разів. Це висуває більш жорсткі вимоги до систем збирання, оброблення та зберігання даних на борту КА, а також до систем передавання даних на землю. Широке використання гіперспектральних даних потребує дорогої реконструкції та будівництва нових наземних приймальних станцій, центрів обробки і зберігання даних. Особливо гостро ця проблема стоїть у приватних компаніях, для яких підтримка власної наземної інфраструктури може виявитися занадто обтяжливою.

Це змушує приватні компанії йти шляхом «урізаної гіперспектральності»: використовуються вузькі спектральні канали, але не сотні, а десятки, і тільки в потрібних спектральних областях. Так КА Dragonette-001 канадської компанії Wyvern отримує дані в 23 спектральних каналах із просторовою роздільною здатністю 5,3 м, а КА Jilin-1 Guanpu китайської компанії CGST – у 26 групах каналів [8]. В результаті застосування такого підходу можуть бути пропущені перспективні діапазони спектра. Більш плідною бачиться динамічна зміна складу використовуваних спектральних каналів на борту КА, залежно від вимог замовників даних.

Ще одним перспективним рішенням видається обробка даних на борту КА, так звані граничні обчислення (edge computing). Багато завдань детальної гіперспектральної зйомки формулюються як завдання пошуку і виявлення локальних аномальних процесів і малорозмірних об'єктів на великих площах контрольованих територій. Для таких завдань опрацювання даних на борту КА і відсів фонової інформації суттєво підвищують оперативність ухвалення рішень і забезпечують значну економію ресурсів, пов'язаних із формуванням, зберіганням, передачею і подальшим опрацюванням даних у наземних центрах.

Ідентифікація об'єктів та їхніх станів за гіперспектральними даними заснована на здатності різних хімічних елементів поглинати і відбивати світло диференційовано за довжинами хвиль. Завдання розпізнавання об'єктів за хімічним складом і структурою його розподілу належить до завдань спектрального аналізу.

Спектральний аналіз базується на фундаментальному принципі – існванні однозначних зв'язків між різними хімічними (біохімічними) елементами та спектрами їхніх випромінювань (відображень). Він виконується шляхом порівняння спектрограм, отриманих під час зйомки, зі спектральними характеристиками відомих матеріалів і зразків, які зберігаються в різних електронних спектральних бібліотеках, наприклад, у загальнодоступній USGS Spectral Library. Однак застосування спектрального аналізу для інтерпретації гіперспектральних даних у багатьох випадках не приносить очікуваного успіху.

Річ у тім, що під час підготовки спектральних еталонів зразки матеріалу очищають від домішок і проходять ретельну обробку, яка руйнує структуру середовища, де перебував цей матеріал у природних умовах. Під час дослідження елементів природних ландшафтів і рослинних покривів, навпаки, необхідно враховувати структуру суміші цих елементів, а також складну негладку геометрію поверхонь і об'ємів, що відбивають світловий потік. Наприклад, світло, що потрапляє на листок рослини, перш ніж відбитися, проходить складний шлях, проникаючи в товщу листа, де зазнає численних заломлень. Ще складнішим є шлях світла, відбитого від рослинного полога. В результаті спектральні характеристики екстрагованих із рослин біохімічних елементів та їхніх сумішей суттєво відрізняються від реальних спектрограм рослин, отриманих під час дистанційних вимірювань.

Наявні спектральні бібліотеки зіставляють кожному матеріалу зразок спектра відбиття в деякому ідеальному стані цього матеріалу. У низці галузей такий підхід виправданий, наприклад, у геології. З іншого боку, існують завдання ДЗЗ, у яких необхідно відстежувати динаміку спектральних характеристик об'єкта. До таких завдань, зокрема, належать завдання раннього виявлення шкідників і хвороб рослин. Тому необхідне формування бібліотек, що враховують зміни, які відбуваються в спектрі відбиття об'єктів. Для створення таких бібліотек, мабуть, знадобиться проведення комплексних наземних, повітряних і космічних експериментів.

Ще однією проблемою, що стоїть на шляху широкого використання даних гіперспектральної зйомки, є нестача програмного забезпечення (ПЗ), яке, крім операцій з обробки зображень, має виконувати спектральний аналіз даних. ПЗ, що володіє подібними можливостями в даний час, як правило, є пропрієтарним. Ця обставина збільшує поріг входу для використання гіперспектральних даних.

Таким чином, хоча поєднання високої спектральної та просторової роздільної здатності має призвести до підвищення точності розпізнавання об'єктів та їхніх властивостей, скористатися перевагами такого поєднання далеко не просто й універсального розв'язання цієї проблеми, мабуть, не існує.

Лідарна зйомка. Лідар (від англ. LiDAR – Light detection and ranging) здійснює активну зйомку в оптичному діапазоні електромагнітного спектра. Він посилає короткий імпульс лазера в бік досліджуваного об'єкта і через деякий час отримує відбитий сигнал. За різницею в часі між випусканням і прийомом сигналу визначається відстань до об'єкта. Виміряні відстані об'єднуються з даними про положення, орієнтацію і калібрування датчика для отримання хмари точок. Вона являє собою набір точок, кожна з яких має три просторові координати (довготу, широту, висоту), а також низку атрибутів, наприклад, інтенсивність сигналу.

Супутникова лазерна дальнометрія, що реалізується за допомогою лідарів, є одним із фундаментальних методів космічної геодезії. Вона використовується для точного вимірювання відстані від наземних станцій до ретрорефлекторів (кутових відбивачів) на космічних апаратах і на Місяці. З її допомогою визначається Міжнародна земна система відліку (International Terrestrial Reference Frame). Лазерна дальнометрія забезпечує точне визначення орбіти, а також калібрування і валідацію приладів супутникових альтиметрів (висотомірів), що дає змогу краще зрозуміти зміну рівня моря, динаміку океану, морського льоду і топографію суші.

Перший лідар космічного базування використовували як альтиметр під час польоту «Аполлона-15» у липні-серпні 1971 р. Аналогічні лазерні альтиметри використовували 1972 р. у місіях «Аполлон-16» і «Аполлон-17» [9]. Їхні дані були використані, зокрема, для визначення форми Місяця. У період з 1972 по 1990-ті роки в розгортанні космічних лідарів настала перерва, але з 1990 р. спостерігається безперервний прогрес як у плані кількості, так і в плані технологічного розвитку розгорнутих систем.

Космічні лідари також використовуються для зондування атмосфери. Історично, першим таким лідаром була французька система Alissa, яка працювала у другій половині 1990-х років на борту орбітальної станції «Мир». Alissa використовувалася для профілювання хмар і визначення структури атмосферних аерозолів. Запущений у 2003 р. американо-французький КА CALIPSO був оснащений лідаром CALIOP відразу з двома лазерами. Він також призначався для дослідження атмосфери.

Нині в космосі працюють лідари GEDI (на Міжнародній космічній станції) і ATLAS (на супутнику NASA ICESat-2). Вони збирають дані про висоту поверхні морського льоду, суші та рослинності, висоту поверхні внутрішніх водойм, а також про характеристики шарів атмосфери. Їхні дані активно використовують у моделюванні надземної біомаси та запасів вуглецю лісу [10].

Лідари збирають дані у видимій зеленій (0,532 мкм) та/або ближній інфрачервоній (1,064 мкм) областях електромагнітного спектра. Датчики, що працюють у ближній інфрачервоній ділянці, відомі як топографічні лідари, і їх використовують для вивчення поверхні суші та рослинності. Вони не підходять для вимірювання глибин водойм через занадто сильне поглинання водою хвиль ближнього ІЧ-діапазону. Лідари для водних застосувань працюють у зеленій ділянці електромагнітного спектра, хвилі якої краще проникають у прозору воду і дають змогу скласти карту глибин морського дна. Такі лідари називають батиметричними. Серед сучасних космічних лідарів, GEDI є топографічним, а ICESat-2 ATLAS − батиметричним.

Проникаюча здатність сигналів лідара дає змогу з високою точністю оцінювати структуру рослинного покриву та рельєф місцевості. Слід зазначити, що сигнали лідара не проникають крізь рослинність, вони проходять через прогалини в рослинному покриві. Що більше прогалин у пологовому покриві, то вища ймовірність того, що сигнал лідара досягне поверхні землі. Інші фактори, що впливають на проникнення сигналів лідара через рослинність, включають: щільність точок лідара (кількість точок на квадратний метр), потужність променя, кут сканування. Під час роботи з рослинністю один випромінюваний імпульс зазвичай призводить до кількох відображень. Першим відображенням зазвичай є верхня частина полога, а останнім − земна поверхня.

Повітряні лідари, що базуються на літаках і безпілотних літальних апаратах, є цінним інструментом для управління, збереження та відновлення лісів. На рівні окремих дерев дані повітряних лідарів дають змогу отримати такі параметри дерева, як розташування, висота та ширина крони. За допомогою повітряних лідарів отримують найкращі на сьогоднішній день цифрові моделі поверхні та рельєфу, а також сучасні моделі будівель. Недоліком подібних систем є невелика площа покриття даними.

Лідари космічного базування потенційно здатні забезпечити глобальне картографування за менших витрат, порівняно з авіаційними лідарами, у розрахунку на одиницю площі [11]. Однак за своїми можливостями сучасні космічні лідари суттєво поступаються лідарам повітряним.

Якщо дані повітряних лідарів являють собою хмару точок, що відображає структуру об’єктів на земній поверхні, то дані сучасних космічних лідарів через низьку просторову роздільну здатність є, по суті, двомірними. Ці дані мають низьку щільність і являють собою набір «відбитків» (footprints) сигналу на поверхні, розділених пробілами. Так, прилад GEDI має найширшу зону покриття серед наявних космічних лідарів, але незважаючи на це, за чотири роки роботи GEDI його розріджені дані покрили лише близько (2 – 4) % поверхні суші [11]. У результаті стандартна помилка при оцінці щільності надземної біомаси становить до 20 % на піксель розміром 1 км × 1 км, що значною мірою пояснюється розрідженістю даних.

Нині в низці досліджень проаналізовано можливості створення супутникових угруповань космічних лідарів, що здійснюють повноцінне тривимірне сканування з повним покриттям поверхні суші. Так, у [12] досліджено можливості створення угруповання лідарних супутників на наднизькій навколоземній орбіті висотою нижче 400 км. Показано, що такий тип орбіт є перспективним варіантом для космічних лідарних систем, які потребують значного покриття Землі.

У роботі [11] проведено аналіз різних архітектур космічних лідарних місій, залежно від маси супутникової платформи та конструкції оптичної системи, з метою забезпечення глобальними лідарними даними високого просторового розділення (5 – 30) м. Результати показують, що глобальне покриття лідарними даними з космосу технологічно і фінансово можливе. Оптимальним варіантом серед усіх розглянутих є угруповання мікросупутників масою близько 150 кг, оснащених оптичними системами, що трансформуються. Напівпровідникові (діодні) лазери більш перспективні, ніж традиційні твердотільні. Рішення з відносно низькою просторовою роздільною здатністю (30 м) мають нижчу вартість, а зі збільшенням роздільної здатності вартість зростає за квадратичним законом.

У 2023 р. компанія Nuview (США) заявила про плани зі створення першого комерційного угруповання супутників для лідарної зйомки земної поверхні. Угруповання має складатися з 20 супутників і повністю покрити поверхню Землі тривимірними даними лідарної зйомки.

Ще однією проблемою, що перешкоджає розвитку лідарних спостережень із космосу, є те, що лідари створюють величезні масиви даних, оброблення яких потребує великих обчислювальних ресурсів. Перспективним способом розв’язання цієї проблеми є обробка даних на борту КА.

Як і в разі інших оптичних методів ДЗЗ, погані погодні умови (дощ, туман, сніг) перешкоджають роботі лідарів.

Особливості лідарних даних і даних оптичної зйомки багато в чому доповнюють одна одну, тому інтеграція цих даних видається досить перспективною. Так, лідар є активним датчиком, здатним збирати дані як вдень, так і вночі. Однак в одержуваній ним хмарі точок відсутня семантична інформація, як-от форма, текстура і спектр відбиття, що обмежує можливості інтерпретації лідарних даних. Навпаки, супутникові знімки (оптичні та радарні) багаті подібною семантичною інформацією.

Хмари точок лідара розподілені нерівномірно, що ускладнює точне визначення контурів спостережуваних об’єктів. Ця проблема ще більше посилюється під час використання даних лідарів із низькою щільністю точок. Оптичні супутникові знімки фіксують прямі лінії, що визначають контури об’єктів, що дає змогу, зокрема, поліпшити результати автоматичного виділення будівель за лідарними даними. Крім того, супутникові знімки дають змогу отримувати еталонні дані для навчання моделей і тестування алгоритмів виділення будівель на основі даних лідарів.

Дані лідара мають обмежену спектральну інформацію, яка важлива, наприклад, для виділення об’єктів в умовах міста. Міські об’єкти мають складну структуру і характеризуються високою спектральною варіативністю. Тому для ефективного виділення будівель серед інших міських об’єктів часто потрібне знання їхніх спектральних властивостей. Інтеграція мультиспектральних зображень і лідарних даних дала б змогу поліпшити якість виділення будівель.

Використання супутникових знімків надвисокої роздільної здатності полегшує виявлення крон дерев, дає змогу ідентифікувати окремі дерева, структура яких потім досліджується за допомогою лідарів. Крім того, мультиспектральні зображення допомагають визначити породу дерев.

Інтеграція лідарних даних і даних гіперспектральної зйомки дасть змогу в перспективі визначити хімічний склад матеріалів підстильної поверхні з одночасним отриманням її тривимірного зображення. Поєднання спектральної та структурної інформації, що надається обома методами, може бути використано для вирішення широкого кола завдань.

Вимірювання флуоресценції хлорофілу. Світіння хлорофілу під час поглинання ним сонячного світла називають сонячно-індукованою флуоресценцією (СІФ). Світіння відбувається в червоній ділянці спектра, у діапазоні (650 − 800) нм. Енергія, отримана молекулою хлорофілу під дією світла, здебільшого витрачається на фотохімічні реакції (фотосинтез), але невелика частина її ((3 − 5) % за нормальних умов) розсіюється у вигляді флуоресценції (перевипромінювання), а також у вигляді тепла (нефотохімічне гасіння, яке захищає фотосинтезуючий апарат від перегріву). Таким чином, СІФ є частиною механізму фотосинтезу і може використовуватися як його індикатор. Оскільки різні фізичні та хімічні чинники, що впливають на стан рослинних угруповань, зрештою прямо чи опосередковано відображаються на роботі молекулярних систем фотосинтезу, то вимірювання СІФ хлорофілу є одним із перспективних методів оцінки стану рослин. Більш того, вимірювання СІФ здатне виявити зміни в стані рослин раніше за методи ДЗЗ, засновані на отриманні спектрів відбиття.

Реакція фотосинтезу постійно пристосовується до умов довкілля шляхом зміни або перестановки пігментів у листках, які не спричиняють змін відбивної здатності, а отже не фіксуються методами оптичного ДЗЗ, які спираються на дані про спектр відбиття сонячного випромінювання. СІФ же, є частиною механізму фотосинтезу і конкурує з самим фотохімічним перетворенням. Тому вона дає змогу точніше оцінити асиміляцію вуглецю і раніше виявити стрес рослин, ніж це можливо на основі даних про відбиття.

Валова первинна продукція суші (ВПП) − це кількісний еквівалент загальної кількості вуглецю, засвоєного рослинністю в процесі фотосинтезу. ВПП є найважливішим елементом для розуміння вуглецевого обміну між землею та атмосферою. Останніми роками як новий підхід до моніторингу ВПП з космосу розглядається використання даних СІФ [13]. Показано, що СІФ є найбільш важливою змінною для прогнозування ВПП. Крім того, СІФ є одним із найвпливовіших предикторів урожайності сільськогосподарських культур [14].

Вимірювання СІФ хлорофілу використовується для оцінки біомаси, вивчення фізіології та складу фітопланктону, що становить основу морського харчового ланцюжка, перетворюючи сонячну енергію в органічні речовини.

Застосування СІФ дає змогу раніше виявляти цвітіння фітопланктону в прибережних районах, порівнюючи з даними оптичного ДЗЗ, що ґрунтуються на закономірностях віддзеркалення води в синьому та зеленому діапазоні (0,44 − 0,56) мкм, оскільки дає змогу краще відокремлювати хлорофіл-А фітопланктону від зважених опадів і забарвленої розчиненої органічної речовини [15].

Застосування СІФ для оцінки стану рослин, незважаючи на його перспекивність, вимагає вирішення ряду технічних завдань. Наприклад, важливо відокремлювати дію на рослину різних стресових чинників від природних вікових змін флуоресценції, що спостерігаються в ході розвитку рослин.

Для спостереження за СІФ наземної рослинності використовувалися космічні сенсори SCIAMACHY, GOME-2, GOSAT, OCO-2, OCO-3 і TROPOMI. Усі дані СІФ мають низьку або наднизьку просторову роздільну здатність (одиниці та десятки кілометрів), а зазначені вище прилади не призначені спеціально для спостереження СІФ.

Концепція першої спеціалізованої місії (FLuorescence Explorer, FLEX), спрямованої на спостереження СІФ, була запропонована 2005 року. Під впливом проєкту FLEX інтенсивність досліджень у галузі флуоресценції значно зросла, поступово накопичувався досвід повітряних і космічних спостережень, з'явилася низка узагальнювальних робіт, наприклад, [16]. Однак сам проєкт розвивався повільно. Лише 2015 р. ESA ухвалило рішення про запуск FLEX у вигляді самостійної місії.

Роботи зі складання, інтеграції та випробувань супутникової платформи здійснює компанія Thales Alenia Space. Основною знімальною апаратурою є спектрометр FLORIS (Fluorescence Imaging Spectrometer), розроблений Leonardo − італійським оборонним концерном, одним із співзасновників Thales Alenia Space. Передбачається, що просторова роздільна здатність даних FLORIS становитиме 300 м, що на порядки краще за наявні нині дані. Запуск FLEX заплановано на 2025 р.

Вимірювання СІФ належить до пасивних методів ДЗЗ. Починаючи з 1980-х років розвиваються методики моніторингу стану рослин, що базуються на активному методі спостережень − лазерно-індукованій флуоресценції хлорофілу (ЛІФ).

Оскільки активні вимірювання флуоресценції хлорофілу працюють за постійної інтенсивності та напряму збудливого світла, на них менше впливає часовий та просторовий (горизонтальний та вертикальний) розподіл освітленого та затіненого сонцем листя на верхній поверхні та всередині полога порівняно з СІФ.

Результати дослідження [17] показали можливість використання спектрів ЛІФ для раннього виявлення стресового впливу важких металів (зокрема, нікелю) на сільськогосподарські культури.

Однією з основних проблем використання даних СІФ і, особливо, ЛІФ є слабка вивченість флуоресцентних характеристик рослинності, що призводить до різних проблем під час інтерпретації змін спектра флуоресценції рослинності у відповідь на несприятливі фактори довкілля. Тому основним завданням сьогодні є виявлення характеру та зв'язків параметрів СІФ і ЛІФ зі станом рослин. Для розв'язання цього завдання необхідне збирання та створення бази даних основних типів спектральних змін флуоресценції, що залежать від стану рослинності.

Висновки. Розглянуті методи оптичного ДЗЗ перебувають на суттєво різних стадіях розвитку. Мультиспектральна зйомка, найстаріший метод ДЗЗ, за низкою параметрів, наприклад, за просторовою роздільною здатністю, практично досягла межі розвитку, подолати яку допоможуть лише фундаментальні зміни в технологіях. Гіперспектральна і лідарна зйомка перебувають на етапі відпрацювання технологій. Зокрема, відсутнє регулярне покриття земної поверхні цими даними. Флуоресценція хлорофілу досі перебуває на етапі апробації, незважаючи на потенційні переваги її використання для спостереження за станом рослин.

Мультиспектральна оптична зйомка розвивається шляхом збільшення кількості спектральних каналів, використання вужчих каналів, підвищення просторової роздільної здатності в задачах детальної та оглядової зйомки, а також збільшення повторюваності зйомки без зниження просторової роздільної здатності завдяки використанню угруповань недорогих малих КА. Розвиток технологій мініатюризації електроніки і паралельне зростання виробничих можливостей приватних компаній зі створення супутникових платформ дає змогу створювати малі комерційні КА ДЗЗ універсального призначення, не обмежуючись одним корисним навантаженням.

Комерційна гіперспектральна зйомка нині використовує низку обраних вузьких спектральних каналів, що дає змогу дещо скоротити обсяг даних, які надходять. Перспективним способом розв'язання проблеми великого обсягу даних є їхнє опрацювання безпосередньо на борту КА. Розвиток технології гіперспектральної зйомки потребує вдосконалення спектральних бібліотек, розробку відкритого програмного забезпечення, а також проведення наземних і повітряних вимірювань для накопичення експериментальної інформації.

У галузі лідарної зйомки є передумови для створення угруповання КА, що забезпечує регулярне щорічне глобальне покриття земної суші (без прогалин). Проблему великого обсягу даних, створюваних лідарами, також можна вирішити за допомогою обробки даних на борту КА. Удосконалення способів спільного використання даних лідарної та оптичної (радарної) зйомки вимагає проведення наземних і повітряних досліджень. У підсумку можлива поява КА, що поєднують переваги кількох зазначених видів зйомки.

Методи ДЗЗ, що використовують флуоресценцію хлорофілу, перебувають на стадії накопичення та узагальнення експериментального матеріалу. Багато чого залежатиме від даних, отриманих майбутньою місією FLEX. Видається необхідним розроблення доступного ПЗ для обробки даних СІФ. Відсутність такого ПЗ, а також даних, принаймні середньої просторової роздільної здатності, перешкоджають поширенню методу.

Інтеграція спектральної та структурної інформації, що надається оптичною зйомкою та лідарами, у перспективі може бути використана для вирішення широкого кола завдань. При цьому можливе створення орбітальних угруповань, в яких окремі КА використовуватимуть різні методи ДЗЗ, і угруповань універсальних КА, що несуть кілька видів знімальної апаратури. Для розвитку цих можливостей необхідна переконлива демонстрація користі від інтеграції даних у наземних і повітряних експериментах.

1. *Kramer H. J.* Observation of the Earth and Its Environment. Berlin, Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56294-5
2. *Fowler M. J. F.* Declassified Intelligence Satellite Photographs. Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives / ed. by W. Hanson, I. Oltean. New York, Springer, 2012. P. 47–66. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4505-0_4
3. *Кондратьев К. Я., Бузников А. А., Виноградов Б. В., Волков В. Н., Горбатко В. В., Смоктий О. И., Орлов В. М.* Некоторые результаты спектрофотометрирования Земли с космического корабля "Союз-7". Доклады АН СССР. 1970. Т. 195, № 5. С. 1084–1087.
4. *Qian S.-E.* Hyperspectral Satellites, Evolution, and Development History. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. N 14. P. 7032–7056. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3090256
5. *Bedini E.* The use of hyperspectral remote sensing for mineral exploration: a review. Journal of Hyperspectral Remote Sensing. 2017. V. 7, N 4. P. 189–211. https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.4.p189-211
6. *Lelong C. C. D., Pinet P. C., Poilvé H.* Hyperspectral Imaging and Stress Mapping in Agriculture. Remote Sensing of Environment. 1998. V. 66, N 2. P. 179–191. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(98)00049-2
7. *Terentev A., Dolzhenko V., Fedotov A., Eremenko D.* Current State of Hyperspectral Remote Sensing for Early Plant Disease Detection: A Review. Sensors. 2022. V. 22, N 3. P. 757. https://doi.org/10.3390/s22030757
8. *Храмов Д. О., Волошенюк 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

9. *Diaz J. C. F., Carter W.E., Shrestha R.L., Glennie C.L.* LiDAR Remote Sensing. Handbook of Satellite Applications / ed. by J. Pelton, S. Madry, S. Camacho-Lara. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4_44
10. *Borsah A. A., Nazeer M., Wong M. S.* LIDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Review of Metrics, Methods, and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations. Forests. 2023. V. 14. P. 2095. https://doi.org/10.3390/f14102095
11. *Lowe C. J., McGrath C. N., Hancock S., Davenport I., Todd S., Hansen J., Woodhouse I., Norrie C., Macdonald M.* Spacecraft and optics design considerations for a spaceborne lidar mission with spatially continuous global coverage. Acta Astronautica. 2024. V. 214. P. 809–816. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.10.042
12. *McGrath C., Lowe C. J., Macdonald M., Hancock S.* Investigation of very low Earth orbits (VLEOs) for global spaceborne lidar. CEAS Space Journal. 2022. V. 14, N 4. P. 625–636. https://doi.org/10.1007/s12567-022-00427-2
13. *Lagutin A. Mordvin E. Y., Volkov N.* Estimates of the terrestrial gross primary production for the south of Western Siberia in 2014-2021 according to OCO-2 and OCO-3 data. 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2022. V. 12341. https://doi.org/10.1117/12.2645053
14. *Chen R. Liu L., Liu X., Liu Z., Gu L., Rascher U.* Improving estimates of sub-daily gross primary production from solar-induced chlorophyll fluorescence by accounting for light distribution within canopy. Remote Sensing of Environment. 2024. V. 300. P. 113919. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113919
15. *Kritten L. Preusker R., Fischer J.* A New Retrieval of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence in Water from Ocean Colour Measurements Applied on OLCI L-1b and L-2. Remote Sensing. 2020. V. 12, N 23. P. 3949. https://doi.org/10.3390/rs12233949
16. *Meroni M., Rossini M., Guanter M., Alonso L., Rascher U., Colombo R., Moreno J.* Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113, N 10. P. 2037–2051. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.003
17. *Gopal R., Mishra K. B., Zeeshan M., Prasad S. M., Joshi M. M.* Laser-induced chlorophyll fluorescence spectra of mung plants growing under nickel stress. Current Science. 2002. V. 83, N 7. P. 880–884.

Отримано 06.11.2024,
в остаточному варіанті 11.12.2024