

УДК 528.8:004.9

*Віталій Литвинов, Олег Житник***ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАСОБІВ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ З РІЗНОЮ ПРОСТОРОВОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ***Віталій Литвинов, Олег Житник***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ С РАЗНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ***Vitalii Lytvynov, Oleh Zhytnyk***COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT SPATIAL RESOLUTION SATELLITE WITH DIFFERENT IMAGERY MEANS**

Дистанційне зондування з року в рік набирає все більших обертів по впровадженню в різних галузях людської діяльності. Сприяє цьому передусім розвиток інформаційних технологій, що призводить до використання все більш потужних систем.

Нині нараховуються сотні діючих космічних комплексів проведення аерокосмічних спостережень. Всі вони відрізняються характеристиками встановлених на них оптичних та радіометричних систем. Одні спрямовані на вирішення більш глобальних завдань, через що мають не таку здатність до деталізації зображень, інші ж допомагають вирішувати більш локальні завдання, внаслідок чого здатні фіксувати об'єкти земної поверхні навіть невеликих розмірів.

Серед усього різноманіття космічних оптико-електронних систем у цій статті розглянуто основні діючі на сьогодні передові зразки, порівняно їхні параметри та визначено найбільш доцільні цілі їх використання.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, штучний супутник Землі, сканування, аерокосмічна зйомка, спектральний канал, просторова роздільна здатність.

Табл.: 1. Бібл.: 14.

Дистанционное зондирование из года в год набирает все большие обороты по внедрению в различных областях человеческой деятельности. Этому способствует, прежде всего, развитие информационных технологий, что приводит к использованию всё более мощных систем.

Сейчас насчитываются сотни действующих космических комплексов проведения аэрокосмических наблюдений. Все они отличаются характеристиками установленных на них оптических и радиометрических систем. Одни направлены на решение более глобальных задач, следовательно, имеют незначительные способности к детализации изображений, другие же помогают решать более локальные задачи, из-за чего способны фиксировать объекты земной поверхности даже небольших размеров.

Среди всего многообразия космических оптико-электронных систем в данной статье рассмотрены основные действующие на сегодня передовые образцы, сравнены их параметры и определены наиболее преобладающие цели их использования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, искусственный спутник Земли, сканирование, аэрокосмическая съёмка, спектральный канал, пространственное разрешение.

Табл.: 1. Библ.: 14.

Remote sensing from year to year is gaining great momentum for implementation in various fields of human activity. The development of information technologies contributes to this first of all, which leads to the use of ever more powerful systems.

Now there are hundreds of existing space complexes of aerospace observations. They differ in characteristics are established on the optical and radiometric systems. Some are aimed at solving more global challenges, through that do not have such a significant ability to image detail, while others help to solve a local problem, thereby fixing the Earth's surface objects even smaller sizes.

Among the variety of space optical-electronic systems in this article it is invited to review its today highlights examples, compare its options and determine the most suitable target for its use.

Key words: remote sensing, Earth's artificial satellite, scanning, aerospace imagery, spectral band, spatial resolution

Табл.: 1. Библ.: 14.

Постановка проблеми. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є ефективним підходом до проведення досліджень земної поверхні і все більше застосовується у багатьох галузях народного господарства [1], пов'язаних з активною експлуатацією просторових даних. Передусім зростання його використання відбувається внаслідок того, що ДЗЗ дозволяє отримати велику кількість геоінформаційних матеріалів, охоплюючи за один або декілька проходів значні території досліджень. Збір даних у разі використання традиційних наземних методів з цих же областей вирізнявся б значно більшими витратами як за трудоемністю, так і за часом його проведення. Також дистанційне зондування дає змогу проводити зйомку планово, у зазначені строки [2]. У подальшому відзняті знімки

можна зберігати у спеціальних репозиторіях геоданих з можливістю отримання доступу до них у будь-який час за необхідності їхнього дешифрування.

Ще більших обертів використання ДЗЗ зазнало за останні десятиліття, коли спостерігається поступове зростання кількісної та якісної складової забезпечення відповідної технічної бази, а отже, і збільшення різноманіття напрямів їхнього цільового призначення. Такий відчутний прогрес у реалізації технологій віддаленого дослідження призвів до зниження цін на зйомку та отримання даних дистанційного зондування (ДДЗ) якщо не для всіх, то принаймні для деяких способів отримання геопросторових даних [3].

На сьогодні існує декілька рівнів отримання ДДЗ. Серед них виділяють космічне, повітряне та наземне проведення зйомки [4]. Всі рівні мають свої переваги та недоліки і кожен з підходів є ефективним лише за певних обставин. Передусім визначальними умовами для придбання геоінформаційних матеріалів будуть їхня вартість і періодичність проведення зйомки, а також просторове захоплення і роздільна здатність отриманих результатів.

У цій статті пропонуємо розглянути та порівняти основні способи отримання матеріалів ДЗЗ рівня космічної зйомки, оскільки для її виконання не потрібно значних трудових та часових затрат, а також початкових капіталовкладень на закупівлю пристроїв для здійснення зйомки. Всі геоінформаційні дані такого типу можна отримати за допомогою використання спеціалізованих веб-ресурсів. Через вищезгадані переваги саме космічна зйомка є найбільш прийнятною для досягнення певних цілей у дослідженні поверхні Землі. В такому випадку постає завдання дізнатися, які саме завдання вона допомагає вирішувати за допомогою сучасних апаратів, та дослідити основні її характеристики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Постійний стрімкий розвиток на сьогодні інформаційних технологій призводить до їх застосування у все більш широкому спектрі сфер людської діяльності. Ще донедавна метою здійснення ДЗЗ було проведення моніторингу глобальних явищ, нині ж використання віддаленого спостереження дозволяє відстежувати різноманітні локальні процеси аж до слідкування за станом посівів у межах полів чи то розміщенням будинків посеред густонаселених районів міста.

Останні роботи як на рівні глобальних, так і на рівні локальних досліджень, які варто відзначити, належать А. А. Жительсону, Е. Флюе-Шуїнару, К. Венгу, Дж. М. Сальмон, К. Б. Мюу, А. В. Замятіну, Є. І. Саприкіну, В. І. Зацерковному та ін. У них основна увага приділяється використанню ДДЗ у таких сферах застосування, як управління інфраструктурою міста, дослідження посівів та рослинності загалом, спостереження за водними ресурсами, регулювання екологічної ситуації, зокрема моніторингу лісових пожеж.

У згаданих роботах до сьогодні продовжується обґрунтовуватись доцільність використання аерокосмічного зондування у різних галузях завдяки пропозиціям і застосуванню нових та удосконаленню старих підходів для сучасних технологій. Як можна помітити, свій вагомий внесок у розвиток такої інтеграції вкладають як закордонні вчені, так і вітчизняні фахівці.

Метою статті є порівняння головних характеристик найперспективніших на сьогодні інструментів космічної зйомки різних класів просторової роздільної здатності (ПРЗ) та огляд основних галузей використання таких ДДЗ.

1. Використання космічної зйомки поверхні Землі.

Завдяки використанню штучних супутників Землі (ШСЗ) людина отримала змогу визначати місцезнаходження (координати) різноманітних об'єктів, ретранслювати радіо- та телесигнали, а також отримувати зображення поверхні Землі з висоти 200-36000 км [4]. Для отримання таких зображень на борту ШСЗ має бути встановлена відповідна система для проведення зйомок. Таким чином, джерелом зйомки є приймач випромінювання у вигляді оптичних або радіолокаційних систем, а сам супутник являє собою головним чином носій цього приймача.

На знімках поверхні Землі з висоти орбіт супутників можна було б розгледіти у загальному випадку лише об'єкти глобальних масштабів, наприклад території материків, циклони та ін. Такі геопросторові матеріали не вирішували б завдань локального масштабу, але завдяки розвитку технологій сучасна апаратура дозволяє отримати зображення з ПРЗ аж до часток метра. Таким чином, на знімках можна розрізнити (вмістити в один піксель зображення) об'єкти, розміри яких можуть не досягати навіть 1 м. Такі кадри завдяки своїй деталізації є достатньо інформативними, але зазвичай їхня вартість дозволяє використовувати їх лише для комерційних цілей великих компаній.

Хоча простежується залежність вартості знімків від характеристики ПРЗ, але існує багато прикладів винятків з цього правила. Яскравим зразком цього можуть слугувати супутники ДЗЗ Landsat, про які йтиметься далі. Просторова роздільна здатність – характеристика ДДЗ, яка показує розмір мінімального об'єкта земної поверхні, який може бути відображений на зображенні. Чим вища ця характеристика, тим менші об'єкти і більш детальні зображення може фіксувати знімальна техніка. Так, при високій ПРЗ мінімальні габарити об'єктів можуть становити десятки сантиметрів, натомість при низькій – десятки, а то і сотні кілометрів. Поділяється просторова роздільна здатність знімків на надвисоку (< 1 м), дуже високу (1–10 м), високу (висока (10–30 м) та відносно високу ПРЗ (30–100 м)), середню (100–1000 м) та низьку (> 1 км).

2. Огляд джерел здійснення космічної зйомки поверхні Землі з низькою ПРЗ.

Пристрій AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) [5] є на сьогодні одним з тих джерел зйомки ДДЗ низької ПРЗ, які мають найбільший попит серед науковців, спеціалістів та пересічних користувачів. Цей інструмент встановлений на супутниках серій NOAA, що знаходяться під керівництвом Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA), та MetOp, що управляються Європейською організацією супутникової метеорології (EUMETSAT).

Нині навколо Землі обертаються 3 космічні апарати NOAA, завдяки чому зйомка тієї ж самої території відбувається декілька разів (не менше чотирьох) на добу. До того ж високій періодичності зйомки певної місцевості через накладання сприяє відносно велике значення смуги захоплення – приблизно 2500 км. При таких значних площах захвату за один знімок ПРЗ відповідно становить аж 1,1 км. За наявної можливості зйомки в 4–6 спектральних каналах (для різних версій AVHRR): видимому, ближньому інфрачервоному (Infrared, IR), середньому IR та тепловому IR – множина перспективних напрямів використання відзнятих даних включає ті області, для яких встановлені рамки каналів мають сенс під час проведення експериментів та де не є важливим високий рівень деталізації досліджуваних об'єктів. Передусім, знімки з AVHRR використовуються на рівні глобального масштабу для метеорологічних (відстеження хмарності), екологічних (вимірювання теплового балансу Землі, спостереження за змінами клімату, забруднення довкілля) та океанологічних цілей. Отримати найсвіжіші геодані необхідної місцевості можна з репозиторію CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System), замовивши їх за посиланням <https://www.class.ncdc.noaa.gov/>, після чого протягом 24 годин (зазвичай через декілька хвилин) на вказану під час реєстрації адресу електронної скриньки має бути вислане повідомлення з посиланням на відповідні файли геоінформаційних даних.

3. Огляд джерел здійснення космічної зйомки поверхні Землі із середньою ПРЗ.

Місія Earth Observing System (EOS, Система спостереження Землі), керована NASA, спрямована на дослідження поверхні суходолу, біосфери, атмосфери та океанів для відстеження та прогнозування подальших явищ з метою уникнення чи мінімізації потенційних наслідків несприятливих природних чи антропогенних процесів. Протягом цієї місії було запущено багато супутників, серед яких космічні апарати серії Landsat. Крім них, варто звернути свою увагу на такі платформи ДЗЗ, як Terra та Aqua, що разом з

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ШСЗ Ауга забезпечують дослідження поверхні Землі, океанів та атмосфери відповідно. Вагомим інструментом в їхньому складі є використання, крім решти наукових апаратів дослідження Землі, таких оптично-електронних систем, як спектро радіометр середньої роздільної здатності (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) та передовий бортовий емісійний та відбиваючий радіометр (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER).

MODIS [6] розташований на обох космічних апаратах, обидва екземпляри є ідентичним за своїми характеристиками. Завдяки цьому радіометру можна отримувати космічні знімки середньої роздільної здатності тієї самої території протягом кожних 1–2 діб залежно від широти місцевості. Зйомка проводиться у 36 спектральних каналах видимого, ближнього IR, середнього IR та теплового IR діапазонів зі смугою захоплення 2300 км. У перших двох каналах (видимий червоний та ближній IR) просторова роздільна здатність становить 250 м, у наступних п'яти (синій, зелений, червоний, ближній IR та короткохвильовий IR) – 500 м, у всіх інших – 1 км. Завдяки своєму невисокому ПРЗ та частій періодичності проведення зйомки з його носіїв MODIS дозволяє використовувати знімки у дослідженні значних територій регіонального рівня. Насамперед вони застосовуються для моніторингу стану рослинності з використанням вегетаційних індексів, довгострокових змін рослинного покриву, поширення снігового покриву, дослідження атмосфери, розповсюдження лісових пожеж, підвищення рівня води та підтоплення територій і т. ін. Знімки з MODIS за кожні 6–8 діб можна отримати безкоштовно з веб-ресурсу Earth Explorer Геологічної служби США, що зумовлює їхнє активне використання серед фахівців та звичайних користувачів.

4. Огляд джерел здійснення космічної зйомки поверхні Землі з високою ПРЗ.

Радіометр ASTER [7] розміщений на космічному апараті Тетта. Він здатний сканувати поверхню Землі довжиною 60 км за один знімок. ASTER забезпечує реєстрацію даних у 14 спектральних інтервалах видимого, ближнього IR, середнього IR та теплового IR діапазонів. Для перших 3 каналів (видимий, ближній IR) просторова роздільна здатність становить 15 м, для наступних 6 каналів (середній IR) – 30 м, для решти – 90 м. Таким чином, вказані характеристики забезпечують умови для створення карт температурного розподілу поверхні Землі, слідкування за динамікою розвитку екосистем, моніторингу надзвичайних ситуацій, геологічних цілей та ін. Збір геоданих за допомогою ASTER відбувається не постійно, а за наявності замовлень на виконання зйомки вказаної місцевості. Для отримання знімків з цієї оптико-електронної системи потрібно виконати два кроки. Спочатку необхідно подати заявку на замовлення космічних знімків з коротким описом цілей використання даних, вказанням місцевості, її меж та персональною інформацією. Після розгляду заявки на вказану поштову скриньку має прийти лист зі скасуванням (з обґрунтуванням причини) чи підтвердженням (з логіном та паролем) замовлення. Після успішного засвідчення варто скористатися надісланим логіном і паролем в Data Acquisition Request (DAR) Tool (https://lpdaac.usgs.gov/dar_tool) для вказування планових строків. Після виконання зазначених кроків залишається лише зачекати на проведення зйомки та отримання даних через вказану поштову скриньку. Замовити збір даних завдяки ASTER можна за допомогою веб-сторінки <http://asterweb.jpl.nasa.gov/authorization.asp>, на якій розміщена інструкція користувача та містяться посилання на форму замовлення геоінформаційних матеріалів. Вартість одного знімку загалом становить 80 \$, але може залежати від зазначеної площі отримання знімків та цілей їх отримання. Для замовників, що співпрацюють з NASA, такі знімки є безкоштовними.

Повертаючись до вищезгаданих супутників Landsat, варто відзначити, що вони є частиною найтривалішої на сьогодні космічної програми з проведення дистанційного зондування, яка триває дотепер. За її допомогою було одержано найбільше інформації за всю історію ДЗЗ. Програма Landsat є американським проектом, за яким перший супут-

ник був запущений ще у 1972 році. Всього за цією програмою було задіяно 8 космічних апаратів. Щоб забезпечити безперебійне постачання знімками поверхні планети, всі ШСЗ були запущені поступово на зміну тим супутникам Landsat, які вже відпрацювали відведений для них час і згодом мали вийти з експлуатації. Нині на орбіті знаходяться два супутники цієї програми: Landsat 7 і Landsat 8.

Landsat 7 [8] був запущений у 1999 році і виведений на висоту біля 700 км над рівнем моря. Його орбіта є сонячно-синхронною приполярною, через що він постійно перебуває над освітленою територією поверхні Землі. Період охоплення всієї площі земної поверхні становить 16 діб. Система отримання ДДЗ, розташована на борту Landsat 7, являє собою удосконалений тематичний картограф (Enhanced Thematic Mapper Plus – ETM+), для якого характерна смуга захоплення знімків довжиною 185 км. Завдяки йому Landsat 7 отримує зображення земної поверхні у 8 спектральних каналах видимого (синій, зелений, червоний), ближнього IR (Near Infrared, NIR), середнього IR (Short Wavelength Infrared, SWIR 1 та SWIR 2), дальнього IR (Thermal Infrared, TIR) та панхроматичного каналів. Просторова роздільна здатність ETM+ для смуги пропускання дальнього інфрачервоного випромінювання найбільша – приблизно 60 м. Що стосується панхроматичного каналу, то мінімальний розмір об'єктів, які можна вмістити в піксель такого зображення, становить всього 15 м. Для всіх інших каналів ETM+ просторова роздільна здатність – 30 м. Це дозволяє отримувати знімки місцевості з ПРЗ 15 м. Таким чином, зазначені характеристики дозволяють проводити дослідження морів та океанів, атмосфери, льодовиків, рослинності, ґрунтів, гірських порід, температури доквілля тощо в межах від великих територій локального моніторингу до територій регіонального рівня. Отримати знімки з Landsat 7 можна безкоштовно, наприклад, з веб-сервісу EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), але для їх завантаження необхідна обов'язкова реєстрація. Наявність вільного доступу до архівів зі знімками Landsat 7 зумовлюють активне їх використання всіма найбільш популярними картографічними системами (Google Карти і Google Earth, Bing Maps, Яндекс.Карты та ін.) для масштабів карт, коли не важливий високий рівень деталізації об'єктів на місцевості.

Космічний апарат Landsat 8 [9] є наступником Landsat 7. Сканування поверхні Землі вони здійснюють приблизно з однакової висоти. До того ж довжини всіх робочих спектральних діапазонів Landsat 7, а також їхня ПРЗ повністю збігаються зі своїм послідовником. Landsat 8 розпочав свою роботу у 2013 році і відтоді виконує зйомку близько 400 знімків щоденно при інтервалі повторень зйомки супутника в 16 діб. Новий ШСЗ обладнаний корисним навантаженням у вигляді таких інструментів, як оперативний блок формування зображень Землі (Operational Land Imager, OLI) та датчик теплового випромінювання (Thermal InfraRed Sensor, TIRS). За допомогою такої оптико-електронної апаратури Landsat 8 може отримати зображення земної поверхні в 11 спектральних каналах (на 3 більше, ніж у Landsat 7). OLI дозволяє одержати геодані у 9 спектральних діапазонах видимого (фіолетовий, синій, зелений/жовтий, червоний), ближнього IR (NIR), середнього IR (SWIR, SWIR 1, SWIR 2) випромінювання та панхроматичному режимі. TIRS забезпечує отримання знімків додатково у 2 діапазонах дальнього IR спектра (TIR 1, TIR 2). Просторова роздільна здатність знімків, зроблених за допомогою OLI, у панхроматичному каналі становить 15 м, а у всіх інших – 30 м. Що стосується дальнього IR каналу, то його ПРЗ – 100 м. Підтримка такої високої роздільної здатності зумовлює використання зображень з Landsat 8 з тою ж метою, що і знімків Landsat 7. Отримати геоінформаційні матеріали з більш нового ШСЗ можна аналогічно з веб-сервісу EarthExplorer Геологічної служби США.

Проект Copernicus на сьогодні є найбільш масштабною програмою спостережень за поверхнею Землі. Управлінням космічної технічної бази та отриманням інформаційної складової цього проекту займається Європейське космічне агентство (European Space

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Agency, ESA). Нині Copernicus включає більше 30 космічних апаратів. Серед них найбільший інтерес для досліджень поверхні Землі становлять космічні платформи місії Sentinel-2 [10], яка включає супутник Sentinel-2A, який був запусканий у 2015 році, та Sentinel-2B, що планується до запуску у березні 2017 року. Підвищена зацікавленість до цих космічних апаратів виникає через вільний доступ до отриманих ними даних, достатньо високу ПРЗ та часту періодичність повторення зйомки відповідних територій. Sentinel-2A має сонячно-синхронну орбіту та обертається навколо Землі на висоті близько 790 км. На своєму борту супутник має корисне навантаження у вигляді мультиспектрального інструмента (Multi-Spectral Instrument, MSI), що забезпечує зйомку в 13 спектральних каналах. Сканування земної поверхні відбувається з просторовою роздільною здатністю 10 м (для 3 каналів видимого та 1 каналу ближнього IR спектра), 20 м (для 4 каналів видимого червоного та 2 каналів середнього IR спектра) та 60 м (по 1 каналу для видимого, ближнього IR та короткохвильового IR спектра). Довжина території захоплення за один знімок для MSI становить 290 км, а періодичність зйомки відповідної території – 5 діб. Таким чином, отримати дані з певної місцевості можна раз за 2,5 доби або ще частіше завдяки перекриттю знімків, зйомкам під різними кутами та при збільшенні широти. За умови обов'язкової реєстрації геопросторові дані з MSI можна отримати безкоштовно з веб-сервісу Sentinels Scientific Data Hub, що управляється Європейським космічним агенством, за посиланням <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Сканування Землі з Sentinel-2A наразі покриває області дослідження суходолу, океанів та атмосфери і в основному забезпечує допомогу під час виконання таких завдань, як виявлення снігового та змін рослинного покриву, відстеження дії та наслідків стихійних лих, моніторинг за станом лісних та сільськогосподарських угідь, а також забрудненням прибережних та вод відкритого моря.

5. Огляд джерел здійснення космічної зйомки поверхні Землі з дуже високою ПРЗ.

Проект SPOT, започаткований Національним центром космічних досліджень Франції (CNES), є наступною за Landsat найтривалішою програмою ДЗЗ, яка функціонує досі. Вперше супутник SPOT [11] був виведений на орбіту в 1986 році. З того часу було використано всього 7 супутників для отримання знімків із земної поверхні, кожен з яких мав сонячно-синхронну орбіту. Всі вони були запуснені послідовно на зміну відпрацьованим попередникам програми SPOT. Сьогодні свою діяльність продовжують 2 із 7 космічних апаратів: SPOT 6 та SPOT 7 (перейменований через зміну власника, тепер має назву Azersky), що мають однакову орбіту з різницею в 180° за фазовим кутом та в поєднанні з супутниками Pleiades, центром управління яких також є CNES і які знаходяться на цій же орбіті та мають відставання від них у 90° , забезпечують зйомку певної місцевості двічі на добу (для більшості, але не всієї поверхні Землі). Без кооперації з космічними комплексами Pleiades періодичність зйомки становлять від одного до трьох днів для кожного супутника залежно від широти місцевості і щодня, коли враховуються знімки одночасно з двох супутників.

SPOT 6 та Azersky мають ідентичні оптико-електронні системи, ширина смуги захоплення яких становить 60 км. Повний цикл повторення зйомки супутників становить 26 діб. Працюють вони в 5 спектральних каналах: панхроматичному, видимому (синій, зелений, червоний) та ближньому IR. Просторова роздільна здатність знімальної апаратури становить 1,5 м у панхроматичному режимі і 6 м у мультиспектральному. Такі дані можна використовувати для дослідження морів та океанів, атмосфери, льодовиків, рослинності, ґрунтів, гірських порід та ін. Нині знімки супутників SPOT використовуються для створення та оновлення топографічних середньомасштабних карт, контролю за районами сільськогосподарських та лісгосподарських насаджень, моніторингу екологічного стану довкілля і т. ін. Отримати геоінформаційні матеріали зі SPOT можна,

оформивши замовлення на офіційному сайті Spot Image у веб-сервісі GeoStore за посиланням <http://www.intelligence-airbusds.com/geostore/>, вартість знімків при цьому коливається в межах 2,9–8,4 € за 1 км² на знімки з 6-метровим ПРЗ та 0,9 € за 1 км² за зображення з 1,5-метровим ПРЗ.

6. Огляд джерел здійснення космічної зйомки поверхні Землі з надвисокою ПРЗ.

Національний центр космічних досліджень Франції запустив ще одну програму дистанційного зондування на початку 2000-х років під назвою Pleiades High Resolution. Нині вона представлена двома ідентичними за оснащенням космічними апаратами Pleiades-1A та Pleiades-1B [12], що мають однакові орбіти та відрізняються лише різницею фазового кута в 180°. Кожен з них виконує за добу практично 14,5 витків навколо Землі, при цьому вони відзначаються вагомою здатністю до маневрування (супутники можуть відхилитися вздовж своєї траєкторії польоту на відстань 800 км всього за 25 секунд). Робота в парі таких ШСЗ з орбітальною та технічною спорідненістю забезпечує щоденну зйомку досліджуваних ділянок земної поверхні. Сканування вказаних сцен проводиться з шириною захоплення 20 км. Фіксування поверхні Землі відбувається у 4 каналах мультиспектрального (синій, зелений, червоний та ближній IR) та одному каналі панхроматичного режиму. Для перших ПРЗ становить 2,8 м (2 м після опрацювання), для другого – 0,7 м (0,5 м після обробки). Такі показники забезпечують практичне використання знімків Pleiades для створення та оновлення топографічних карт великого масштабу, розробки проектів з облаштування муніципальних районів та розвитку міст, моніторингу за станом транспортних комунікацій, спостереження стихійних лих та ліквідації їх наслідків, інвентаризації лісгосподарських угідь, забезпечення ведення точного землеробства та ін. Придбати продукцію із супутників Pleiades можна на офіційному сайті Spot Image за ціною 23 \$ за кожне зображення.

Крім того, на сьогодні досить високою популярністю користуються знімки таких ШСЗ з надвисоким ПРЗ, як IKONOS, QuickBird, космічні апарати серій WorldView та GeoEye, права на розповсюдження результатів ДЗЗ з яких належать американським компаніям DigitalGlobe та GeoEye. Найстаршим з них є космічний апарат IKONOS, який був запущений ще у 1999 році, з революційною на той час просторовою роздільною здатністю 3,28 м для каналів мультиспектрального режиму та 0,82 м – для панхроматичного, але цей супутник пропрацював до 2015 року і був виведений оператором зі стану обслуговування. Ще один космічний апарат, який був послідовником IKONOS (запуск провели у 2001 році) та мав ще кращі характеристики ПРЗ (2,44 м у мультиспектральному та 0,61 м у панхроматичному режимі) – космічний апарат QuickBird, але він також був виведений з експлуатації у 2015 році.

Натомість до сьогодні надходять знімки надвисокої роздільної здатності з чотирьох супутників WorldView [13], перший з яких був виведений на орбіту ще у 2007 році. WorldView-1 та WorldView-2 мають смугу захоплення 16 км та 14,5 км відповідно. Перший має 5 спектральних смуг пропускання (синя, зелена, червона, ближня інфрачервона NIR-1 та панхроматична), другий – 9 (додатково фіолетова, жовта, крайня червона та ближня інфрачервона NIR-2). Для мультиспектральних каналів зйомки ПРЗ становить 1,8 м, для панхроматичного режиму коливається у межах 0,45–0,46 м. Натомість космічні апарати WorldView-3 та WorldView-4 являють собою ШСЗ наступного покоління цієї серії та мають ще більш точні характеристики деталізації: роздільна здатність мультиспектральних каналів становить 1,24 м та 1,36 м, а в панхроматичному режимі – 0,31 м та 0,34 м відповідно. При цьому, якщо спектральні зони у WorldView-4 аналогічні тим, що є у WorldView-1, то кількість каналів у WorldView-3 значно збільшили – крім одного каналу панхроматичного режиму та 8 каналів мультиспектрального режиму, наявні ще 8 інтервалів багатосмугового режиму в середньому IR діапазоні з роздільною здатністю 3,7 м

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

та 12 спектральних смуг прибору визначення запиленості атмосфери з ПРЗ 30 м. Смуга захоплення для WorldView-3 становить 13,1 км, а для WorldView-4 – 14,5 км. Супутники WorldView забезпечують зйомку вказаних ділянок земної поверхні з періодичністю 1 раз на добу. Космічні зображення з платформ ДЗЗ серії WorldView успішно застосовуються для картографування, слідкування за змінами на поверхні Землі, сільськогосподарського моніторингу, відстеження районів ураження стихійними лихами, вимірювання характеристик атмосфери та ін. Отримати знімки з цих космічних апаратів можна на офіційному сайті DigitalGlobe за ціною 24–29 \$ за кожний.

Також одним з передових діючих на сьогодні ШСЗ є GeoEye-1 [14], смуга захвату якого становить 15,2 км. Його спектральні діапазони зйомки ідентичні до WorldView-4. Відмінність між ними полягає лише у незначній різниці просторової роздільної здатності: для GeoEye-1 вона становить 1,65 м для вузьких спектральних зон та 0,41 м для панхроматичних зображень. Цей космічний комплекс здатен проводити сканування вказаних територій з періодичністю 1 раз на 3 доби. Такі особливості GeoEye-1 зумовлюють використання його матеріалів аерокосмічного зондування для вирішення таких завдань, як створення та оновлення топографічних карт великого масштабу, контролю забудов та землекористування, проведення моніторингу за станом інфраструктурних мереж та лісогосподарських і сільськогосподарських угідь, забезпечення оборони та безпеки і т. ін. Придбати геоінформаційні дані з космічного апарата GeoEye-1 можна на офіційному сайті GeoEye за плату близько 24–27,5 \$ за знімок.

7. Порівняння вищезгаданих видів проведення ДЗЗ.

Таким чином, було розглянуто основні інструменти отримання космічних знімків поверхні Землі різних класів за просторовою роздільною здатністю. Основні їхні характеристики наведено у таблиці.

Таблиця

Основні характеристики найбільш передових інструментів космічної зйомки

Супутник (оптично-електронна система)	Смуга захоплення, км	Повторюваність зйомки певної земної ділянки	Кількість спектральних каналів	ПРЗ панхроматичного каналу, м	ПРЗ мульти-спектрального каналу, м	Приблизна вартість знімка
1	2	3	4	5	6	7
Низька просторова роздільна здатність (>1 км)						
NOAA (AVHRR)	2580	>4 раз/добу	4–6	–	1100–4000	0
Середня просторова роздільна здатність (100–1000 м)						
Terra (MODIS)	2330	1–2 доби (доступні за кожні 6–8 діб)	36	–	250, 500, 1000	0
Висока просторова роздільна здатність (10–100 м)						
Terra (ASTER)	60	<16 діб	14	–	30, 90	80 \$
Landsat 7	185	<16 діб	8	15	30, 60	0
Landsat 8	185	<16 діб	11	15	30, 100	0
Sentinel-2A (MSI)	290	Приблизно 2,5–5 діб	13	–	10, 20, 60	0
Дуже висока просторова роздільна здатність (1–10 м)						
SPOT 6 / Azersky	60	1–3 доби	5	1,5	6	0,9 €/км ² , 2,9–8,4 €/км ²
Надвисока просторова роздільна здатність (30–90 см)						
Pleiades-1A / Pleiades 1B	20	1 раз/добу	5	0,7 (0,5)	2,8 (2)	23 €
WorldView-1	16	1 раз/добу	5	0,45	1,8	24–27,5 €

Закінчення табл.

1	2	3	4	5	6	7
WorldView-2	16,4	1 раз/добу	9	0,46	1,8	24–27,5 €
WorldView-3	13,1	1 раз/добу	29	0,31	1,24	24–27,5 €
WorldView-4	14,5	1 раз/добу	5	0,34	1,36	24–27,5 €
GeoEye-1	15,2	3 доби	5	0,41	1,65	24–27,5 €

Висновки. У цій статті було розглянуто основні існуючі на сьогодні інструменти здійснення дистанційного зондування Землі з космічних бортів. Було проведено їх огляд та зіставлення за основними ознаками з метою виокремлення найбільш відповідних та доступних варіантів за класами просторової роздільної здатності. Представлений порівняльний аналіз допоможе як фахівцям, так і пересічним користувачам полегшити вибір необхідної та найбільш прийнятної продукції космічних зйомок для вирішення їх нагальних завдань.

Список використаних джерел

1. Aggarwal S. Principles of Remote Sensing / S. Aggarwal // *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology : Proceedings of a Training Workshop, 7–11 July 2003.* – Dehra Dun, India, 2004. – Pp. 23–38.
2. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования / В. Н. Адров, Ю. И. Карионов, П. С. Титаров, А. Д. Чекурин. – М. : Ракурс, 2004. – 10 с.
3. Carfagna E. Cost-effectiveness of Remote Sensing in Agricultural and Environmental Statistics / E. Carfagna // *Proceedings of the Conference on Agricultural and Environmental Statistical Applications in Rome (CAESAR), 5–7 June 2001.* – Vol. 3. – Pp. 618–627.
4. Воробьева А. А. Дистанционное зондирование Земли / А. А. Воробьева. – СПб. : СПбУ ИТМО, 2012. – 168 с.
5. AVHRR [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.nsof.class.noaa.gov/data_available/avhrr/index.htm.
6. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://eoweb.dlr.de:8080/short_guide/D-MODIS.html.
7. ASTER Satellite Sensor [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/>.
8. LandSat 7 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/LandSat-7>.
9. LandSat-8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/LandSat-8>.
10. Copernicus: Sentinel-2 — The Optical Imaging Mission for Land Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>.
11. SPOT-6 and SPOT-7 Commercial Imaging Constellation [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>.
12. Pleiades-1A, 1B [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://innoter.com/satellites/924>.
13. Спутник ДЗЗ. Все спутники ДЗЗ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ecoruspace.me/WorldView-1.html>.
14. GeoEye-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.racurs.ru/?page=456>.

References

1. Aggarwal, S. (2004). Principles of Remote Sensing. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology: Proceedings of a Training Workshop, 7–11 July 2003.* Dehra Dun, India, pp. 23–38.
2. Adrov, V.N., Karionov, Iu.I., Titarov, P.S., Chekurin, A.D. (2004). *Kriterii vybora dannykh DZZ dlia topograficheskogo kartografirovaniia [Criteria of Remote Sensing Data Choice for topographic mapping]*. Moscow: Rakurs (in Russian).
3. Carfagna, E. (5–7 June 2001). Cost-effectiveness of Remote Sensing in Agricultural and Environmental Statistics. *Proceedings of the Conference on Agricultural and Environmental Statistical Applications in Rome (CAESAR)*, vol. 3, pp. 618–627.
4. Vorobeva, A.A. (2012). *Distantcionnoe zondirovanie Zemli [Remote Sensing]*. St. Petersburg: SPbU ITMO (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. *AVHRR*. Retrieved from https://www.nsof.class.noaa.gov/data_available/avhrr/index.htm.
6. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*. Retrieved from http://eoweb.dlr.de:8080/short_guide/D-MODIS.html.
7. *ASTER Satellite Sensor*. Retrieved from <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/>.
8. *LandSat 7*. Retrieved from <https://ru.wikipedia.org/wiki/LandSat-7> (in Russian).
9. *LandSat-8*. Retrieved from <https://ru.wikipedia.org/wiki/LandSat-8> (in Russian).
10. *Copernicus: Sentinel-2 – The Optical Imaging Mission for Land Services*. Retrieved from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>.
11. *SPOT-6 and SPOT-7 Commercial Imaging Constellation*. Retrieved from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>.
12. *Pleiades-1A, 1B*. Retrieved from <https://innoter.com/satellites/924>.
13. *Sputnik DZZ. Vse sputniki DZZ [Remote Sensing Satellite. All Remote Sensing Satellites]*. Retrieved from <http://ecoruspace.me/WorldView-1.html> (in Russian).
14. *GeoEye-1*. Retrieved from <http://www.racurs.ru/?page=456> (in Russian).

Литвинов Віталій Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Литвинов Виталий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и программной инженерии, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Lytvynov Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Information Technologies and Programming Engineering Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vlitvin@ukrsoft.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9622-3871>

ResearcherID: F-6120-2014

Житник Олег Едуардович – аспірант, асистент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Житник Олег Эдуардович – аспирант, ассистент кафедры информационных технологий и программной инженерии, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Zhytnyk Oleh – PhD student, assistant of the Information Technologies and Programming Engineering Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: zhytnykoleh@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2792-3820>

ResearcherID: F-6311-2016