

УДК 528.8

## НАЙВАЖЛИВІШІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА ЇХ МОЖЛИВОСТІ

Пасічник Дар'я, Онойко Юрій

*Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,  
м. Кропивницький, Україна*

*У статті проаналізовано найважливіші супутникові системи дистанційного дослідження Землі, порівнюються їх технічні характеристики та найважливіші сфери застосування. Основна увага приділена найбільш актуальним і доступним для споживача супутниковим системам моніторингу Землі – Landsat, Sentinel, Terra. Розкриті історичні особливості запуску космічних науково-дослідних програм, їх завдання, особливості матеріально-технічного оснащення, характеристики супутникового знімання земної поверхні, накопичення просторових даних, специфіку застосування супутникової інформації в сфері географії, екології, сільського, лісового, водного господарства, раціонального природокористування.*

***Ключові слова:** штучні супутники Землі, дистанційне зондування Землі, космічні науково-дослідні програми, супутникове знімання земної поверхні.*

## THE MOST IMPORTANT SATELLITE SYSTEMS REMOTE SENSING OF THE EARTH AND ITS POSSIBILITIES

Pasichnik Daria, Yuriy Onoyko

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine

The article analyzes the most important satellite systems for remote sensing of the Earth, compares their technical characteristics and the most important areas of application. The main attention is paid to the most relevant and available to the consumer satellite systems for Earth monitoring – Landsat, Sentinel, Terra. The historical features of the launch of space research programs, their tasks, the features of material and technical equipment, the characteristics of satellite surveying of the earth's surface, the accumulation of spatial data, the specifics of the use of satellite information in the field of geography, ecology, agriculture, forestry, water management, and rational nature management are revealed.

**Keywords:** artificial satellites of the Earth, remote sensing of the Earth, space research programs, satellite survey of the Earth's surface.

**Постановка проблеми.** Сучасні супутникові системи дистанційного дослідження (зондування) Землі (ДЗЗ) стали невід’ємним інструментом для збору даних про навколишнє середовище, зміни клімату, моніторинг природних ресурсів і територіальне планування.

В умовах глобальних екологічних викликів супутникове спостереження є критично важливим для забезпечення сталого розвитку на нашій планеті. ДЗЗ дозволяє отримувати оперативну, точну та об’єктивну інформацію на великих територіях, яка може бути використана для прийняття рішень у багатьох галузях: від екології та ландшафтного планування до сільського господарства і управління надзвичайними ситуаціями. Розвиток супутникових систем дистанційного зондування, таких як Landsat, Sentinel, Terra, Aqua, RapidEye, та інших значно розширили можливості сучасної географії та географічних інформаційних систем (ГІС).

**Мета статті.** Метою даної публікації є огляд та аналіз найважливіших супутникових систем дистанційного зондування Землі, визначення їх технічних можливостей та особливостей застосування у різних галузях науки і практики.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Тема супутникових систем ДЗЗ в останні роки стає все більш популярною у науковій літературі. Вивченням технічних можливостей і особливостей застосування супутникових дистанційних систем в різних сферах науки і господарства займалися такі українські вчені як О. Азімов [1], В.С. Готинян, О.В. Томченко та С.В. Яценко [2], В.І. Лялько, Л.О. Єлістратова, О.А. Апостолов і В.М.Чехній [6], С.О. Довгий, С.М. Бабійчук та Т.Л. Кучма [3], Я. Доценко та Ю. Онойко [5] й інші.

**Виклад основного матеріалу.** За останні десятиліття науковцями і конструкторами було розроблено й успішно застосовано ряд супутникових програм спостереження за станом навколишнього середовища, таких як **Landsat, Sentinel, Terra**, що нині забезпечують географічну науку детальними просторовими даними. Однак із розвитком космічних технологій все актуальнішою є потреба у пошуку нових можливостей супутникових платформ,

їхньої інтеграції у ГІС та з'ясуванні ролі у вирішенні глобальних екологічних проблем.

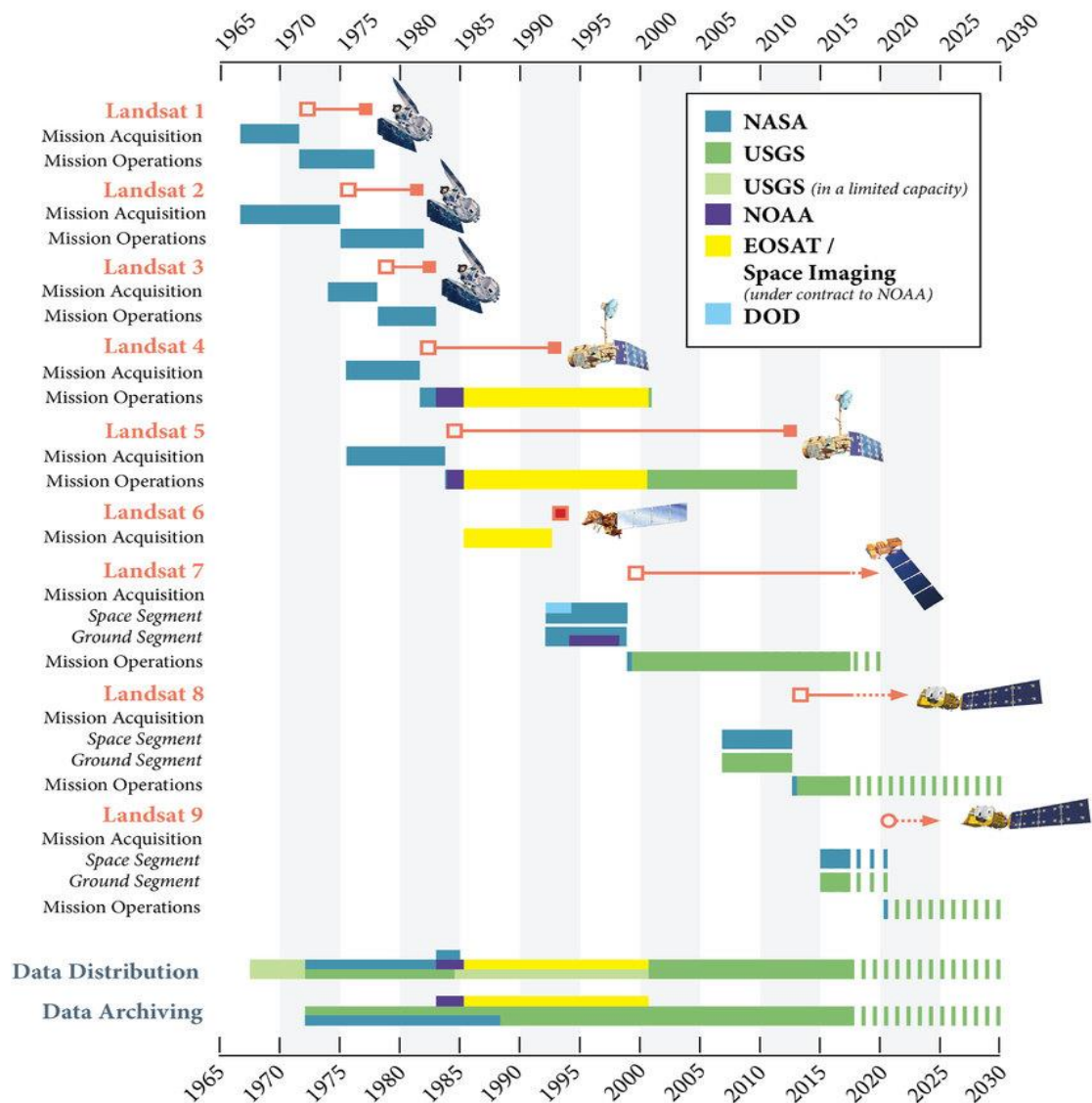
Спостереження за Землею стало основним рушієм так званої Четвертої промислової революції – ери аналізу великих даних (The Era of Big Data analytics) [7]. Дані від супутників, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і датчиків з'являються швидше, ніж розробляються механізми для їхньої обробки та використання. Тепер дані доступні в реальному часі та в різноманітних форматах, що у свою чергу, допомагає нам комплексно дивитися на світ, вирішувати проблеми з більшою ефективністю та сприяти прийняттю кращих рішень.

Однією з найактуальніших космічних програм спостереження за Землею є **програма Landsat**. Програма Landsat – найтриваліший проект з отримання супутникових фотознімків планети Земля. Landsat є однією з найстаріших та найуспішніших програм спостереження за Землею [10]. Серія американських супутників дистанційного зондування Землі Landsat була запущена Національним управлінням з аеронавтики і дослідження космічного простору (National Aeronautics and Space Administration, NASA) у співпраці з Геологічною службою США (United States Geological Survey, USGS) [4]. Перша місія космічної програми під назвою Landsat-1 була виведена на орбіту 23 липня 1972 р. Отже, Landsat – найдовша супутникова програма спостереження за Землею, яка забезпечує безперервний моніторинг земної поверхні, атмосфери і земних надр вже понад 50 років.

На сьогодні найсучаснішими з даної серії є супутники Landsat-8 (запущений у 2013 році) та Landsat-9 (запущений у 2021 році) (рис. 1.1). У найближчому майбутньому (2025 та 2030 рр.) планується продовжити запуски супутників Landsat нових поколінь [4].

Починаючи з серії супутників Landsat-4 (1982 р.), розпочалося значне технічне оновлення космічної техніки. Так на супутниках Landsat-4 вперше почали використовувати новий інструмент для зйомки земної поверхні з космосу – Thematic Mapper (тематичний картограф), який забезпечував більш

високу роздільну здатність супутникових знімків і ширший спектр спостережень.



**Рис. 1.1. Хронологія запусків супутників серії програми Landsat [8]**

Вже Landsat-5 (1984 р.) став важливим етапом у розвитку програми, оскільки працював протягом рекордного періоду (до 2013 року), забезпечуючи безперервне отримання супутникових даних протягом майже 30 років.

Landsat-7, запущений в 1999 р., був оснащений удосконаленим Enhanced Thematic Mapper Plus (розширена версія тематичного картографа, ETM+), що дозволило отримувати фахівцям зображення земної поверхні з вищою роздільною здатністю та забезпечувало більш надійне отримання даних.

Landsat-8, який перебуває на навколоземній орбіті з 2013 р., є сучасним супутником із такими новими інструментами як Operational Land Imager

(оперативний тепловізор Землі, OLI) та Thermal Infrared Sensor (тепловий інфрачервоний датчик, TIRS). Дані інструменти забезпечують високоякісні багатоспектральні та інфрачервоні зображення атмосфери, земної поверхні та надр для широкого спектра досліджень.

Останній супутник серії Landsat-9 (2021 р.) продовжує місію з отримання даних із високою роздільною здатністю. Він оснащений тими ж інструментами, що і Landsat 8, та покращує можливості зйомки, забезпечуючи ще більшу точність і детальність [8].

Найновіші супутники програми Landsat роблять космічні знімки з роздільною здатністю від 15 до 60 метрів на точку, а періодичність збору даних складає 16-18 діб [4].

Landsat Next, запуск якого очікується в 2030 р., є інноваційною місією Landsat і буде мати покращену часову, просторову та спектральну роздільну здатність [11]. Вчені вважають, що ця місія задовольнить глобальні потреби користувачів даних Landsat і підтримуватиме науково-дослідницькі програми, що вже розвиваються, та забезпечить інформацією нові дослідження, зберігаючи безперервність даних Landsat і якість найдовшого космічного запису земної поверхні [10].

Найважливішими сферами практичного використання даних програми Landsat є сільське господарство (моніторинг стану посівів сільськогосподарських рослин; визначення рівня зволоженості ґрунту; виявлення захворювань рослин), екологія (спостереження за змінами у природному середовищі; оцінка стану лісових насаджень; виявлення забруднень Світового океану), управління водними ресурсами (контроль за рівнем води та якістю водойм; дослідження цвітіння водної поверхні) тощо [9].

На сьогоднішній день дані дистанційного зондування Землі, отримані за допомогою космічних апаратів Landsat, використовуються більш ніж у 100 країнах [11]. Інформація, що надходить зі супутників Landsat, активно застосовується для вирішення багатьох економічних, наукових, політичних і військових задач. Зокрема, ці дані широко використовуються у географії,

океанографії, гідрології, геології, дослідженні природних ресурсів окремих регіонів і країн, а також земної кулі загалом, картографуванні поверхні Землі та у контролі за станом навколишнього середовища.

Ще однією важливою і поширеною космічною програмою дистанційного вивчення Землі є **Sentinel**. Програма Sentinel є частиною глобальної програми Copernicus, яку реалізує Європейське космічне агентство (European Space Agency, ESA) у співпраці з Європейською комісією. Мета програми Sentinel – забезпечити регулярний моніторинг Землі з використанням супутників, які надають високоточні та багатоспектральні дані для широкого спектру досліджень і практичного застосування [4]. Програма охоплює кілька супутникових місій, кожна з яких має свою спеціалізацію, від спостереження за океанами до моніторингу атмосфери та земної поверхні.

Програма Copernicus була запущена в першу чергу для забезпечення Європи надійною і актуальною інформацією про стан навколишнього середовища та для оперативного реагування на природні катастрофи. Супутники Sentinel є ключовими інструментами для виконання цих завдань. Всі дані є безкоштовними та знаходяться у відкритому доступі. Кожна місія Sentinel базується на двох супутниках, забезпечуючи надійні набори даних для якісного виконання всіх послуг програми Copernicus [9].

Окремі супутники Sentinel мають свою спеціалізацію в окремих галузях наукових досліджень. Так Sentinel-1 є радарним супутником, який використовує технологію SAR (радар із синтезованою апертурою, Synthetic Aperture Radar) [4]. Він забезпечує зображення земної поверхні навіть у складних погодних умовах (при хмарності або вночі). Це робить Sentinel-1 особливо корисним для моніторингу в умовах, коли інші типи зображень недоступні. Просторова роздільна здатність знімків супутника Sentinel-1 5-20 метрів, а частота зйомки до 12 днів для всієї Землі [9].

Основними сферами застосування даних Sentinel-1 є моніторинг рухів земної поверхні (зсуви, землетруси, вулканічна активність), спостереження за змінами в льодовикових покривах, станом льоду в Арктиці та Антарктиді,

вивчення прибережних зон морів, океанів та спостереження за судноплавством, моніторинг повеней, пожеж та інших природних катастроф [8].

Супутники Sentinel-2 забезпечують високоякісні мультиспектральні зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах. Супутники Sentinel-2A та Sentinel-2B працюють у парі, забезпечуючи регулярні спостереження за земною поверхнею кожні 5 днів та просторову роздільну здатність знімків 10-60 м [9].

Просторові дані зібрані супутниками Sentinel-2 широко застосовуються у сільському господарстві для оцінки стану посівів, прогнозування врожайності угідь та контролю за використанням води і добрив, в лісовому господарстві з метою моніторингу вирубки лісів, змін у рослинному покриві, збереження біорізноманіття, в земельному управлінні та плануванні для спостережень за міськими зонами, оцінки змін у використанні земельних угідь, у водному господарстві для моніторингу стану водойм, контролю за забрудненням води, оцінки стану річок і озер [4].

Місія Sentinel-3 спеціалізується на спостереженні за океанами, морською поверхнею та атмосферою [8]. Місія надає дані про температуру поверхні, висоту рівня моря, колір океанів та стан атмосфери, вимірює вміст аерозолів та парникових газів в атмосфері, досліджує вплив змін клімату на температуру води, рівень морів і океанів, а також на динаміку льодовиків.

Sentinel-5P був запущений для спостереження за складом атмосфери, зокрема для моніторингу рівня озону, аерозолів та інших газів, які впливають на якість повітря та кліматичні зміни на планеті [9]. Супутники Sentinel-5P оснащені сучасними інструментами зондування Землі – TROPOMI (інструмент моніторингу тропосфери, Tropospheric Monitoring Instrument), які забезпечують оперативне спостереження за концентрацією парникових газів, озону, діоксиду азоту, метану, чадного газу та інших газів в нижніх шарах атмосфери, здійснюють оцінку забруднення повітря в міських та промислових зонах, попереджають про високі концентрації забруднюючих речовин.

Sentinel-6, запущений у 2020 р., спеціалізується на вимірюванні висоти поверхні океанів і є важливим інструментом для досліджень змін рівня світового океану, що пов'язано з глобальним потеплінням [8]. Радіолокаційний висотомір Poseidon-4, який встановлений на Sentinel-6, вимірює висоту рівня морської поверхні з точністю до кількох сантиметрів. Дану групу супутників використовують для спостережень за морськими течіями та океанськими процесами, за зміною рівня Світового океану через танення льодовиків та глобальне потепління.

Космічна дослідницька **програма Terra** є частиною системи дистанційного зондування Землі, розробленої NASA в рамках проекту Системи спостереження Землі (Earth Observing System, EOS) [4]. Супутник Terra був запущений в 1999 р. і став одним із перших великих супутників, призначених для глобального моніторингу стану Землі, атмосферних і кліматичних змін, океанів, льодовикових покривів, екосистем та інших важливих геофізичних параметрів. Terra розташована на сонячно-синхронній орбіті на висоті близько 705 км і здійснює оберт навколо Землі кожні 99 хвилин. Завдяки високоточним інструментам, встановленим на борту, Terra забезпечує регулярне отримання даних для досліджень у багатьох галузях науки, включаючи кліматологію, екологію та моніторинг природних ресурсів.

Супутник Terra оснащений п'ятьма основними технічними інструментами для спостереження за земною поверхнею, атмосферою та океанами: спектро радіометром середньої роздільної здатності (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS), удосконаленим космічним радіометром теплової емісії та відбиття (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER), спектро радіометром багатокутового зображення (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, MISR), радіометра, який здійснює спостереження за хмарним покривом та енергетичною системою випромінювання Землі (Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES), радіометра, який забезпечує вимірювання рівня забруднення тропосфери (Measurements of Pollution in the Troposphere, MOPITT) [4].



Більшість інструментів, які встановлені на супутниках Terra, унікальні за своїми функціональними можливостями [7]. Так радіометр ASTER використовують для створення високоточних карт рельєфу земної поверхні, моніторингу теплових аномалій, вивержень вулканів і тектонічних активностей, вивчення геологічних процесів та мінеральних ресурсів земної кори. Спектрорадіометр MISR є унікальним інструментом, який здійснює зйомку земної поверхні з дев'яти різних кутів, що дозволяє отримувати тривимірні зображення та проводити детальний аналіз атмосферних та поверхневих явищ, зокрема спостерігати за розповсюдженням аерозолів у повітрі, виявляти зміни у земному покриві, вивчати динаміку рослинності та розвиток процесів спустелювання. Радіометр CERES вимірює відбивну здатність земної поверхні та кількість енергії, яка надходить на Землю та випромінюється нею в космос. Дані вимірювання є ключовими для розуміння балансу енергії на планеті і вивчення радіаційного балансу Землі, оцінки змін температури повітря внаслідок змін клімату. Радіометр MOPITT спеціалізується на вимірюванні рівнів забруднюючих газів у тропосфері, таких як чадний газ (CO) і метан (CH<sub>4</sub>). Він використовується для спостереження за глобальним забрудненням повітря та його поширенням, за впливом основних забруднюючих газів на здоров'я населення та кліматичні процеси, для оцінки впливу промисловості, транспорту і лісових пожеж на атмосферу. Сканер MODIS призначений для спостереження за глобальною динамікою планети Земля, що включає зміни хмарного покриву, теплового балансу Землі і процесів теплообміну, що відбуваються в океанах, на суші і в нижніх шарах атмосфери [4].

Дистанційні просторові дані отримані в результаті роботи супутників Terra можуть використовуватися для вирішення різноманітних завдань з регулярного моніторингу природних явищ у межах значного регіону, таких як контроль за льодяним покривом, спостереження за динамікою сніжного покриву, виявлення лісових пожеж, паводків і оцінка стану сільськогосподарських посівів.

**Висновки.** Сучасні системи супутникового моніторингу Землі забезпечують фахівців актуальною та оперативною географічною інформацією про різні складові навколишнього природного середовища – атмосферу, ґрунтовий покрив, земельні угіддя, сільськогосподарські насадження, Світовий океан, земні надра. Найбільш тривалими і доступними для споживача є космічні програми Landsat, Sentinel, Terra. Значний масив супутникових даних відповідних програм знаходиться у вільному доступі та дозволяє фахівцям організовувати різноманітні дослідження, виявляти взаємозв'язки між окремими частинами географічного простору. Також системи супутникового моніторингу можна ефективно застосовувати і в освітньому процесі як потужний інструмент візуалізації та демонстрації більшості географічних процесів і явищ.

#### **Список використаної літератури**

1. Азімов О. Дослідження диз'юнктивних дислокацій земної кори аерокосмічними методами (на прикладі регіонів України) : автореф. дис. ... доктора геолог. наук : 04.00.01. Київ, 2008. 37 с.
2. Готинян В.С., Томченко О.В., Яценко С.В. Можливості ГІС/ДЗЗ-технологій для вивчення ерозійно небезпечних ділянок. *Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Черкащини* : матеріали регіональної наради (29-30 червня 2016), м. Черкаси, 2016. С. 10-15.
3. Довгий С.О., Бабійчук С.М., Кучма Т.Л. Дистанційне зондування Землі : аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах : навч.-метод. посіб. Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2020. 268 с.
4. Довгий С.О., Лялько В.І., Бабійчук С.М., Кучма Т.Л., Томченко О.В., Юрків Л.Я. Основи дистанційного зондування Землі : історія та практичне застосування. Київ : НАПН України, 2019. 316 с.
5. Доценко Я., Онойко Ю. Особливості дослідження рельєфу методами дистанційного зондування Землі. *Наукові записки молодих учених*. Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка. №11. Кропивницький, 2023.
6. Лялько В.І., Єлістратова Л.О., Апостолов О.А., Чехній В.М. Аналіз ґрунтово-ерозійних процесів в Україні на основі застосування даних дистанційного зондування Землі. Київ : Вісник НАН України, 2017. №10. С. 34-41.

7. Analysis. The crucial role of satellite products in observing the Earth from space (part one). URL : <https://www.cr2.cl/eng/analysis-the-crucial-role-of-satellite-products-in-observing-the-earth-from-space-part-one/>.

8. Copernicuss-program. URL: [https://www.researchgate.net/figure/ESAs-operational-Copernicuss-program-with-the-Sentinel-family-CESA-modified\\_fig1\\_335255638](https://www.researchgate.net/figure/ESAs-operational-Copernicuss-program-with-the-Sentinel-family-CESA-modified_fig1_335255638).

9. ESA. Sentinel-2. URL: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2).

10. Landsat Next: A New & Revolutionary Mission. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-next/>.

11. Landsat Science (офіційний сайт). URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

#### ***Відомості про авторів:***

*1. Пасічник Дар'я Євгенівна – студентка факультету математики, природничих наук та технологій Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка, група ГК23М, моб. тел.: +380664659181, e-mail: [dassik2001@gmail.com](mailto:dassik2001@gmail.com)*

*2. Онойко Юрій Юрійович – кандидат географічних наук, доцент кафедри природничих наук і методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка, моб. тел.: +380502789351, e-mail: [geograf.cuspu@gmail.com](mailto:geograf.cuspu@gmail.com)*