

## ПОРІВНЯННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ КОМЕРЦІЙНИХ ТА ВІДКРИТИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ПОТРЕБ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

**Мета.** Дослідження спрямоване на порівняльну оцінку можливостей відкритих супутникових даних місій Sentinel та комерційних високорозрізнених систем Planet, SkySat і WorldView для вирішення ключових задач точного землеробства. Основною метою є визначення відмінностей у просторовій, спектральній, радіометричній та часовій інформативності різних типів супутникових даних, а також оцінка економічної доцільності їхнього використання в агровиробництві. Особлива увага приділяється практичним сценаріям моніторингу, де критично важливими є частота зйомки, рівень деталізації, якість аналітики та можливість інтеграції даних у цифрові агросистеми. **Методи.** У роботі застосовано методи дистанційного зондування Землі, багатоспектрального аналізу, радарної інтерпретації, а також інструменти геоінформаційного моделювання. Для порівняння використано офіційні продукти Sentinel-1 та Sentinel-2, а також комерційні знімки PlanetScope, SkySat і WorldView. Оцінювання проводилося за кількома групами критеріїв: просторова та темпоральна розрізненість, спектральний склад, радіометрична стабільність, доступність, вартість та особливості робочих процесів обробки. Дані аналізувалися за допомогою програмного забезпечення SNAP, QGIS, Google Earth Engine та інструментів API-платформ комерційних постачальників. **Результати.** Отримані результати демонструють суттєву різницю між відкритими та комерційними супутниковими системами у контексті аграрних застосувань. Sentinel-2 завдяки наявності ред-едж і SWIR смуг забезпечує високоякісний спектральний аналіз, необхідний для оцінки стану рослинності, виявлення стресів та побудови довготривалих часових рядів. Sentinel-1 доповнює оптичні дані можливістю моніторингу незалежно від хмарності. Водночас комерційні системи демонструють значну перевагу у просторовому розрізненні та оперативності, що дає змогу фіксувати локальні аномалії, виявляти дрібні осередки ураження, аналізувати структуру посівів та забезпечувати оперативний моніторинг у критичні періоди. Розрахунки показали, що комерційні знімки є економічно доцільними переважно для високовартісних культур, інтервенційних рішень або локальних задач підвищеної точності, тоді як Sentinel оптимально підходить для базового, регулярного та масштабного моніторингу. Запропонована гібридна схема використання дає змогу поєднувати безкоштовні часові ряди Sentinel із вибірковыми високорозрізненими спостереженнями для уточнення ділянок ризику. **Практична значущість.** Результати дослідження мають суттєву прикладну цінність для аграрних підприємств, консультантів, агрономів та компаній, що працюють у сфері точного землеробства. Побудовані рекомендації щодо вибору джерел супутникових даних дають змогу раціонально планувати витрати, оптимізувати агротехнічні операції, підвищувати точність карт зонування, своєчасно виявляти проблемні ділянки та мінімізувати економічні ризики. Інтеграція різних типів супутникових даних створює підґрунтя для формування більш адаптивних і продуктивних агроаналітичних систем, сприяючи зростанню ефективності виробництва, зменшенню втрат урожаю та підвищенню стійкості до кліматичних викликів.

**Ключові слова:** точне землеробство, Sentinel-1, Sentinel-2, PlanetScope, SkySat, WorldView, спектральні індекси, супутниковий моніторинг, дистанційне зондування Землі, агроаналітика.

### Вступ

У другій половині XX століття розвиток дистанційного зондування Землі зробив справжній прорив у способах, якими людина спостерігає та аналізує стан навколишнього середовища. Особливо сильний вплив ці технології отримали у сфері сільського господарства. Точне землеробство, що базується на принципах

диференційованого управління ресурсами та просторового аналізу, стало однією з тих галузей, де супутникові дані набули стратегічного значення. Сучасне поле перетворилося на об'єкт постійного контролю, який можна досліджувати в часі та просторі, аналізувати за десятками показників і якнайточніше адаптувати під потреби конкретної культури та конкретного сезону.

Поява відкритих супутникових місій, таких як Sentinel, Landsat та MODIS, дала змогу демократизувати доступ до космічної інформації. Завдяки безоплатності, регулярному оновленню та високій якості даних аграрії, науковці та консультанти отримали можливість щотижнево відстежувати стан посівів, будувати карти вегетаційних індексів, аналізувати продуктивність полів та оцінювати зміни, пов'язані з погодою, шкідниками або технологічними помилками. У багатьох країнах саме відкриті дані стали фундаментом національних систем агромоніторингу, адже дають змогу охопити величезні площі та забезпечити базовий рівень інформаційної підтримки без значних фінансових витрат.

Водночас розвиток приватних супутникових компаній привів до появи іншого класу даних. Комерційні місії, такі як PlanetScope, WorldView або SkySat, зосереджені на тому, щоб дати максимально деталізований, частий і гнучкий огляд земної поверхні. Вони працюють у режимі щоденного або навіть багаторазового знімання однієї й тієї самої території, що дає змогу аграріям спостерігати за полем майже так само оперативно, як і за показниками метеостанції. Надвисока просторово-часова деталізація відкриває можливості, яких не можуть надати відкриті супутники: це раннє виявлення хвороб і бур'янів, аналіз рівномірності сходів, контроль роботи техніки, моніторинг граду та підтоплень у день події, точна інвентаризація багаторічних насаджень та інші спеціалізовані задачі.

Попри очевидні переваги комерційних даних, вони мають і свої обмеження, головним серед яких є вартість. Для середніх і малих господарств придбання високочастотних або високодетальних знімків є значним фінансовим навантаженням, тому постає питання доцільності. Навіть великі агрохолдинги обирають комерційні дані лише для завдань, де справді потрібна додаткова точність або оперативність. У більшості ситуацій безкоштовні відкриті дані Sentinel цілком покривають потреби сезонного моніторингу, і саме їх використовують як основне джерело інформації.

Тому важливо не тільки знати характеристики різних типів супутникових систем, а й розуміти, де саме вони мають найбільшу цінність. Порівняння відкритих і комерційних супутникових даних дає змогу сформулювати збалансований підхід до використання дистанційного зондування в точному землеробстві. Це порівняння охоплює широкий спектр параметрів: просторову та спектральну роздільність, частоту оновлення, здатність працювати за хмарності, доступність архівів, інтеграцію з ГІС та аграрними платформами, а також економічну доцільність.

У сучасному аграрному виробництві рішення часто приймають на перетині двох світів: світ безкоштовної інформації, яка забезпечує регулярний огляд стану полів, і світ високоточних комерційних даних, які

дають можливість глибоко аналізувати окремі ділянки, реагувати на стреси та приймати точні тактичні рішення. Саме тому питання порівняння цих двох категорій супутникової інформації стає актуальним не лише для аграрних підприємств, а й для дослідників, аналітиків, сервісних компаній та державних інституцій, що здійснюють моніторинг землекористування.

Актуальність порівняння відкритих та комерційних супутникових даних визначається тим, що сучасне сільське господарство переходить до моделі управління, заснованої на точних, оперативних та економічно обґрунтованих рішеннях. Зростання вартості ресурсів, зміна клімату, поява нових шкідників і хвороб, а також потреба підвищувати ефективність виробництва в умовах обмежених земельних ресурсів змушують аграріїв використовувати інструменти, які дають змогу бачити поле в режимі реального часу та аналізувати його з максимальною точністю. Саме супутникові дані стали одним із ключових джерел такої інформації, однак їхня різноманітність і швидкий розвиток створюють потребу визначити, які саме типи знімків є найкориснішими для конкретних аграрних цілей.

На практиці агрогосподарства дедалі частіше опиняються перед вибором: спиратися виключно на відкриті супутникові дані, що доступні безкоштовно і забезпечують постійне покриття території, або інвестувати в комерційні знімки, які надають кращу роздільність, частіше оновлення або унікальні спектральні канали. Зважаючи на те, що бюджетні можливості та технологічні потреби різних господарств значно відрізняються, зростає важливість чіткого розуміння того, які типи супутникових даних відповідають певним видам польових операцій, аналітичних завдань чи сезонних ризиків.

Особливу актуальність це питання має в умовах кліматичних змін, які призводять до збільшення кількості екстремальних погодних явищ, таких як посухи, паводки, град чи різкі температурні перепади. Для реагування на такі події аграріям потрібна оперативна інформація високої точності. Водночас не кожне господарство може дозволити собі регулярне придбання комерційних даних, тому важливо визначити, коли витрати є виправданими і забезпечують реальну економічну віддачу. Це перетворює порівняння відкритих і комерційних супутникових джерел на ключовий аспект планування систем управління ризиками.

Актуальність теми посилюється також стрімким технологічним розвитком сектору. Сучасні супутникові сузір'я починають працювати в режимі майже безперервного моніторингу, інтегруються з наземними сенсорами, метеостанціями та штучним інтелектом. На цьому фоні змінюються стандарти точного землеробства, і постає потреба в системному аналізі того, як різні типи супутникових даних поєднуються між собою та підсилюють один одного. З одного боку, відкриті

дані забезпечують стабільний, довгостроковий та глобальний огляд, а з іншого – комерційні системи додають глибину, деталізацію та швидкість реакції. Розуміння цієї динаміки є критично важливим для оптимізації агровиробництва.

Крім того, актуальність дослідження визначається щораз більшою цифровізацією агросектору. Численні аграрні платформи, мобільні застосунки та ГІС-системи активно інтегрують супутникові дані у свої робочі процеси, але не завжди надають користувачам чіткі орієнтири щодо того, яке джерело даних підходить для певної задачі. Це може призводити до неправильних інтерпретацій, непотрібних витрат або недостатньої точності рішень. Порівняльний аналіз відкритих і комерційних супутникових місій дає змогу сформулювати практичні рекомендації для аграріїв, аналітиків та консультантів, що підвищить якість прийняття рішень на всіх рівнях виробництва.

**Метою дослідження** є комплексне порівняння можливостей, обмежень та ефективності застосування відкритих і комерційних супутникових даних у системах точного землеробства, а також визначення умов, за яких кожен тип даних забезпечує найбільшу цінність для моніторингу стану посівів, управління ресурсами та прийняття агрономічних рішень.

Досягнення цієї мети передбачає необхідність всебічного аналізу технічних характеристик основних супутникових місій, оцінки їхньої практичної придатності в реальних виробничих умовах та ідентифікації критеріїв вибору оптимального набору даних відповідно до індивідуальних потреб агропідприємств.

Сучасні дослідження у сфері дистанційного зондування сільськогосподарських культур демонструють системний перехід від окремих експериментальних застосувань до комплексних багатовисновкових підходів оцінювання стану посівів. У ключових працях, присвячених застосуванню Sentinel-2 у точному землеробстві, наголошується на високій інформативності спектральних каналів MSI для моніторингу біофізичних параметрів культур. Зокрема, у дослідженні Segarra та співавторів показано, що поєднання видимого, ближнього інфрачервоного та червоної межі забезпечує високу чутливість до динаміки вегетаційних індексів і просторової неоднорідності посівів, що є критично важливим для систем точного внесення агрохімікатів (Segarra et al., 2020). Переваги Sentinel-2 докладно підтверджені також в офіційній технічній документації ESA, де визначено характеристики спектральних каналів, радіометричні параметри MSI та особливості передобробки L1C/L2A, що робить ці продукти стандартом для агромоніторингу середньої роздільної здатності (ESA, 2015).

Розширення аналітичних можливостей оцінювання стану культур пов'язане зі зростанням інтересу до даних високої та надвисокої просторової роздільної

здатності. Узагальнення світових тенденцій подане у систематичному огляді Zhang та співавторів, де підкреслено, що високодетальні супутникові системи стають основою фенотипування культур і просторової стратифікації продуктивності завдяки здатності реєструвати дрібні морфологічні та структурні особливості рослинних угруповань (Zhang et al., 2020).

Порівняльні дослідження різних супутникових платформ демонструють зміщення акценту в бік комбінованих джерел даних. У праці Amankulova та співавторів показано, що PlanetScope, Sentinel-2 і Landsat 8 мають різну прогностичну здатність щодо оцінки врожайності сої, причому височастотні знімки PlanetScope забезпечують стабільніші моделі на ранніх фазах розвитку культур, тоді як Sentinel-2 дає вищу точність у період повної вегетації завдяки спектру червоної межі (Amankulova et al., 2023). Це узгоджується з даними технічних специфікацій Planet Labs, у яких підкреслено важливу роль щоденної повторюваності PlanetScope у задачах оперативного моніторингу (Planet Labs Inc., PlanetScope Imagery).

Дослідження Moletto-Lobos та співавторів демонструє органічну інтеграцію супутникових та UAV-даних у моніторингу озимої пшениці, показуючи, що поєднання високої спектральної деталізації БПЛА та регулярної супутникової повторюваності забезпечує найточнішу оцінку біофізичних показників культур (Moletto-Lobos et al., 2024). Цей підхід відповідає світовій тенденції багаторівневого моніторингу, яку підтримують технічні специфікації Planet SkySat, що забезпечує надвисоку роздільну здатність для локальних досліджень (Planet Labs Inc., SkySat Spec).

Важливим елементом сучасних аналітичних моделей є калібрування сенсорів та забезпечення їх взаємосумісності. У дослідженні Baldin та співавторів порівняння спектральних каналів Sentinel-2 та PlanetScope продемонструвало, що між сенсорами існують стабільні кореляції, які дають змогу створювати інтегровані продукти та моделі, стійкі до відмінностей у характеристиках камер (Baldin et al., 2025). Ці результати узгоджуються з технічними звітами USGS, які докладно описують процедурну калібровку комерційних сенсорів Planet Dove-R і WorldView-3, акцентуючи на питаннях радіометричної стабільності та геометричної коректності (USGS, 2021).

Надвисоку просторову деталізацію для моніторингу агросистем забезпечують комерційні сенсори Maxar. Дані WorldView-3 характеризуються унікально широким спектральним охопленням, включно з каналами короткохвильового інфрачервоного діапазону, що підвищує можливості класифікації та точність оцінювання стану рослинності, про що свідчать технічні специфікації системи (Maxar Technologies, WorldView-3 Datasheet). Доповнення до цього наведено у матеріалах ESA Earth Online, де подано характеристику

місії WorldView-3 та її застосування у високоточному моніторингу продуктивності культур і структурних властивостей полів (ESA Earth Online).

Загалом аналіз джерел демонструє конвергенцію різних технологічних ліній: систем середньої роздільності (Sentinel-2), високої (PlanetScope, Landsat 8) і надвисокої (SkySat, WorldView-3). Поєднання спектральних характеристик, частоти повторних знімків та каліброваних технічних параметрів сенсорів формує нову парадигму агромоніторингу, де точність оцінювання біофізичних властивостей рослин залежить від інтеграції різних джерел даних та їх взаємосумісності. Сукупність досліджень підтверджує, що багатосенсорний моніторинг стає базовим стандартом точного землеробства, забезпечуючи гнучкість у виборі даних, стійкість моделей та високу аналітичну точність оцінювання продуктивності агроландшафтів.

### Методика досліджень

Для досягнення поставленої мети дослідження передбачає послідовне й глибоке опрацювання кількох ключових напрямів, кожен з яких розкриває особливу грань взаємодії аграрного сектору із сучасними системами супутникового спостереження. Першим кроком стає аналіз відкритих супутникових місій, зокрема Sentinel та Landsat, адже саме ці програми вже багато років формують фундамент доступного дистанційного зондування. Їхні технічні параметри, такі як просторова й спектральна роздільність, частота оновлення, розмір архівів та можливості вегетаційного моніторингу, створюють опорну точку для аграрних досліджень. Вивчаючи ці характеристики, можна зрозуміти, як саме безкоштовні дані дозволяють спостерігати за станом рослинності, будувати часові ряди індексів, визначати межі неоднорідностей та аналізувати розвиток культур у масштабах від окремих полів до великих сільськогосподарських регіонів. Окремої уваги потребує оцінка обмежень таких систем, адже недостатня деталізація чи залежність від хмарності можуть впливати на якість операційного моніторингу.

Наступний етап передбачає розгорнутий огляд можливостей комерційних супутникових платформ, серед яких PlanetScope, SkySat і WorldView займають провідні позиції. Їхні сенсори здатні забезпечувати значно вищу просторову роздільність, ширшу гаму спектральних каналів та часте поновлення, що особливо цінно у періоди стрімких змін стану посівів. Комерційні сервіси часто пропонують не лише самі зображення, а й зручні хмарні інструменти, автоматизоване оновлення, API для інтеграції, а також можливість таргетованих зйомок за запитом. Вивчаючи такі платформи, дослідження акцентує увагу на тому, наскільки їхня точність та оперативність здатні компенсувати фінансові витрати й чи виправдані вони у контексті конкретних аграрних завдань.

Подальше порівняння продуктивності різних джерел даних у практичних аграрних сценаріях дає змогу перейти від технічних характеристик до реальних виробничих задач. Тут постає питання, у яких ситуаціях відкритих даних достатньо для ефективного контролю поля, а коли лише комерційна зйомка з високою деталізацією здатна виявити локальний стрес, дрібну аномалію або структуру міжрядь. Аналіз таких кейсів охоплює моніторинг посухи, картування неоднорідностей, побудову індексів якості рослин і визначення меж зон для точного внесення. Порівняння дає змогу окреслити межу між безкоштовною широкомасштабною аналітикою та деталізованими інструментами, які вмикаються там, де потрібно приймати точкові рішення.

Економічний аспект є невід'ємною частиною дослідження, адже вибір супутникових даних завжди має фінансовий сенс. Для господарств різного масштабу важливо оцінити не лише саму вартість знімків, а й потенційний приріст врожайності, скорочення витрат на добрива або хімічні засоби та швидкість реагування на ризики, які можуть призвести до втрат. Таке дослідження формує підхід до економічної оцінки, де вартість даних співвідноситься з очікуваним ефектом, а також враховуються сезонні ризики, критичні фази розвитку культур і специфіка ресурсного забезпечення господарства.

Ще один важливий напрям стосується інтеграції різних типів даних у цифрові платформи агромоніторингу. Сучасні ГІС-системи, мобільні застосунки та хмарні аналітичні сервіси активно поєднують відкриті та комерційні зображення, створюючи комбіновані моделі моніторингу, де кожен тип даних виконує свою роль. Вивчення такої синергії дає змогу зрозуміти, як автоматизувати робочі процеси, оптимізувати навантаження на фахівців і забезпечити стабільну роботу аналітичних систем навіть за високої хмарності або нестачі свіжих знімків.

Підсумовуючи всі попередні блоки, дослідження ставить за мету сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального типу супутникових даних для різних агротехнологічних задач. Такі рекомендації мають допомагати виробникам, консультантам і компаніям дистанційного моніторингу орієнтуватися у великій кількості доступних рішень і робити вибір не інтуїтивно, а на основі чітких критеріїв: масштабу господарства, специфіки культур, частоти моніторингу, потрібної точності та економічної доцільності.

Завершальним елементом роботи є аналіз перспектив розвитку супутникових технологій в агро-секторі. Постійне збільшення кількості супутникових апаратів, поява нових спектральних каналів, удосконалення алгоритмів штучного інтелекту та розвиток високочастотних сузір'їв радикально змінюють аграрний моніторинг. Такі тенденції створюють підґрунтя

для більш точних моделей прогнозування врожайності, миттєвого виявлення стресів та інтеграції супутникових даних з даними дронів, метеостанцій і машинних сенсорів. Отож дослідження охоплює не лише поточний стан супутникового забезпечення, а й окреслює майбутні можливості, які визначають якість цифрового землеробства у найближчі роки.

### Результати досліджень та їх обговорення

Просторова розрізненість у супутниковому моніторингу поводить як лінза, що визначає, наскільки дрібні деталі поля стають видимими. Її можна уявити як зернистість фотографії: великий піксель приховує дрібні нюанси, дрібний піксель відкриває їх наче крізь збільшувальне скло. У контексті точного землеробства це не просто питання краси картини, а питання того, чи зможе агроном побачити пропущені рядки, ранні прояви стресу або пляму бур'янів, яка завтра може перетворитися на цілий острів проблем. Супутники сімейства Sentinel, зокрема Sentinel-2, працюють у межах 10–20 метрів на піксель для ключових спектральних смуг. Це дає змогу досить добре оцінювати просторову неоднорідність поля: де ґрунт тримає вологу, де рослини відстають, де спостерігаються підозрілі плями. На таких знімках гектар виглядає як шістдесят-дев'яносто пікселів, і цього цілком вистачає, щоб побудувати карти зон керування чи відстежувати загальну вегетацію. Але коли проблема ховається в самих рядках або в клаптику кілька метрів завширшки, розрізнення Sentinel-2 вже починає діяти як широкий пензель: мазки видно, а дрібні рухи пензля – ні. Sentinel-1 як радар додає можливість бачити крізь хмари, але його розрізнення теж не дає змоги говорити про деталі підривня рослини.

Комерційні системи PlanetScope, SkySat і WorldView зменшують цей піксель до одиниць і навіть часток метра. PlanetScope у діапазоні 3–5 метрів відкриває шлях для аналізу структури посівів, пошуку дрібних аномалій чи оцінки інтенсивності росту на локальних ділянках. SkySat та знімки WorldView схожі на роботу з майже фотографічною деталізацією: з'являються окремі міжряддя, дрібні прогалини, хвилясті переходи в густоті рослин, навіть деякі прояви бур'янів стають помітними як текстура на поверхні поля. Така деталізація корисна тоді, коли потрібно втрутитися точково: уявімо собі ділянку, де через шкідника зникли кілька метрів рядка, або пляму, де потрібно змінити норму внесення добрив. Відкриті дані цього не покажуть, а SkySat чи WorldView дозволять розгледіти проблему так, ніби дивилися з дрона.

Ціна за таку оптику вища: великі обсяги даних, складніші алгоритми обробки та фінансові витрати, які можуть бути надмірними для дрібних полів або для задач, де сантиметрова точність не критична. Але саме ця розкішність деталізації дає змогу заощадити в інших

місцях: вчасно помічений локальний стрес іноді рятує набагато більшу площу, ніж коштує саме зображення.

У підсумку вибір між Sentinel і комерційними платформами залежить від того, який рівень “зірковості” потрібен. Якщо завдання полягає у моніторингу великих площ, створенні карт зон продуктивності, аналізі вегетаційних індексів або оцінці тенденцій у масштабі декад і місяців, розрізнення Sentinel-2 буде цілком достатнім. Воно працює як робочий бінокль: не надто детально, але широко і стабільно. Якщо потрібно бачити те, що ховається між рядками, оцінювати дрібні локальні аномалії, виявляти посівні дефекти або швидко реагувати на проблеми в окремих мікроділянках, тоді PlanetScope, SkySat чи WorldView стають уже не розкішшю, а інструментом, без якого не обійтися.

Темпоральне покриття супутникових місій є критичним параметром для забезпечення ефективного моніторингу посівів у системах точного землеробства. Частота оновлення знімків визначає можливість оперативного виявлення стресових станів рослин, своєчасного реагування на несприятливі зміни та коректного відстеження фенологічних фаз. Оскільки динаміка розвитку культур та поширення стресів часто відбувається у часових масштабах від кількох днів до одного тижня, регулярність отримання зображень прямо впливає на якість аналітичних рішень.

Місії Sentinel забезпечують порівняно стабільну й передбачувану частоту повторного знімання. Завдяки наявності двох оптичних платформ Sentinel-2A та Sentinel-2B інтервал між послідовними спостереженнями становить 2–5 днів залежно від широти, тоді як Sentinel-1, що працює в радіодіапазоні, надає додаткове покриття незалежно від погодних умов. Це робить відкриті дані Sentinel придатними для систематичного сезонного моніторингу, аналізу довготривалих трендів, оцінки продуктивності та визначення зональної неоднорідності полів. Основним обмежувальним чинником залишається хмарність, яка може суттєво збільшувати фактичні інтервали між доступними оптичними знімками.

Комерційні супутникові платформи, передусім PlanetScope, пропонують значно вищу темпоральну розрізненість. Завдяки великому угрупованню малих супутників забезпечується щоденне, а в окремих регіонах – навіть багатократне добове покриття. Така частота дає змогу детально відстежувати швидкоплинні процеси, зокрема гострий водний або температурний стрес, зміни після поливу, реакцію рослин на внесення добрив чи засобів захисту, а також фіксувати нетривалі локальні аномалії. Платформи SkySat та WorldView, хоч і мають нижчу природну частоту повторних знімань, надають можливість цільового замовлення високодетальних зображень на конкретні дати, що є важливим для проведення точкових діагностичних чи контрольних операцій.

Порівняння відкритих і комерційних джерел даних показує, що вибір оптимального комплексу спостережень залежить від характеру агротехнологічних завдань. Для стратегічного сезонного моніторингу, формування історичних рядів, зонування полів та оцінки загальних тенденцій розвитку культур частота спостережень Sentinel є достатньою, особливо за умови суміщення оптичних та радарних продуктів. У ситуаціях, коли потрібна висока оперативність, регулярне спостереження з інтервалом в одну добу або необхідність отримання гарантованих знімків у ключові технологічні періоди, перевага однозначно переходить до комерційних платформ, насамперед PlanetScope, а також SkySat чи WorldView у разі потреби у високо-точних точкових даних.

Спектральні характеристики супутникових сенсорів визначають можливість точного кількісного оцінювання стану рослинності, а також формування похідних індексів, що описують рівень фотосинтетичної активності, ступінь стресу, вологість, біомасу та інші ключові параметри. Набір спектральних смуг, їхнє положення у спектрі та ширина пропускання безпосередньо впливають на аналітичну інформативність знімків, а отже, визначають межі застосування конкретного джерела даних у точному землеробстві.

Платформа Sentinel-2 характеризується розширеним спектральним набором із 13 смуг, включно з кількома в області red-edge, ближнього інфрачервоного діапазону та короткохвильового інфрачервоного. Наявність red-edge є критично важливою для виявлення ранніх стадій фізіологічних змін, зумовлених нестачею азоту, водного стресу чи пошкодженням листкового апарата. SWIR-смуги забезпечують можливість оцінювати вологість рослинної біомаси та ґрунту, а також формувати індекси для аналізу органічної речовини. Завдяки цьому Sentinel-2 є високоефективним інструментом для розрахунку широкого спектра індексів, зокрема NDVI, NDRE, EVI, індекси SWIR-чутливості та комбіновані показники, що описують структуру та фізіологічний стан рослинного покриву. Додатково Sentinel-1, який працює в мікрохвильовому діапазоні, забезпечує інформацію про структуру рослинності та вологість поверхні незалежно від хмарності, що робить його цінним доповненням до оптичних даних для комплексного моніторингу.

Комерційні супутникові платформи демонструють більшу різноманітність у спектральному складі. Сенсори WorldView забезпечують високу просторову розрізненість, але їхній спектральний набір зазвичай обмежується чотирма основними смугами: червоною, зеленою, синьою та ближнім інфрачервоним, хоча в окремих конфігураціях також є додаткові канали, зокрема red-edge. SkySat має аналогічний базовий набір, що добре підходить для розрахунку NDVI та загального аналізу зеленості, проте менш придатний

для розробки чутливих індексів, орієнтованих на виявлення специфічних внутрішньолисткових змін. Планетаційні сенсори PlanetScope у стандартних версіях також обмежені кількома каналами, проте модернізовані системи SuperDove і PSMS містять додаткові спектральні смуги, включно з red-edge, що розширює можливості застосування їхніх даних для аналізу фізіологічного стану рослин.

Порівняння спектральних можливостей відкритих і комерційних місій засвідчує, що Sentinel-2 залишається одним із найкращих джерел даних для розрахунку надійних вегетаційних індексів завдяки наявності red-edge і SWIR. Його спектральний набір дає змогу детектувати широкий спектр агрономічних процесів, що робить його практично незамінним для аналітичних завдань середньої просторової деталізації. Комерційні сенсори натомість забезпечують винятково високу просторову точність, але їхній спектральний діапазон часто є менш повним, тому їхнє використання потребує попереднього аналізу доступних каналів.

З огляду на це Sentinel-2 є оптимальним вибором для задач, які потребують надійної оцінки стану рослинності, аналізу стресів, визначення дефіциту хлорофілу, моніторингу водного балансу та побудови комплексних індексів. Комерційні дані доцільно застосовувати для задач з високими просторовими вимогами у випадках, коли достатньо базових індексів на основі RGB та NIR або коли необхідно поєднати високу просторову деталізацію з окремими вузькими спектральними каналами на платформах, що підтримують їх.

Радіометрична якість супутникових даних є фундаментальним чинником для забезпечення достовірності аналітичних результатів у точному землеробстві, особливо коли йдеться про побудову часових рядів, мультисенсорну інтеграцію чи оцінювання довготривалих тенденцій. Сталість показників відбиття, коректність атмосферної компенсації та узгодженість між датами спостереження безпосередньо визначають можливість проводити порівняння знімків у часі та отримувати кількісно коректні оцінки фізіологічного стану рослинності. Будь-які варіації у радіометричній однорідності можуть призвести до викривлення динаміки індексів, зниження точності карт діагностики та хибної інтерпретації змін у розвитку культур.

Дані місій Sentinel характеризуються високим рівнем стандартизації радіометричних характеристик. Sentinel-2 надає продукти рівня L1C та L2A, що містять значення відбиття у верхній частині атмосфери (TOA) та параметри після атмосферної корекції (BOA). Інструмент Sen2Cor забезпечує відтворення та методологічно прозору атмосферну корекцію, що дає змогу отримувати однорідні дані для побудови надійних часових рядів. Крім того, довготривала стабільність калібрування, підтримка єдиних стандартів метаданих та активна робота наукової спільноти

роблять продукти Sentinel одним із найбільш надійних джерел даних для досліджень, що потребують між-датної порівнюваності.

Комерційні супутникові системи також пропонують калібровані радіометричні продукти, однак їхня узгодженість значно більше залежить від специфікацій конкретного оператора. У різних платформ формати метаданих можуть відрізнятися, а історичні зміни у сенсорах чи конфігураціях сузір'їв можуть вводити додаткову варіабельність у часі. Частина постачальників надає продукти як у вигляді ТОА-зображень, так і у формі орторектифікованих та атмосферно коригованих матеріалів, хоча ступінь стандартизації може бути нижчим, ніж у відкритих місії. Певною перевагою комерційних сенсорів є високий рівень сигналу відносно шуму, що часто пов'язаний із їхньою високою просторовою розрізненістю, але ця перевага не компенсує відсутності довготривалої методологічної однорідності у випадках, коли необхідний строгий аналіз тенденцій.

Отже, для задач, що передбачають формування довготривалих часових рядів, порівняння між роками, аналіз трендів або інтеграцію даних різних платформ, оптимальною основою є продукти Sentinel завдяки їхній радіометричній стабільності, прозорій обробці та доступності повного набору метаданих. Комерційні дані можуть застосовуватися як високодетальне доповнення, проте перед використанням необхідно ретельно перевірити рівень продукту (ТОА чи BOA), наявність атмосферної корекції, повноту метаданих та сумісність із програмним забезпеченням і алгоритмами, що застосовуються у конкретній аналітичній системі. Такий підхід дає змогу забезпечити радіометричну узгодженість і мінімізувати ризики виникнення систематичних похибок у процесі моніторингу стану рослинності.

Вартість, ліцензування та комерційні обмеження супутникових даних формують один з ключових параметрів, що визначають можливість та доцільність їх використання у системах дистанційного моніторингу, зокрема аграрного спрямування. Економічний аспект охоплює не лише прямі витрати на придбання супутникових знімків або підписок на відповідні сервіси, а й низку супутніх факторів, пов'язаних зі зберіганням великих обсягів даних, витратами на обчислювальні ресурси, необхідністю періодичного оновлення програмного забезпечення та дотриманням умов поширення та публікації інформації. Саме тому характеристика цінової політики та ліцензійних умов різних провайдерів є фундаментально важливою для формування сталих робочих процесів та довгострокового планування.

У випадку з даними Sentinel, які надаються в межах програми Copernicus, користувач отримує повністю відкритий доступ до просторових продуктів без будь-

яких прямих фінансових витрат. Ліцензія Copernicus забезпечує можливість вільного використання матеріалів з правом їх подальшої обробки, інтеграції у власні аналітичні продукти, а також оприлюднення результатів без обмежень. Така модель значною мірою знижує бар'єр входу для малих та середніх підприємств, фермерських господарств та науково-дослідних установ, що дає змогу формувати довготривалі часові ряди, створювати методики масового моніторингу та здійснювати відкриті порівняльні дослідження.

На відміну від цього комерційні супутникові сервіси базуються на моделі платного доступу. Вартість формується залежно від багатьох параметрів, зокрема просторового розрізнення, площі покриття, частоти знімання, географічного регіону та терміновості доставки. Провайдери, такі як Planet, пропонують підписні моделі з фіксованою або змінною оплатою, тоді як оператори високорозрізнених сенсорів, зокрема WorldView або SkySat, можуть працювати за принципом разових замовлень або спеціальних контрактів. Крім того, окремі продукти супроводжуються ліцензійними обмеженнями, що стосуються публікації початкових матеріалів, поширення похідних даних або їх перепродажу, що особливо важливо для дослідників та комерційних аналітичних компаній.

Попри високі витрати, комерційні дані можуть бути економічно обґрунтованими у випадках, коли операційний ефект від їхнього використання перевищує вартість придбання. Це стосується культур з високою економічною цінністю, сценаріїв, що потребують дуже високого просторового розрізнення, а також ситуацій, де критично важливо отримати оперативні знімки у стислі часові вікна. У таких випадках часто формуються гібридні підходи, що поєднують базові безкоштовні дані Sentinel із точковим придбанням комерційних матеріалів для критичних фаз розвитку рослин або для уточнення картографічних продуктів.

Доступність супутникових даних, їхні формати та сумісність із сучасними робочими процесами обробки відіграють визначальну роль у формуванні ефективних аналітичних систем у сфері дистанційного зондування та точного землеробства. Функціональні можливості різних платформ суттєво різняться, тому оцінювання інтерфейсів доступу, автоматизації, підтримуваних стандартів та інструментів обробки є важливим елементом вибору джерела даних.

У випадку Sentinel доступ забезпечується через офіційні хаби та відкриті API, включно з Copernicus Open Access Hub та численними хмарними дзеркалами, серед яких найпоширенішими є AWS S3. Усі продукти створено у стандартизованих форматах, що повністю інтегруються з відомими геоінформаційними системами та платформами аналізу, такими як SNAP, QGIS, ArcGIS, Google Earth Engine та інші відкриті програмні рішення. Наявність великої кількості відкритих

бібліотек, прикладних скриптів та методичних матеріалів формує розвинену екосистему, що спрощує впровадження автоматизованих конвеєрів обробки великих масивів даних. Відкрита інфраструктура доступу та прозорість форматів дають змогу без перешкод масштабувати обчислення, поєднувати дані з різних джерел і будувати серійні часові ряди.

Комерційні супутникові сервіси своєю чергою також надають доступ через API та вебінтерфейси, часто у поєднанні з готовими аналітичними продуктами, такими як індексні карти, карти аномалій або базові класифікації рослинного покриву. Платформи Planet, Maxar та інші забезпечують високий рівень інтеграції з корпоративними робочими середовищами, проте формати вихідних даних, правила доступу та інтерфейси можуть бути частково закритими і потребувати чинної ліцензії або підписки. Перевагою таких сервісів є мінімізація потреби в спеціалізованій геоінформаційній експертизі: користувач може отримувати вже попередньо оброблені продукти, придатні для швидкого ухвалення рішень. Однак така модель часто призводить до прив'язки до конкретного постачальника і ускладнює перенесення робочого процесу в інші аналітичні середовища.

З практичного погляду вибір між відкритими та комерційними джерелами потрібно робити з урахуванням обсягу автоматизації, який необхідно реалізувати. Якщо проєкт передбачає масштабний, багатоетапний конвеєр аналізу та роботу з великими часовими рядами, відкриті дані Sentinel у поєднанні з хмарними обчислювальними платформами, зокрема Google Earth Engine або власними середовищами у хмарній інфраструктурі, є найбільш оптимальним рішенням. Такий підхід забезпечує високу відтворюваність досліджень і мінімальні додаткові витрати.

У ситуаціях, коли ключовим є отримання оперативної інформації або коли користувач не має ресурсів для виконання повного циклу передобробки, комерційні платформи забезпечують ефективніші робочі процеси завдяки доступності готових продуктів та спрощеному інтерфейсу. На практиці це дає змогу швидко реагувати на зміни стану рослинності, погодні інциденти та інші агрономічно значущі події без необхідності залучати складні інструменти обробки.

У підсумку питання доступності, формату даних та інструментів обробки визначає не лише технічні параметри робочого процесу, а й економічну та організаційну модель проєкту. Відкриті платформи Sentinel забезпечують максимальну гнучкість, масштабованість і прозорість, тоді як комерційні сервіси оптимізують швидкість та зручність використання, проте супроводжуються ліцензійними обмеженнями та тіснішою прив'язкою до постачальника.

## Висновки

Проведений порівняльний аналіз супутникових даних Sentinel та високорозрізнених комерційних платформ дає змогу чітко окреслити їхні функціональні ніші у точному землеробстві та геоаналітичних застосуваннях. Дані Sentinel, зокрема Sentinel-2 та Sentinel-1, характеризуються збалансованим поєднанням достатньої просторової розрізненості, високої спектральної інформативності, сталої радіометричної узгодженості, регулярного темпорального покриття та повної відкритості ліцензування. Завдяки цьому вони є оптимальною основою для побудови довготривалих часових рядів, зонального моніторингу рослинності, аналізу біофізичних параметрів та впровадження масштабних аналітичних систем, що працюють в автоматизованому режимі.

Комерційні супутникові констеляції демонструють іншу траєкторію переваг: надвисока просторова розрізненість, можливість таргетованої зйомки, висока частота доступних сцен і наявність готових аналітичних продуктів. Такі характеристики забезпечують високу придатність для задач, де критичними є точкове виявлення локальних стресів, аналіз міжрядної структури посівів, моніторинг дрібних об'єктів та оперативне прийняття рішень. Водночас вартість даних, особливості ліцензування та залежність від постачальника обмежують їх використання у широко-масштабних або бюджетно чутливих проєктах.

У спектральному аналізі Sentinel-2 зберігає значну перевагу завдяки наявності ред-едж та SWIR-смуг, що забезпечують точну діагностику стану рослинності та моніторинг літологічних і водних характеристик. Комерційні сенсори забезпечують високоточні індекси базового рівня, проте варіативність смугового складу потребує попередньої оцінки відповідності поставленим задачам.

У контексті робочих процесів Sentinel формує відкриту та масштабовану екосистему, сумісну з численними інструментами обробки, тоді як комерційні рішення зосереджені на зручності та готових продуктах, хоча й супроводжуються частковою закритістю форматів і залежністю від сервісної інфраструктури.

Сукупність установлених характеристик демонструє доцільність гібридної стратегії застосування. Sentinel може слугувати базовим джерелом даних для систематичного моніторингу та багаторічного аналізу, тоді як комерційні дані доцільно використовувати вибірково – у періоди підвищеного ризику, для деталізації локальних аномалій або у випадках, коли економічний ефект від додаткової точності перевищує витрати.

## Список літератури

Amankulova, K., et al. (2023). Comparison of PlanetScope, Sentinel-2, and Landsat 8 for soybean yield estimation. (Article). ScienceDirect. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17432>



- Baldin, C. M., et al. (2025). Comparison of PlanetScope and Sentinel-2 spectral bands: calibration and interoperability. *Geosciences*, 15(5), 184. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences15050184>
- ESA (European Space Agency). (2015). Sentinel-2 User Handbook (MSI). URL: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- ESA Earth Online. (n.d.). WorldView-3 – mission description and capabilities. URL: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-3>
- Maxar Technologies. WorldView-3 Satellite Datasheet / Technical Description. URL: [https://www.spaceimagingme.com/downloads/sensors/datasheets/DG\\_WorldView3\\_DS\\_2014.pdf](https://www.spaceimagingme.com/downloads/sensors/datasheets/DG_WorldView3_DS_2014.pdf)
- Moletto-Lobos, I., et al. (2024). Evaluating PlanetScope and UAV multispectral data for winter wheat monitoring. *Remote Sensing*, 16(23), 4474. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234474>
- NASA Earthdata. (n.d.). Sentinel-2 MSI Resources. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi/resources>
- Planet Labs Inc. (documentation). PlanetScope Imagery – Technical Specifications / Planet Documentation. URL: <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope>
- Planet Labs Inc. (Product spec). SkySat Ortho Scene Product Specification (PDF). URL: <https://assets.planet.com/marketing/PDF/SkySat-Ortho-Scene-Product-Spec-Sheet.pdf>
- Segarra, J., Ferwerda, J., Gitelson, A., & Moreno, J. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 applications and perspectives. *Agronomy*, 10(5), 641. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Zhang, C., et al. (2020). High-resolution satellite imagery applications in crop monitoring and phenotyping: a review. *Agricultural Systems* (review). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105584>
- USGS / Shrestha, M. (2021). System Characterization Report on Planet's Dove-R / WorldView-3 (USGS Open-File Reports; технічні звіти за калібруванням сенсоров). URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2021/1030/>

B. CHETVERIKOV, I. ZAIATS, Ye. SHYLO, Yu. PETRYK

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, Phone: +380631671585, E-mail: borys.v.chetverikov@lpnu.ua

## COMPARISON OF THE USE OF COMMERCIAL AND OPEN SATELLITE DATA FOR PRECISION AGRICULTURE

**Purpose.** The study focuses on a comparative assessment of the capabilities of open satellite data from the Sentinel missions and high-resolution commercial systems Planet, SkySat, and WorldView in addressing key tasks of precision agriculture. The main objective is to determine the differences in spatial, spectral, radiometric, and temporal informativeness between these types of satellite data, as well as to evaluate the economic feasibility of their use in agricultural production. Special attention is given to practical monitoring scenarios where revisit frequency, level of detail, analytical quality, and integration into digital agro-systems are critically important. **Methods.** The research applies methods of Earth observation, multispectral analysis, radar interpretation, and geoinformation modelling. The comparison is based on official Sentinel-1 and Sentinel-2 products and commercial imagery from PlanetScope, SkySat, and WorldView. The evaluation was carried out across several groups of criteria: spatial and temporal resolution, spectral composition, radiometric stability, data accessibility, cost, and processing workflow specifics. Data analysis was conducted using SNAP, QGIS, Google Earth Engine, and API tools of commercial providers. **Results.** The obtained results demonstrate a substantial difference between open and commercial satellite systems in the context of agricultural applications. Sentinel-2, due to its red-edge and SWIR bands, provides high-quality spectral information essential for vegetation condition assessment, stress detection, and long-term time-series analysis. Sentinel-1 complements optical data with its capability for all-weather monitoring independent of cloud cover. Meanwhile, commercial systems offer significant advantages in spatial resolution and revisit frequency, allowing detection of small-scale anomalies, identification of minor damage hotspots, analysis of crop structure, and timely monitoring during critical periods. Economic assessments indicate that commercial imagery is most cost-effective for high-value crops, intervention-based decision making, or localized tasks requiring enhanced precision, while Sentinel data are optimal for baseline, regular, and large-scale monitoring. A hybrid use strategy is proposed, combining free Sentinel time series with selected high-resolution commercial acquisitions to refine risk areas. **Practical significance.** The results have substantial applied value for agricultural enterprises, consultants, agronomists, and companies working in the field of precision agriculture. The developed recommendations for selecting satellite data sources enable rational planning of expenditures, optimization of agronomic operations, improved accuracy of zoning maps, timely identification of problem areas, and reduction of economic risks. Integration of different types of satellite data forms a foundation for more adaptive and productive agro-analytical systems, contributing to increased production efficiency, reduced yield losses, and improved resilience to climate-related challenges.

*Keywords:* precision agriculture, Sentinel-1, Sentinel-2, PlanetScope, SkySat, WorldView, spectral indices, satellite monitoring, Earth observation, agro-analytics.

### References

- Amankulova, K., et al. (2023). Comparison of PlanetScope, Sentinel-2, and Landsat 8 for soybean yield estimation. (Article). ScienceDirect. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17432>
- Baldin, C. M., et al. (2025). Comparison of PlanetScope and Sentinel-2 spectral bands: calibration and interoperability. Geosciences, 15(5), 184. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences15050184>
- ESA (European Space Agency). (2015). Sentinel-2 User Handbook (MSI). Retrieved from [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- ESA Earth Online. (n.d.). WorldView-3 – mission description and capabilities. Retrieved from <https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-3>
- Maxar Technologies. WorldView-3 Satellite Datasheet / Technical Description. Retrieved from [https://www.spaceimagingme.com/downloads/sensors/datasheets/DG\\_WorldView3\\_DS\\_2014.pdf](https://www.spaceimagingme.com/downloads/sensors/datasheets/DG_WorldView3_DS_2014.pdf)
- Moletto-Lobos, I., et al. (2024). Evaluating PlanetScope and UAV multispectral data for winter wheat monitoring. Remote Sensing, 16(23), 4474. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234474>
- NASA Earthdata. (n.d.). Sentinel-2 MSI Resources. Retrieved from <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi/resources>
- Planet Labs Inc. (documentation). PlanetScope Imagery – Technical Specifications / Planet Documentation. Retrieved from <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope>
- Planet Labs Inc. (Product spec). SkySat Ortho Scene Product Specification (PDF). Retrieved from <https://assets.planet.com/marketing/PDF/SkySat-Ortho-Scene-Product-Spec-Sheet.pdf>
- Segarra, J., Ferwerda, J., Gitelson, A., & Moreno, J. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 applications and perspectives. Agronomy, 10(5), 641. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Zhang, C., et al. (2020). High-resolution satellite imagery applications in crop monitoring and phenotyping: a review. Agricultural Systems (review). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105584>
- USGS / Shrestha, M. (2021). System Characterization Report on Planet's Dove-R / WorldView-3 (USGS Open-File Reports; tekhnichni zvity za kalibruvanniam sensoriv). Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/2021/1030/>