



KAPITEL 10 / CHAPTER 10¹⁰
**UTILIZING SPACE IMAGERY FOR INVESTIGATING CROP
VEGETATION STATUS IN PRECISION AGRICULTURE THROUGH THE
GOOGLE EARTH ENGINE CLOUD PLATFORM**

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-27-00-025

Вступ

Високоточне землеробство представляє сучасну стратегію управління сільськогосподарськими угіддями, яка ґрунтується на використанні високоточних технологій для оптимізації всіх аспектів виробництва. Це поняття об'єднує комплекс інноваційних методів.

Ключові аспекти високоточного землеробства включають в себе використання точних геопросторових даних для керування сільськогосподарськими процесами. Це охоплює точне розташування машин та обладнання, оптимізацію розсаджування та внесення ресурсів, а також точне визначення стану ґрунту та рослин [1,2].

Високоточне землеробство використовує передові технології, щоб забезпечити ефективне використання ресурсів, зменшити негативний вплив на довкілля та підвищити врожайність. Це дозволяє сільськогосподарським підприємствам досягати високого рівня точності та керованості в усіх аспектах виробництва, що важливо для досягнення сталого та прибуткового сільського господарства [3,4].

Аналіз поточних технологічних та методологічних рішень у галузі точного землеробства свідчить про значний прогрес у використанні новітніх інструментів для оптимізації сільськогосподарських процесів. Технології, такі як глобальна позиційна система (GPS), дистанційне зондування Землі та автоматизовані машини, революціонізують сучасне сільське господарство [5,6].

Використання GPS у точному землеробстві дозволяє сільським виробникам забезпечити точність розташування машин та обладнання на полі. Це сприяє ефективному внесенню ресурсів, таких як добрива та рідкісні речовини, що

¹⁰Authors: Chetverikov Borys, Babiy Lyubov, Zayats Iryna



сприяє оптимізації витрат і зниженню негативного впливу на довкілля.

Дистанційне зондування Землі, використовуючи супутникові та авіаційні технології, забезпечує отримання великої кількості даних щодо стану ґрунту та рослин, здебільшого за допомогою геоінформаційних систем і технологій (ГІС-технологій). Це дозволяє аналізувати різноманітні параметри, включаючи вологість, плідючість та розміщення хвороб, щоб усунути або запобігти проблемам у вирощуванні культур.

Автоматизовані машини та роботи в сільському господарстві використовують передові технології для виконання рутинних завдань, таких як полив, збирання врожаю та обробка землі. Це підвищує ефективність виробництва, зменшує витрати на працю та покращує загальну продуктивність господарства (рисунок 1).

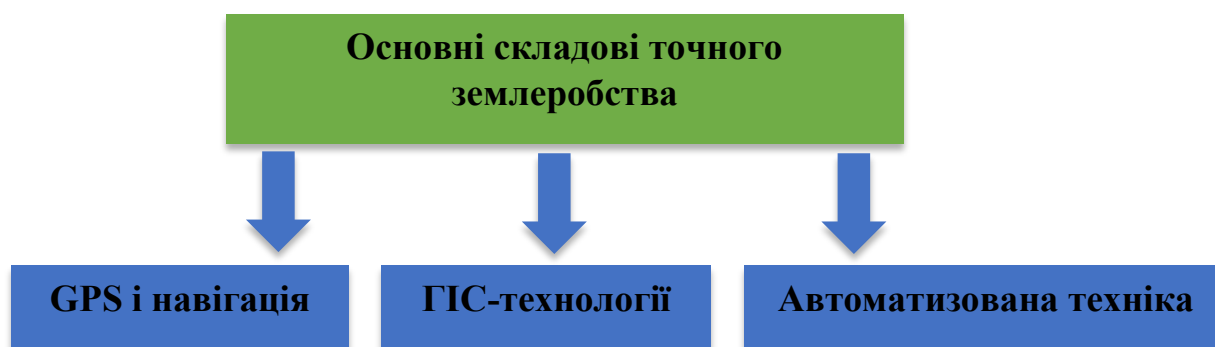


Рисунок 1. Основні складові елементи точного землеробства

Загалом, аналіз поточних технологічних та методологічних рішень в галузі точного землеробства свідчить про перехід до інтелектуалізованого та ефективного сільськогосподарського виробництва.

Використання космічних знімків у поєднанні з хмарною платформою Google Earth Engine дозволяє отримати дані високої розрізненості, що сприяє точному визначенню пошкоджених культур у високоточному землеробстві. Використання хмарної платформи дозволяє здійснювати швидку та ефективну обробку великого обсягу космічних знімків, що є критичним у високоточному землеробстві для оперативного реагування на пошкодження культур [7].

Google Earth Engine - це обчислювальна платформа великого масштабу, розроблена Google для обробки та аналізу великих обсягів геопросторових



даних. Ця платформа спеціально створена для наукових досліджень, візуалізації та моніторингу змін на Землі. Google Earth Engine містить велику кількість геопросторових даних, таких як знімки з космічних супутників, кліматичні дані та інші географічні інформаційні ресурси. Платформа надає обчислювальні ресурси для проведення аналізу геоданих безпосередньо в хмарі, що дозволяє вченим і дослідникам використовувати потужність обчислювальних ресурсів для розв'язання глобальних задач. Google Earth Engine надає інструменти для аналізу та візуалізації змін на Землі на основі історії геоданих. Платформа активно використовується для наукових досліджень у різних галузях, таких як екологія, кліматологія, лісове господарство та інші. Багато з ресурсів Google Earth Engine доступні за принципом відкритого доступу для дослідників та розробників. На рисунку 2 подана спрощена схема архітектури Google Earth Engine.



Рисунок 2. Спрощена схема архітектури Google Earth Engine

Використання платформи Google Earth Engine надає користувачам гнучкість та легкий доступ до інструментів аналізу космічних знімків, роблячи їх доступними для широкого кола виробників та дослідників у галузі землеробства.



Застосування космічних знімків через хмарну платформу інтегрується з геоінформаційними системами, дозволяючи ефективно використовувати отримані дані для аналізу та прийняття управлінських рішень в галузі землеробства.

Використання космічних знімків та хмарної платформи у високоточному землеробстві сприяє сталому виробництву шляхом вчасного виявлення пошкоджень, моніторингом актуального вегетаційного стану та ефективного управління земельними ресурсами.

В різний час тематикою використання космічних знімків для потреб точного землеробства найбільше займалися такі вчені як: Norman J. Mueller (відомий своєю роботою у сфері використання космічних знімків та супутникової технології для моніторингу посівів та покращення точності землеробських операцій)[8], Karen L. Joysе (досліджує застосування космічних знімків у високоточному землеробстві для визначення стану рослинності та оптимізації вирощування культур)[9], Pierre Defourny (експерт у галузі використання космічних знімків та геоінформаційних систем для моніторингу посівів та стану ґрунту)[10], Jan Dempewolf (досліджує можливості використання сучасних космічних технологій для точного землеробства та забезпечення стійкого виробництва)[11], Majid Habibi-Nokhandan (спеціалізується на розвитку нових методів обробки та аналізу космічних знімків для забезпечення точності в землеробстві), Hassan Saleheh (вивчає можливості застосування сучасних геоінформаційних технологій та космічних знімків для оптимізації сільськогосподарських процесів).

Оскільки, для території України дані технології є новими, то ми не можемо відмітити якихось певних особистостей, які внесли значний внесок у розвиток використання космічних знімків у точному землеробстві. Необхідно відмітити інституції, які активно займаються розглядом цих питань, а саме Інститут космічних досліджень Національної академії наук України, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" і Інтенсивно почав займатися цією тематикою Інститут геодезії



Національного університету "Львівська політехніка", який має широку базу застосування даних ДЗЗ в інших прикладних дослідженнях.

10.1. Роль космічних знімків у точному землеробстві

Сучасні космічні знімки розкривають величезний потенціал для наукових досліджень та моніторингу сільськогосподарських посівів і культур. Висока просторова розрізненість та широкий спектр інформації, які надають ці знімки, відкривають нові можливості для аналізу та вдосконалення методів сільського господарства.

Безперервна зміна спектральної інформації дозволяє вивчати фізіологічний стан рослин та виявляти зміни в їхньому здоров'ї. Це полегшує визначення площі, покритої рослинами, та виявлення будь-яких ознак стресу чи захворювань.

Часовий аспект дозволяє відстежувати динаміку змін у посівах протягом сезону. Виявлення змін у вегетаційному покриві на ранніх етапах допомагає вчасно реагувати на можливі проблеми і приймати необхідні рішення. Зміни у вегетаційному покриві, що можна виявляти на ранніх етапах, допомагаючи вчасно реагувати на можливі проблеми.

Геопросторова інформація, отримана з космічних знімків, сприяє точному визначенню розташування посівів, що важливо для планування та виконання сільськогосподарських операцій.

Комбінація цих можливостей дозволяє ефективно використовувати космічні знімки для оптимізації агрономічних практик, покращення урожайності та забезпечення сталого розвитку сільського господарства.

Космічні знімки відкривають можливість отримання великої кількості інформації про земельні ресурси, забезпечуючи унікальний та повний огляд земельного покриву. Космічні супутники охоплюють великі території, надаючи можливість отримання даних про різні регіони світу. Знімки з космосу можуть



бути отримані в різних спектральних діапазонах, дозволяючи аналізувати різні аспекти землі, такі як рослинний покрив, вологість, та інші характеристики. Супутники регулярно облітають Землю, що дозволяє отримувати дані на різних етапах росту рослин та в різний час року. Знімки можуть мати високу просторову розрізненість, що дозволяє виявляти навіть дрібні зміни на поверхні Землі. Інструменти обробки даних дозволяють проводити різнобічний аналіз, включаючи виявлення хвороб, оцінку врожаю та визначення впливу кліматичних умов. Дані з космічних знімків можна інтегрувати з іншими геопросторовими даними, що розширює можливості їхнього використання. Користуючись космічними знімками, дослідники, сільськогосподарські експерти та різні галузі можуть отримати комплексну і детальну інформацію про земельні ресурси, сприяючи удосконаленню прийняття рішень у сфері точного землеробства.

Космічні знімки надають різноманітні типи даних, що дозволяє отримати розширений аналіз різних характеристик земельного покриву. Знімки в видимому діапазоні дозволяють визначати колір рослин, їх стан та розвиток (рисунок3).



Рисунок 3 - Приклад космічного знімка сільськогосподарських угідь у видимому діапазоні

Інфрачервоні дані можуть вказувати на здоров'я рослин, рівень вологості та інші параметри (рисунок4).

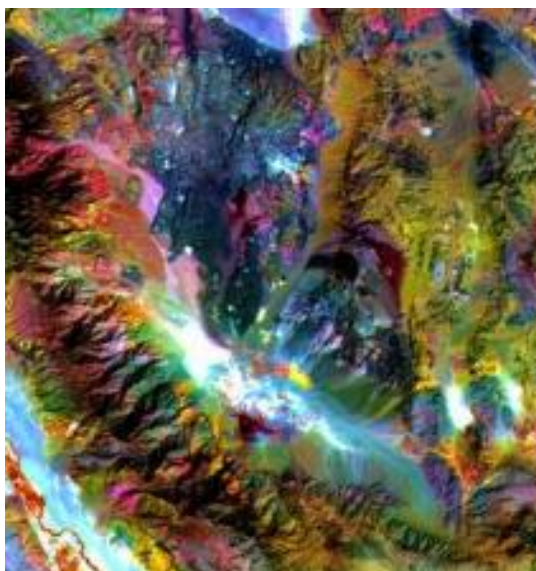


Рисунок 4 - Приклад зображення Соляної Долини (США), композиція каналів ближнього інфрачервоного діапазону

Теплові знімки реєструють теплове випромінювання, дозволяючи визначати температурні характеристики поверхні, що корисно для визначення теплового стану ґрунту та рослин (рисунок5).

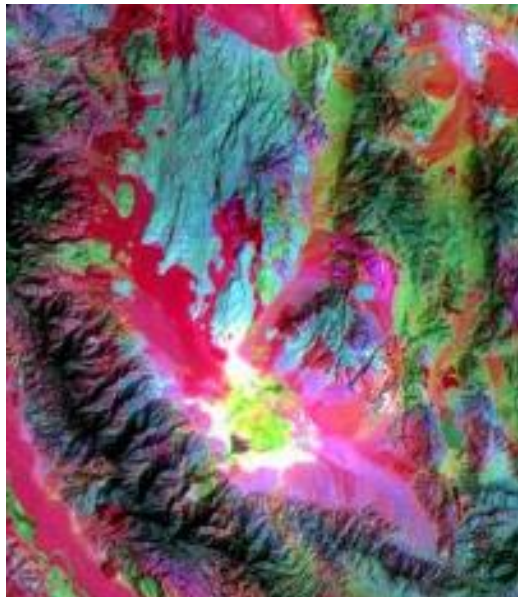


Рисунок 5 - Приклад зображення Соляної Долини (США), композиція теплових каналів

Знімки рельєфу дозволяють отримувати інформацію про форму та висоту поверхні, що важливо для вивчення ландшафту та розташування об'єктів (рисунок 6).

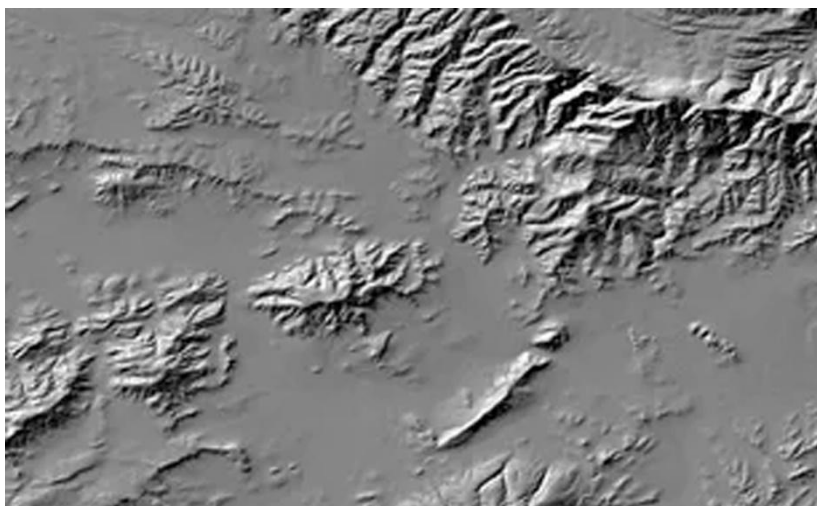


Рисунок 6 - Приклад космічного знімка рельєфу

Ці типи даних в сукупності надають можливість вивчення та аналізу різних аспектів земельного покриття, що важливо для точного землеробства та управління природними ресурсами.

Космічні знімки грають ключову роль у визначенні стану та розвитку сільськогосподарських посівів, дозволяючи отримувати важливу інформацію безпосередньо з космосу. Візуальне спостереження за кольором та текстурою полів дозволяє визначити стан рослин, їхній колір, ріст та можливі ознаки захворювань чи стресу. Аналіз спектральних характеристик дозволяє виявляти зони ризику, де можливі проблеми зі здоров'ям рослин, недостатньою кількістю вологи чи іншими факторами. Визначення областей, які потребують більше чи менше води, добрив та інших ресурсів, що сприяє раціональному використанню і підвищенню ефективності. Визначення площі та потенційного врожаю за допомогою аналізу площі під посівами та їхньої структури. Знімки, отримані протягом сезону, дозволяють вивчати динаміку росту та розвитку посівів, а також вчасно виявляти будь-які зміни. Можливість виявлення проблем, таких як хвороби чи шкідники, на ранніх етапах розвитку, дозволяють приймати швидкі та ефективні заходи. Комплексний аналіз космічних знімків грає важливу роль у сільському господарстві, допомагаючи фермерам та агрономам ефективно управляти своїми посівами та підвищувати врожайність.

Глобальний доступ до космічних знімків створює можливості для обміну



знаннями та впровадження кращих практик в сільському господарстві по всьому світу. Глобальний доступ до космічних знімків дозволяє фермерам та дослідникам отримувати інформацію про кліматичні зміни та їхні впливи на сільське господарство. Це може бути корисно для адаптації до змін у погодних умовах та визначення оптимальних стратегій вирощування. Спільний доступ до космічних знімків дозволяє фермерам та дослідникам ділитися досвідом та кращими практиками вирощування різних видів культур. Це може сприяти підвищенню врожайності та зменшенню ризиків. Глобальний моніторинг ресурсів, таких як вода та добрива, за допомогою космічних знімків дозволяє ефективно планувати використання ресурсів. Фермери можуть вчитися від інших господарств по всьому світу щодо оптимального використання обмежених ресурсів. Сільські господарства у різних регіонах можуть використовувати космічні знімки для виявлення загроз, таких як шкідники, хвороби чи погодні катастрофи. Обмін інформацією дозволяє розробляти спільні стратегії боротьби з цими проблемами. Глобальний доступ до космічних знімків сприяє створенню глобальних мереж та платформ для обміну знаннями. Фермери, дослідники та експерти можуть співпрацювати для вирішення загальних викликів та розвитку новаторських рішень. Обмін знаннями та кращими практиками сприяє стійкому розвитку сільського господарства. Розвиток та впровадження нових технологій може стати глобальним явищем, що сприяє зростанню продуктивності та зниженню екологічного впливу. Глобальний доступ до космічних знімків є важливим інструментом для створення єдиної глобальної сільськогосподарської спільноти, яка може ефективно реагувати на виклики та вдосконалювати практики для досягнення сталого розвитку.

Розглянемо основні типи космічних супутникових знімків та їхні характеристики:

1. Оптичні знімки:

- здатність до реєстрації видимого та інфрачервоного випромінювання;
- висока просторова розрізненість, що дозволяє детально вивчати земну поверхню;



➤ використовуються для визначення рослинного покриву, типів ґрунтів та рельєфу.

2. Радіолокаційні (SAR) знімки:

➤ незалежні від світлових умов, працюють навіть вночі та при хмарному покриві;

➤ здатність проникати через туман, сніг та інші перешкоди;

➤ використовуються для картографування рельєфу та визначення вологості ґрунту.

3. Гіперспектральні знімки:

➤ реєстрація багатьох вузьких спектральних діапазонів;

➤ дозволяють аналізувати хімічний склад рослин та визначати їхній стан.

➤ використовуються для виявлення хвороб, стресу рослин та інших аспектів фізіології.

4. Теплові знімки:

➤ вимірюють теплове випромінювання земної поверхні;

➤ використовуються для аналізу температурних режимів рослин та ґрунту;

➤ дозволяють визначити ефективність поливу та інші аспекти теплового балансу.

5. Мультиспектральні знімки:

➤ реєстрація обмеженого числа спектральних діапазонів;

➤ використовуються для картографування вегетаційного покриву, визначення водойм та інших особливостей земної поверхні.

6. Комбіновані знімки:

➤ використовують комбінації різних типів знімків для отримання комплексної інформації;

➤ дозволяють проводити детальний аналіз різних аспектів земної поверхні;

➤ забезпечують більш широкий спектр даних для досліджень та моніторингу.



10.2. Технічні аспекти опрацювання космічних знімків

Технічні аспекти опрацювання космічних знімків включають ряд ключових етапів: передпроцесинг та корекція даних, сегментація та класифікація, екстракція атрибутів та спектральний аналіз, використання методів машинного навчання, інтеграція з ГІС та іншими інструментами, масштабування та обробка великих об'ємів даних, валідація та перевірка точності, автоматизація та розвиток технологій [12,13].

Передпроцесинг та корекція даних у космічних знімках є важливими етапами для забезпечення якості та точності подальшого аналізу. Ці кроки включають в себе ряд технічних процедур для виправлення артефактів та підготовки даних для подальшого використання. Початкові космічні знімки можуть містити шуми та артефакти, такі як випадкові світлові плями чи спотворення. Розпізнавання та видалення цих шумів є ключовим етапом передпроцесингу. Атмосферні умови можуть впливати на космічні знімки, особливо в областях з високою вологістю чи пилом. Корекція атмосферних впливів допомагає виправити ці ефекти та забезпечити більш точні результати. Геометрична корекція включає в себе виправлення геометричних неточностей, таких як спотворення форми та розташування об'єктів на знімках. Це важливо для правильної інтерпретації просторових відношень на зображеннях. Космічні знімки мають різні спектральні канали, які можуть потребувати калібрування для забезпечення правильного відображення спектральних властивостей об'єктів на Землі. Великі області можуть містити геометричні викривлення на знімках. Ректифікація допомагає виправити ці викривлення та забезпечити геометричну точність [14-16].

Нормалізація спектральних характеристик допомагає забезпечити консистентність даних між різними знімками. Виправлення забарвлення може бути важливим для правильного відтворення кольорів та особливостей об'єктів. Зміна азимутального та зенітного кутів може впливати на колірні характеристики зображень. Видалення цих ефектів допомагає покращити якість



та однорідність даних. Після виконання всіх необхідних корекцій, дані готові для подальшого аналізу, включаючи класифікацію об'єктів, виявлення змін, та використання у геоінформаційних системах (ГІС).

Загальною метою передпроцесингу та корекції даних є забезпечення точності, консистентності та якості космічних знімків, щоб забезпечити надійність отриманих результатів при подальшому використанні в різних доменах, включаючи агрокультуру, екологію та інші [17].

Сегментація та класифікація є ключовими етапами обробки космічних знімків, оскільки вони дозволяють виділити області інтересу та визначити приналежність об'єктів до певних категорій чи класів (рисунок 7). Сегментація дозволяє розділити зображення на окремі області, які можуть представляти різні об'єкти або структури на землі. Процес сегментації допомагає визначити контури об'єктів, що полегшує їхнє подальше визначення та аналіз.

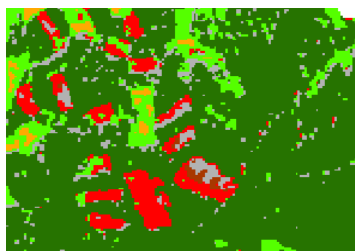


Рисунок 7. Фрагмент класифікованого зображення на основі космічного знімка

Класифікація визначає, яким класам або категоріям належать виявлені об'єкти чи області. Космічні знімки мають спектральні канали, що дозволяє використовувати інформацію про спектральні властивості для класифікації. Сегментація та класифікація можуть допомагати визначати різні типи рослинності та лісовий покрив, що є важливим для агропромислового та екологічного моніторингу. Отримані результати сегментації та класифікації можуть бути інтегровані в геоінформаційні системи для подальшого аналізу та використання. Сегментація та класифікація забезпечують більш детальний розгляд областей інтересу на космічних знімках та роблять дані готовими для подальших геоінформаційних аналізів та прийняття рішень [18].

Екстракція геометричних атрибутів, таких як площа, периметр та форма,



дозволяє отримати інформацію про форму та розміри об'єктів на знімках. Визначення текстурних атрибутів, таких як ентропія чи контраст, допомагає характеризувати структуру поверхні. Аналіз спектральних кривих дозволяє ідентифікувати специфічні характеристики об'єктів та розрізнити їх на знімках. Використання індексу NDVI дозволяє визначати рослинний покрив та його здоров'я (рисунок 8), використання індексу спекання SWI дозволяє визначати вологість ґрунту на знімках, а також використання різних інших індексів дозволяє визначати конкретні характеристики об'єктів (наприклад, NDWI для водойм).

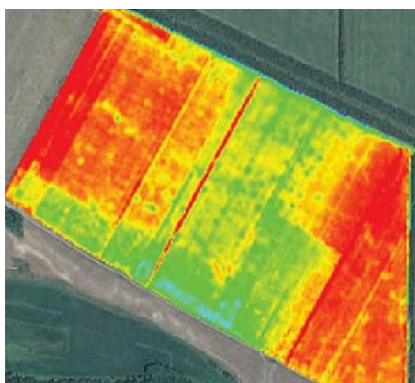


Рисунок 8. Приклад використання індексу NDVI для сільськогосподарських угідь (джерело: <https://www.agroone.info/publication/indeksi-rozvitku-roslin>)

Методи машинного навчання виявляються дуже ефективними у сфері обробки космічних знімків, надаючи можливість автоматизованого визначення об'єктів та характеристик на знімках без великої кількості ручної роботи. Ось деякі аспекти використання методів машинного навчання: стандартизація та нормалізація (підготовка спектральних даних для машинного навчання шляхом стандартизації та нормалізації значень); створення даних для навчання (розробка набору даних для тренування моделі, визначення областей інтересу та призначення класів); вибір алгоритму (визначення підходящого алгоритму машинного навчання (наприклад, випадковий ліс, нейронні мережі, метод опорних векторів)); навчання моделі (використання тренувальних даних для навчання моделі та визначення параметрів); класифікація землекористувань



(визначення класів земельного використання на основі спектральних характеристик); об'єктне детектування (використання машинного навчання для автоматизованого виявлення та локалізації об'єктів на знімках); оптимізація параметрів (встановлення оптимальних параметрів моделі для покращення точності); валідація (використання тестових даних для валідації та перевірки точності класифікації); картографування класів (створення карт, які відображають класифіковані області та їхні характеристики); автоматизований моніторинг (використання машинного навчання для постійного моніторингу змін на знімках та автоматичного виявлення нових об'єктів); інтеграція з програмним забезпеченням ГІС (передача результатів класифікації до геоінформаційних систем для подальшого аналізу та використання) [19,20].

Методи машинного навчання прискорюють та полегшують аналіз космічних знімків, використовуючи автоматизовані алгоритми для класифікації та розпізнавання об'єктів.

Інтеграція опрацьованих космічних знімків з ГІС та іншими інструментами забезпечує ефективне використання отриманої інформації для розширення можливостей аналізу та прийняття рішень у різних галузях. Ця інтеграція дозволяє забезпечити зовнішню інформацію контекстом та сприяє більш повному розумінню геопросторових даних.

Оскільки космічні знімки можуть охоплювати великі території, важливо мати технічні рішення для масштабування та обробки великих об'ємів даних. Використання технологій обчислення в хмарі та оптимізованих алгоритмів є ключовими аспектами цього етапу.

Крок валідації є обов'язковим для перевірки точності отриманих результатів. Використання контрольних точок та порівняння з іншими джерелами інформації дозволяє підтвердити достовірність отриманих висновків.

З розвитком технологій з'являються нові можливості для автоматизації процесів обробки космічних знімків. Використання штучного інтелекту та автоматизованих систем дозволяє ефективно використовувати цільові дані для різноманітних задач.



Вивчення методів обробки та аналізу космічних знімків для отримання точної інформації про стан посівів та визначення пошкоджень включає: використання алгоритмів класифікації для визначення типів вегетації на основі спектральних характеристик рослин; обчислення індексів, таких як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), для оцінки фізіологічного стану рослин та виявлення стресу чи захворювань; об'єднання даних з різних спектральних каналів для створення багатоканальних зображень для більш точного аналізу; використання обробки зображень для визначення розмірів та щільності рослинних посівів; аналіз космічних знімків для визначення просторового розташування різних об'єктів на земній поверхні; розробка алгоритмів для виявлення ознак пошкоджень, хвороб та стресу рослин; аналіз серій знімків для відстеження динаміки змін у структурі посівів протягом ростового сезону; дослідження гіперспектральних знімків для отримання детальної інформації про хімічний склад рослин та ґрунту; застосування методів ШІ для автоматизованого аналізу великих обсягів даних та виявлення патернів у зображеннях; забезпечення обробки та аналізу космічних знімків в контексті геопросторових даних для більш точного картографування та аналізу результатів [21-23].

10.3. Методологія дослідження вегетаційного стану культур за допомогою космічних знімків в Google Earth Engine

Об'єктом наших досліджень були сільськогосподарські угіддя (паї) на заході від села Перемога Піщаноблідської сільської громади Новоукраїнського району Кіровоградської області (рисунк 9). На рисунку позначено дві ділянки з різним з різним типом сільськогосподарських культур: поле 1 - бобові, поле 2 - озимина.



Рисунок 9 - Схема розташування сільськогосподарських угідь, що досліджувались (дослідження авторів)

На сьогодні використання даних ДЗЗ є одним із ефективних способів моніторингу посівів протягом сезону, який дозволяє побачити цілісну картину по всьому полю, та швидко прийняти відповідні рішення, щоб не призвести до втрат врожаю. Опрацювання даних за допомогою онлайн-редактора програмного коду Google Earth Engine Code Editor дозволяє пришвидшити цей процес. При цьому не має потреби в надпотужних комп'ютерах, так як всі обрахунки і процеси відбуваються в хмарному середовищі на зовнішніх серверах. Мова програмування Java Script та власні функції Редактора коду Google Earth Engine дають можливість створювати програми, за допомогою яких можна швидко і ефективно опрацьовувати набори даних на обрану територію та період.

Для досліджень використано різночасові космічні знімки знімальної



системи Sentinel-2, за якими було обчислено вегетаційні індекси у хмарній платформі для геопросторового аналізу даних в планетарних масштабах Google Earth Engine.

Sentinels - це група супутників, спеціально розроблених для передачі даних і знімків, які є основною космічною місією дистанційного зондування Землі, яка запущена Європейським космічним агентством (ESA) у рамках програми «Коперник» (Copernicus) для здійснення дистанційного спостереження і підтримки таких сервісів, як моніторинг лісів, фіксування змін покриву Землі, відстеженням наслідків стихійних лих. Ця унікальна програма моніторингу докільця змінює способи управління навколишнім середовищем, розуміння і подолання наслідків зміни клімату та захисту повсякденного життя.

Sentinel-2 оснащений інноваційної ширококутною мультиспектральною камерою високої роздільної здатності з 13 спектральними діапазонами, що дозволяє по-новому оцінювати ґрунтовий покрив та рослинність. Поєднання високої роздільної здатності, нових спектральних можливостей, ширини смуги огляду 290 км і частоти повторного знімання тієї ж території дозволяє отримати достовірну інформацію про стан земного покриву.

Для забезпечення частотої відвідуваності і високої доступності, в місії заплановано два ідентичні супутники Sentinel-2 (Sentinel-2A і Sentinel-2B), що працюють одночасно на відстані 180° один від одного для оптимального покриття та передачі даних. Разом вони покривають всю земну поверхню, великі острови, внутрішні та прибережні води кожні п'ять днів на екваторі. Sentinel-2A перебуває на орбіті з 23 червня 2015 року, а Sentinel-2B був запущений 7 березня 2017 року.

Як відомо, NDVI використовується для оцінки здоров'я рослинного покриву на основі різниці у відбитті ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного (RED) світла. Хмари можуть перешкоджати правильному вимірюванню цих параметрів, що може призвести до неточних результатів NDVI. Вираз для обчислення вегетаційного індексу NDVI:



$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Слід розуміти, що NDVI – це індикатор стану рослини, який нічого не говорить про причини тієї чи іншої ситуації. Це швидше підказка про те, що відбувається на полі.

Розглянемо три сценарії використання індексу вегетації NDVI: на початку, в середині та наприкінці сільськогосподарського сезону.

На початку сезону з індексу NDVI можна зрозуміти, як рослина перезимувала. Як правило, логіка така:

- Якщо NDVI нижчий від 0,15 – ймовірно, на ділянці всі рослини загинули. Зазвичай такі показники відповідають зораному ґрунту без вегетації;
- 0,15–0,2 – теж низький показник. Це може говорити про те, що рослини увійшли в зимівлю на ранній фенологічній фазі, до кущіння;
- 0,2–0,3 – відносно хороший показник. Ймовірно, рослини встигли увійти у фазу кущіння та відновлюють вегетацію;
- 0,3–0,5 – хороший показник. Візьміть до уваги, що високі значення NDVI можуть свідчити про те, що рослини пішли на зимівлю на пізній стадії розвитку. Якщо супутниковий знімок було отримано до часу відновлення вегетації, то треба буде ще раз проаналізувати стан ділянки після початку періоду росту та розвитку рослин.
- Вище ніж 0,5 – аномальний показник після зимівлі. Цю ділянку краще перевірити самостійно.

В середині сезону з індексу NDVI можна зрозуміти, як розвиваються рослини на полі. Якщо значення індексу середні й високі (0,5–0,85), то, швидше за все, на ділянці все добре. Якщо індекс низький – схоже, рослинам на ділянці чогось не вистачає, наприклад, вологи або поживних елементів. Таку зону краще перевірити самостійно.

Наприкінці сезону за індексом NDVI можна визначати, які поля готові до збирання врожаю: чим нижчий індекс, тим ближче до дозрівання ділянка поля. Оптимальне значення індексу в такому випадку – 0,3–0,35.

Дослідження проводилось протягом сезону зима-весна-осінь 2023 року для



моніторингу стану розвитку та вегетації сільськогосподарських угідь. Вхідними даними слугують мультиспектральні космічні знімки із Супутника Sentinel 2, для яких виконана корекція за вплив атмосфери на якість зображення. При виконанні дослідження і написанні програми використано наступний алгоритм:

1) Пошук та аналіз даних. На сайті Google Earth Engine в каталозі даних було обрано знімки із супутника Sentinel-2, які пройшли атмосферну корекцію (Top-of-Atmosphere Reflectance) та використано за основу код, який представлений розробниками компанії «Google».

2) Застосування функції для маскувння хмар. Ці дії будуть корисним при аналізі вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), особливо у випадках, коли хмари можуть спотворювати результати. Маскування хмар допомагає видалити хмарні області з обробки зображень, забезпечуючи більш точні дані для розрахунку NDVI. Таким чином, використання функції для маскувння хмар позитивно впливає на аналіз роботи індексу NDVI, допомагаючи уникнути спотворень результатів.

3) Фільтрування даних з набору за часом та відсотком хмарності. Ми обрали порогове значення 20% для параметру "CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE", який використовується для кількісної оцінки відсотка покриття хмарами на кожному пікселі зображення. Для деяких часових періодів цей параметр був збільшений до 30%, тому що не було наявних знімки з меншим значенням хмарності на дану територію.

За часом було виконано фільтрування з періодом 2-4 тижні, в залежності від наявності знімків.

4) Розрахунок NDVI індексів для обраних зображень та їх візуалізація. Сам розрахунок не є складною операцією, але для подальшого аналізу стану сільськогосподарських культур важливо візуалізувати результати таким чином, щоб відображалась різниця між різними вегетаційними етапами розвитку та станом рослин. Для цього ми розбили весь діапазон значень від -1 до 1 на 6 частин [-1, 0, 0.4, 0.6, 0.8, 1] і присвоїли їм окремі кольори.

Таке розбиття діапазону пов'язане з даними про значення NDVI для



сілськогосподарських культур під час різних стадій вегетації, описаних вище. Результатом є зображення, на яких бачимо зміну вегетаційного стану культур. Для оцінки стану дозрівання культур обрано 2 поля, які виділено червоними колами - поле 1 та поле 2 на рисунку 10. Відповідно до схеми чергування культур на полях в 2023 році на полі 1 вирощувались бобові культури, а на полі 2 - озима пшениця. На рисунку 10 подано результат обчислення вегетаційного індексу станом на 4 січня 2023 року. Цей період вибрано для дослідження, оскільки в цей час на даній території не спостерігався сніговий покрив. Максимальне значення NDVI для поля 1 у січні становить 0.334, що в даний період свідчить про наявність відкритого ґрунту та високої вологості. На полі 2, де засіяна озима пшениця, максимальне значення NDVI становить 0.724, що для зимового періоду є дуже високим показником і свідчить про достатній рівень вегетації для озимої пшениці та підвищений рівень вологості ґрунту.

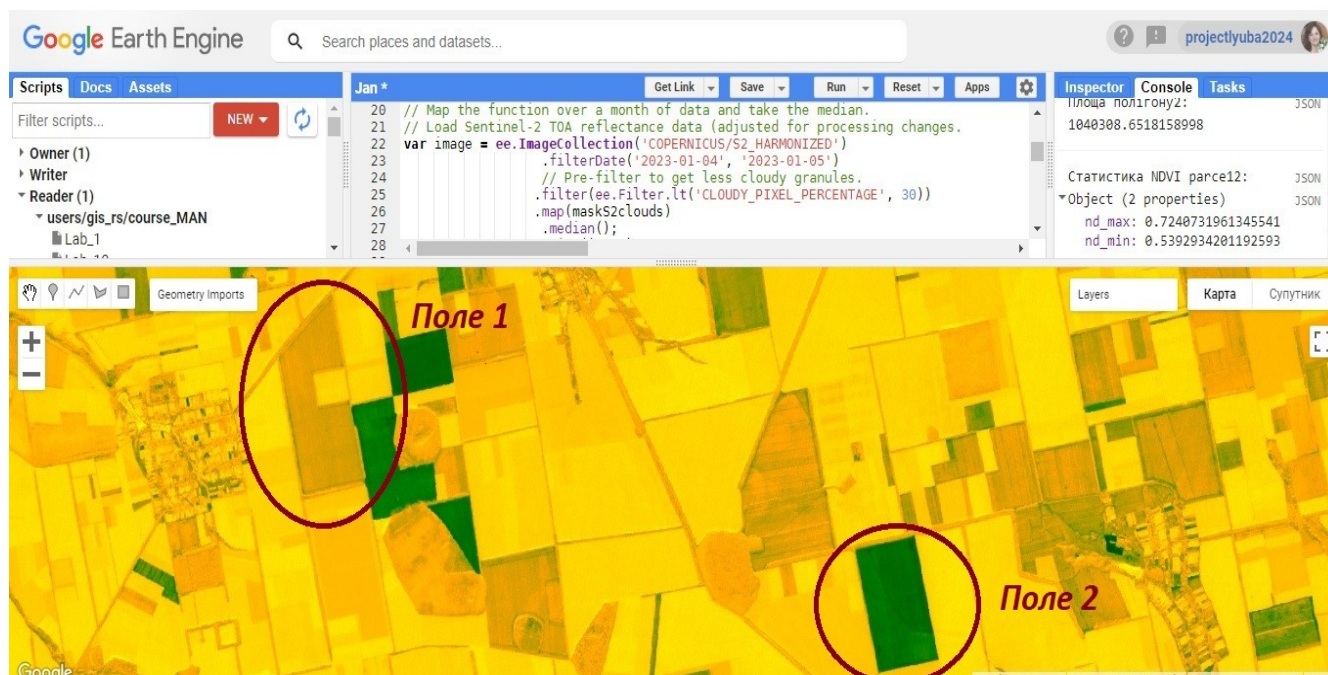


Рисунок 10. Обчислений вегетаційний індекс NDVI досліджуваних ділянок станом на 4 січня 2023 року: поле - 1 бобові культури, поле 2 - озима пшениця (дослідження авторів)

На рисунку 11 подано результат обчислення вегетаційного індекса досліджуваних ділянок станом на 1 червня 2023 року. У цей період поля



відображені яскраво зеленим кольором, що свідчить про високу кількість надземної біомаси в даних ділянках. Максимальне значення NDVI для поля 1 становить 0.761, що свідчить про достатній рівень зеленої біомаси для бобових, але в певній ділянці поля (ліворуч) спостерігаємо полосу із мінімальним значенням - 0.446, що означає, що в даній ділянці розвиток зеленої біомаси є недостатній і потребує внесення азотних добрив. Максимальне значення NDVI для поля 2 в цей період становить 0.840, а мінімальне - 0.646, що свідчить про максимальний вміст біомаси, появу колосків та цвітіння пшениці.

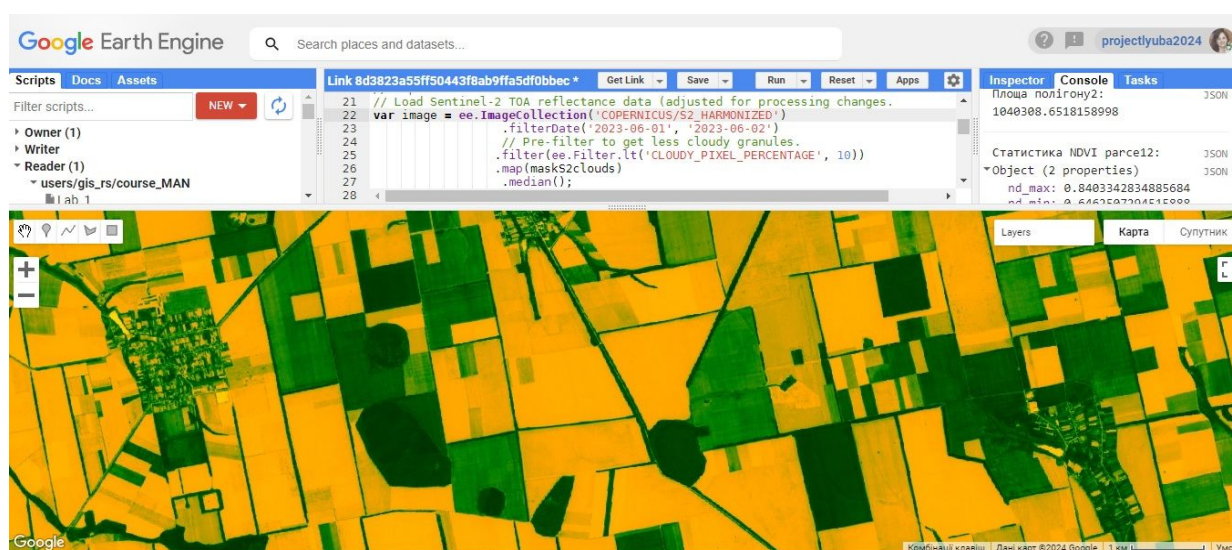


Рисунок 11. Обчислений вегетаційних індекс NDVI досліджуваних ділянок станом на 1 червня 2023 року (дослідження авторів)

На обчисленому вегетаційному індексі NDVI за 21 липня 2023 року (рисунок 12) поле 1 та поле 2 відображаються жовтим кольором. Максимальне значення NDVI для поля 1 становить 0.304, а для поля 2 - 0.450, що свідчить про значне зменшення зеленої біомаси, зниження вмісту хлорофілу в рослинах, а це в свою чергу означає, що бобові та пшениця перейшли у стадію дозрівання і готові до збирання врожаю.

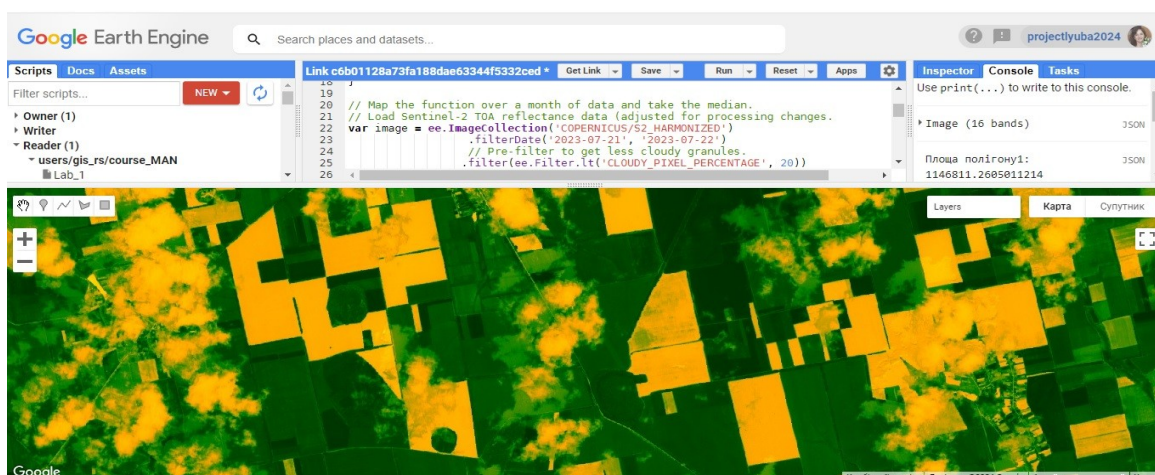


Рисунок 12. Обчислений вегетатійних індекс NDVI досліджуваних ділянок станом на 21 липня 2023 року (дослідження авторів)

Повний цикл вегетатійного періоду від січня до липня 2023 року для поля 1, на якому вирощувались бобові культури, подано на рисунку 13. У січні-березні значення NDVI є в межах 0,1-0,3, що свідчить про низький рівень біомаси, тобто бобові ще не висівались у період до 10 березня. Значне зниження значення NDVI у лютому місяці порівняно із січнем пов'язано із незначним сніговим покривом в лютому під час знімання. У квітні бачимо перші сходи бобових, значення NDVI = 0.591. У лівій частині поля бачимо жовту полосу із нижчим показником NDVI, що свідчить про низьку ефективність поля в даній ділянці і потребує внесення азоту, мінеральних добрив або зрошення. Максимальний рівень зеленої маси спостерігаємо у червні, а у липні рівень зеленої біомаси знижується, що означає перехід у стадію дозрівання культури.

січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень
NDVI: max=0.234 min=0.177	NDVI: max=0.101 min=0.052	NDVI: max=0.328 min=0.165	NDVI: max=0.591 min=0.307	NDVI: max=0.743 min=0.376	NDVI: max=0.761 min=0.446	NDVI: max=0.304 min=0.157

Рисунок 13. Результати вегетатійних індексів для поля 1 (бобові) впродовж усього вегетатійного періоду (дослідження авторів)



Аналогічно подано результат обчислених вегетаційних індексів для поля 2 впродовж вегетаційного періоду з січня до липня 2023 року (Рисунок14). У січні спостерігаємо стадію кущіння озимої пшениці, $NDVI = 0,5-0,7$, у лютому через наявність снігового покриву значення $NDVI$ має нижчі показники. У березні-квітні по усій території поля спостерігаємо високий показник $NDVI$, пшениця переходить у стадії виходу в трубку та формування суцвіть. Максимальні показники $NDVI = 0.864$ та $NDVI = 0.864$ були у травні та червні під час стадій формування суцвіть (колосків) та цвітіння пшениці. А вже 21 липня спостерігаємо значне зниження значення $NDVI$ до 0.450 , що означає, що пшениця перейшла у стадію дозрівання.


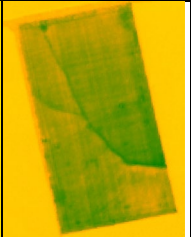


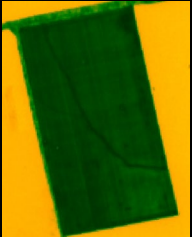
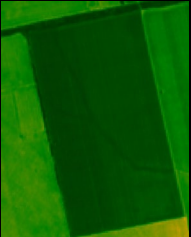
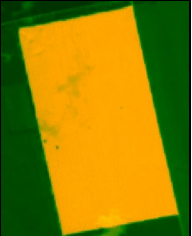
січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень
						
NDVI: max=0.724 min=0.539	NDVI: max=0.590 min=0.214	NDVI: max=0.737 min=0.508	NDVI: max=0.772 min=0.520	NDVI: max=0.864 min=0.547	NDVI: max=0.840 min=0.646	NDVI: max=0.450 min=0.061

Рисунок 14. Результати вегетаційних індексів для поля 2 (озимина) впродовж вегетаційного періоду з січня до липня 2023 року (дослідження авторів)

По розрахованих різночасових значеннях індексу $NDVI$ для полів з різними культурами можна спостерігати зміну як середнього значення стану біомаси, так і однорідність її зміни за період спостереження в межах конкретного поля. На основі отриманих даних можна визначити перехід культури із однієї фази розвитку в іншу і загалом про стан дозрівання культури в цілому. Отже, описаний в даній роботі підхід дозволяє здійснювати моніторинг стану сільськогосподарських культур протягом фази вегетації з використанням, як якісних – візуальний аналіз, так і кількісних – індекс $NDVI$, показників. Зміна



значень нормалізованого різницевого вегетаційного індексу дозволяє виявити зміну стану біомаси.

Висновки та перспективи

Використання космічних знімків для визначення пошкоджених культур у високоточному землеробстві за допомогою хмарної платформи Google Earth Engine дозволяє отримувати точні та актуальні дані для забезпечення ефективного управління сільськогосподарськими угіддями. Використання космічних знімків дозволяє отримувати зображення високого просторового розрізнення, що надає можливість докладно аналізувати стан культур та виявляти найменші пошкодження чи зміни. Інтеграція хмарної платформи Google Earth Engine дозволяє проводити регулярний моніторинг посівів, що є важливим для виявлення потенційних проблем та реагування на них вчасно. Застосування хмарних технологій у поєднанні з алгоритмами обробки даних дозволяє автоматизувати аналіз та виявлення пошкоджень, що збільшує ефективність використання отриманих інформацій. Використання хмарної платформи дає можливість отримання та обробки космічних знімків в режимі реального часу з будь-якої точки світу, забезпечуючи глобальний доступ до необхідних ресурсів. Використання цих технологій у високоточному землеробстві сприяє підвищенню продуктивності та забезпеченню стабільної виробничої діяльності в сільському господарстві.

Описаний підхід дає змогу здійснювати моніторинг стану сільськогосподарських культур протягом усієї фази вегетації з використанням, як якісних – візуальний аналіз, так і кількісних – індекс NDVI, показників. Зміна значень нормалізованого різницевого вегетаційного індексу дозволяє виявити зміну стану біомаси.

В результаті досліджень для поля 1, на якому вирощувались бобові культури, перші сходи культури, значення $NDVI = 0.591$, бачимо у квітні.



Максимальний рівень зеленої маси спостерігаємо у червні, а у липні рівень зеленої біомаси знижується, що означає перехід у стадію дозрівання культури. Для поля 2 у січні спостерігаємо стадію кушіння озимої пшениці, $NDVI = 0,5-0,7$. У березні-квітні по усій території поля спостерігаємо високий показник $NDVI$, пшениця переходить у стадії виходу в трубку та формування суцвіть. Максимальні показники $NDVI = 0.864$ та $NDVI = 0.864$ були у травні та червні під час стадій формування суцвіть (колосків) та цвітіння пшениці. А з липня спостерігаємо значне зниження значення $NDVI$ до 0.450 , що означає, що пшениця перейшла у стадію дозрівання.

Перспективи використання космічних знімків для визначення пошкоджених культур у високоточному землеробстві за допомогою хмарної платформи Google Earth Engine включають наступне. З удосконаленням технологій обробки та аналізу даних з космічних знімків та розвитком хмарних платформ, можливості точного визначення пошкоджених культур значно зростають. Хмарна платформа Google Earth Engine дозволяє отримувати дані та аналізувати їх в режимі реального часу, що сприяє вчасному виявленню та реагуванню на пошкодження без необхідності ручного втручання. Забезпечення глобального доступу до космічних знімків через хмарні платформи дозволяє аграріям та дослідникам з різних країн отримувати доступ до важливої інформації для вирішення сільськогосподарських завдань. Можливість інтеграції космічних знімків з іншими даними, такими як метеодані, дозволяє отримати більш повну картину стану посівів та розвитку рослин. Аналітичні засоби хмарної платформи сприяють ефективному використанню ресурсів, зменшенню втрат та оптимізації агропромислового виробництва. Використання космічних знімків у високоточному землеробстві через хмарні платформи сприяє підвищенню стійкості сільського господарства до різних викликів, таких як зміни клімату та шкідники.