Received: 26.11.2024 | *Accepted: 19.12.2024*

Agriculture. Plant growing

doi: 10.31210/spi2024.27.04.14
UDC 631.171
ORIGINAL ARTICLE

Scientific Progress & Innovations
https://journals.pdaa.edu.ua/visnyk

27 (4)
2024

Definition of damaged crops using satellite imagery in precision agriculture

B. Chetverikov | L. Babiy

Article info

Correspondence Author
B .Chetverikov
E-mail:
borys.v.chetverikov@email.ua

Lviv Polytechnic National University,
12 S. Bandera St., 79013,
Lviv, Ukraine

Citation: Chetverikov, B., & Babiy, L. (2024). Definition of damaged crops using satellite imagery in precision agriculture. *Scientific Progress & Innovations*, 27 (4), 84–90. doi: 10.31210/spi2024.27.04.14

The relevance of identifying damaged crops using satellite imagery in precision agriculture is extremely high, as modern agriculture faces challenges such as climate change, pests, and natural disasters. The use of satellite data allows for rapid and accurate detection of problem areas in fields, contributing to more efficient resource management. Vegetation indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) make it possible to identify the extent of crop damage, assess their condition, and determine the need for immediate intervention. This helps farmers reduce crop losses, lower field treatment costs, and simultaneously maintain ecological balance. Remote sensing technologies provide an environmentally friendly and rapid method for obtaining large volumes of data on the condition of agricultural land. Within the framework of precision agriculture, such methods become an integral part of the automation and modernization of the industry. Additionally, satellite imagery ensures continuous monitoring, which is particularly important for large-scale farms. The integration of this data into geographic information systems enables forecasting and optimization of agronomic processes. Thus, the use of satellite imagery is becoming a strategically important tool for enhancing the resilience of agriculture to modern challenges. The study aimed to determine the NDVI index for a cornfield and analyze which part of the crops had been damaged using medium spatial resolution satellite imagery of agricultural fields in the Lviv region. The research employed methods of photogrammetry and geoinformation analysis of Earth remote sensing data. To identify damaged crops in precision agriculture, medium spatial resolution images from the Landsat satellite were used for agricultural areas in the Lviv region. The analysis process included calculating the NDVI, which allows assessing the condition of crops based on their spectral characteristics. Input data were processed in the cloud environment of Google Earth Engine, where cloud masking, quality-based filtering, and NDVI vegetation index calculations for each pixel of the images were conducted. The collected data facilitated the creation of a damage map for the study area, simplifying the visualization and interpretation of results. The application of NDVI demonstrated the effectiveness of the method for precise monitoring of agricultural fields. During the period from spring to autumn 2023, changes in NDVI values were observed, which allowed identifying areas with signs of plant stress or damage. The highest index values indicated healthy vegetation, while lower values signaled damage or insufficient crop growth. The results showed that the technology enables agronomists to identify damaged areas and take timely measures to reduce losses and improve yield. The findings on identifying damaged crops using satellite imagery in precision agriculture can be used to optimize resource utilization, reduce crop losses, and improve the efficiency of agricultural production.

Keywords: precision agriculture, NDVI index, yield optimization, satellite imagery, crop monitoring, space technologies in agriculture.

Визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві

Б. В. Четверіков | Л. В. Бабій

Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

Актуальність визначення пошкоджених культур за допомогою космічних знімків у точному землеробстві є надзвичайно високою, оскільки сучасне сільське господарство стикається з викликами змін клімату, шкідників та природних катаклізмів. Завдяки індексам рослинності, таким як NDVI, можна ідентифікувати ступінь пошкодження рослин, оцінити їх стан і визначити потребу в негайному втручанні. Це допомагає аграріям знизити втрати врожаю, зменшити витрати на обробку полів і водночас зберегти екологічний баланс. Технології дистанційного зондування є екологічно чистим і швидким способом отримання великого обсягу даних про стан сільськогосподарських угідь. Таким чином, використання космічних знімків стає стратегічно важливим інструментом для підвищення стійкості сільського господарства в умовах сучасних викликів. Метою дослідження було визначення індексу NDVI для поля кукурудзи та проаналізувати, яка частина посівів зазнала пошкоджень за допомогою використання космічних знімків середньої просторової розрізненості території сільськогосподарських посівів у Львівській області. У роботі використано методи фотограмметрії та геоінформаційного аналізу даних дистанційного зондування Землі. Для визначення пошкоджених культур у точному землеробстві використовувалися знімки середньої просторової розрізненості з супутника Landsat для сільськогосподарських ділянок Львівської області. Процес аналізу включав обчислення індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який дозволяє оцінити стан культур за їх спектральними характеристиками. Вхідні дані опрацьовувалися в хмарному середовищі Google Earth Engine, де проводилося маскування хмар, фільтрування за критеріями якості та обчислення вегетаційного індексу NDVI для кожного пікселя зображень. Зібрані дані дозволили створити карту пошкоджень для дослідної ділянки, що полегшує візуалізацію та інтерпретацію результатів. Застосування NDVI показало ефективність методу для точного моніторингу сільськогосподарських полів. Протягом періоду з весни до осені 2023 року спостерігали зміни в значеннях NDVI, що дозволило виявити ділянки з ознаками стресу рослин або пошкоджень. Найвищі значення індексу вказували на здорову рослинність, тоді як нижчі значення сигналізували про пошкодження або недостатній ріст культур. Результати показали, що технологія дозволяє агрономам ідентифікувати пошкоджені ділянки, а також приймати своєчасні заходи для зменшення втрат та підвищення врожайності. Отримані результати з визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві можуть бути використані для оптимізації використання ресурсів, зменшення втрат врожаю та підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.

Ключові слова: точне землеробство, індекс NDVI, оптимізація врожайності, космічний знімок, моніторинг урожаїв, космічні технології в сільському господарстві.

Бібліографічний опис для цитування: *Четверіков Б. В., Бабій Л. В.* Визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві. *Scientific Progress & Innovations*. 2024. № 27 (4). С. 84–90.

Вступ

Швидкозростаюче глобальне населення, очікується досягти 9,8 мільярда до 2050 року за даними Організації продовольства та сільського господарства [1], породило безпрецедентний попит на продовольство. Цей зростаючий попит на їжу виникає в час, коли сільське господарство стикається з великими екологічними викликами, такими як зміна клімату, дефіцит води та ерозія ґрунту, які обмежують можливості існуючих систем відповісти на попит ефективним способом. У відповідь на ці виклики точне землеробство (Precision Agriculture, PA) виступило як трансформаційний підхід, використовуючи технології для оптимізації виробництва та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище на місцевому рівні.

Точне землеробство дозволяє налаштовувати практики управління, враховуючи внутрішню змінність у господарствах за допомогою систематичного збору, аналізу та використання даних. Замість рівномірного розподілу ресурсів по всьому полю, технології точного землеробства дозволяють проводити цілеспрямовані втручання, застосовуючи ресурси, такі як вода, добрива та пестициди, точно там і коли це потрібно [2]. Цей підхід не лише підвищує ефективність, але й мінімізує екологічний слід сільськогосподарської діяльності.

Під зонтиком точного землеробства входять різноманітні технології, такі як сенсори, зображення, системи позиціонування, інструменти управління інформацією та системи змінного внесення ресурсів. Останніми роками спостерігається прискорення інновацій у сфері технологій точного землеробства, що стало можливим завдяки прогресу у супутникових платформах, проксимальному та віддаленому зондуванні, автоматизації, робототехніці та науці про дані. Ці досягнення не лише розширили можливості систем точного землеробства, але також призвели до зниження витрат, сприяючи їхньому поширенню на глобальному рівні. За поточними оцінками, технології точного землеробства наразі застосовуються приблизно на 50 % основних зернових гектарів у ключових регіонах, таких як Північна Америка, Бразилія та Австралія [3].

Цей всебічний огляд проникає в останні досягнення у сфері технологій точного землеробства, які мають потенціал підтримувати стале виробництво сільськогосподарської продукції. Дослідження починається з розгляду ключових розвитків платформ у віддаленому зондуванні, проксимальному зондуванні ґрунту та системах глобальної навігації за супутником (GNSS). Далі розглядаються інновації у системах змінного внесення ресурсів, робототехніці та автоматизації, а також в аналізі даних. В заключенні, огляд аналізує існуючі перешкоди перед широким прийняттям точного землеробства і пропонує майбутні напрямки подолання цих викликів.

Сучасні виклики в галузі сільськогосподарського виробництва та необхідність ефективного використання земельних ресурсів підкреслюють важливість впровадження інноваційних технологій у сільське господарство. Однією з перспективних галузей є використання космічних знімків для визначення пошкоджених культур у точному землеробстві. Це дозволяє не лише здійснювати ретельний моніторинг сільськогосподарських ділянок, але й забезпечує можливість швидкого виявлення проблем та вчасного реагування на них.

В умовах зростаючого світового населення та зміни клімату, забезпечення продовольчої безпеки стає насущним завданням. Точне землеробство, яке базується на використанні космічних технологій для аналізу сільськогосподарських угідь, визначення їх стану та виявлення пошкоджень культур, стає важливим інструментом у досягненні цієї мети. Враховуючи можливості сучасних космічних знімків, їх використання в точному землеробстві може сприяти оптимізації виробництва, підвищенню врожайності та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Отже, розвиток методів визначення пошкоджених культур на основі космічних зображень стає важливим напрямком в сучасному аграрному науковому дослідженні.

Використання космічних знімків у точному землеробстві є надзвичайно важливим етапом у визначенні пошкоджених культур. Завдяки сучасним технологіям космічного обліку, аграрії отримують унікальну можливість перевіряти стан своїх полів та визначати наявність пошкоджень чи стресів у рослин. Космічні знімки надають можливість оцінювати різноманітні аспекти розвитку рослин, такі як колір, текстура та інші параметри, що вказують на їхнє здоров'я. Крім того, вони дозволяють агрономам та фермерам вчасно виявляти можливі загрози, такі як захворювання, шкідники чи несприятливі погодні умови. Це дозволяє вчасно реагувати та вживати ефективні заходи для запобігання пошкоджень культур та забезпечення високого рівня врожаю.

Крім того, космічні знімки використовуються для визначення оптимального часу для проведення різних агротехнічних заходів. Аналіз змін у фізичному стані рослин та ґрунту на основі космічних даних дозволяє встановлювати оптимальні терміни сівби, поливу, обробітку ґрунту та збору врожаю. Це сприяє оптимізації сільськогосподарського виробництва та забезпечує ефективне використання ресурсів.

У великій мірі використання космічних знімків у точному землеробстві не лише сприяє визначенню пошкоджених культур, але й підвищує загальну продуктивність сільського господарства, зменшуючи втрати та сприяючи стійкості рослин до небезпек.

Розглянемо останні наукові праці, які опубліковані останніми роками науковцями з різних країн світу. Серед всіх публікацій на нашу думку слід розглянути наступні.

В роботі Buchaillot та ін. [4], розглядає регіональний моніторинг шкідника осені, хробака Армії, за допомогою системи попередження. Автори Cavalaris та ін. [5], презентують моделювання врожайності пшениці твердої на основі зображень від супутника Sentinel-2. Chlingaryan та ін. [6], розглядають підходи машинного навчання для прогнозування врожайності культур та оцінювання статусу азоту в точному землеробстві. Gitelson та Merzliak [7], розробляють алгоритми для віддаленого зондування хлорофілу у листі.

Gorelick та ін. [8], представляють Google Earth Engine як інструмент для геопросторового аналізу на планетарному рівні доступний для всіх. Hunt та ін. [9], досліджують високороздільне картування врожайності пшениці за допомогою супутникового Sentinel-2. Автори Lambert та ін. [10], пропонують методику оцінки виробництва сільгосппродукції на рівні сільських господарств на основі часових рядів зображень від Sentinel-2 в малій сільській зоні Малі. McNairn та Shang [11], здійснює огляд багаточасового синтетичного апертурового радіолокаційного (SAR) зондування для моніторингу врожаю. Робота Rouse та ін. [12], розглядає моніторинг систем вегетації на рівнині Великих рівнин з використанням супутникових знімків ERTS. Rozenstein та ін. [13], пропонують методику оцінки споживання води бавовною з використанням часових рядів зображень від Sentinel-2.

Стаття Segarra [14], обговорює використання супутникових зображень в точному землеробстві. Інше джерело, також авторства Segarra та співавторів [15], розглядає вдосконалені особливості та застосування супутникових даних Sentinel-2 в точному землеробстві. Також, Segarra та співавтори [16], досліджують використання даних від супутника Sentinel-2 для оцінки внутрішньопольової врожайності пшениці. Четверте джерело, також авторства Segarra та співавторів [17], аналізує мультимасштабну оцінку спектральних даних Землі, повітряних та супутникових для моніторингу вмісту азоту в зерні пшениці. Вчений Singh [18], розглядає передові технології точного землеробства для сталого вирощування сільськогосподарських культур. Skakun та ін. [19], досліджують варіабельність врожайності кукурудзи та сої на полі за допомогою супутникових знімків різних систем. Група авторів Solano та ін. [20], описують методологію вивчення індексів рослинності в оливкових гаях з використанням супутникових даних. Weiss та ін. [21], здійснюють огляд використання супутникових зображень у сільському господарстві.

Проаналізувавши всі перелічені наукові праці нами було систематизовано можливі методи визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві, та прийнято рішення використати одну з передових технологій на сьогоднішній день, а саме хмарне середовище Google Earth Engine.

Мета дослідження

Мета досліджень – використовуючи космічні знімки середньої просторової розрізненості, отримані з супутника Landsat, на територію сільськогосподарських посівів у Львівській області, визначити індекс NDVI для поля кукурудзи та проаналізувати яка частина посівів зазнала пошкоджень.

Матеріали і методи

Дослідження з визначення пошкоджених культур за допомогою космічних знімків у точному землеробстві включають в себе різноманітні матеріали та методи. Матеріали включають в себе високороздільні космічні знімки від супутників та дронів, геопросторові дані для точної геолокації та контекстуальної інформації, а також метеорологічні дані для аналізу погодних умов. Щодо методів, вони включають в себе спектральний аналіз для вивчення колірних властивостей рослин, текстурний аналіз для виявлення змін в структурі ґрунту та рослин, класифікацію об'єктів за допомогою алгоритмів машинного навчання, моделювання стану культур та комбіновані підходи, що інтегрують різні методи та дані для комплексного аналізу сільськогосподарських угідь. Ці матеріали та методи дозволяють отримати об'єктивну та деталізовану інформацію про стан культур та вчасно реагувати на можливі пошкодження.

Об'єктом досліджень була ділянка поля біля с. Крехів Львівської області, на якому в період досліджень, а саме станом на 2023 рік, вирощувалась кукурудза. Площа досліджуваної ділянки 53,25 га. Розташування дослідної ділянки продемонстровано на ***рисунку 1***.

Рис. 1. Схема розташування дослідної ділянки

Методика визначення пошкоджених культур за допомогою космічних знімків у хмарному середовищі Google Earth Engine включає кілька кроків. По-перше, необхідно отримати доступ до відповідних супутникових знімків, які мають високу просторову та спектральну роздільність. По-друге, застосовується алгоритм обробки зображень, який включає у себе виявлення пошкоджених ділянок на основі аналізу змін у спектральному підписі культурних рослин. Це може включати використання індексів рослинності, таких як NDVI, для виявлення змін у здоров'ї рослин. По-третє, дані обробляються у хмарному середовищі Google Earth Engine, що дозволяє швидко та ефективно обробляти великі обсяги супутникових даних.

Використання цього середовища дозволяє автоматизувати процес аналізу та обробки даних із використанням програмних скриптів. По-четверте, на основі оброблених зображень створюються карти, що відображають рівень пошкоджень у культурних рослинах. Ці карти можуть включати в себе різні класи пошкоджень, від легких до важких, а також просторову інформацію про місцезнаходження пошкоджених ділянок.

Остаточний крок – інтерпретація та аналіз результатів для прийняття рішень щодо управління пошкодженими культурами. Це може включати розробку стратегій реагування на пошкодження, визначення областей для застосування додаткових заходів захисту рослин та оцінку впливу пошкоджень на врожайність та прибуток від сільськогосподарської діяльності.

На ***рис. 2*** подано технологічну схему визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків в хмарному середовищі Google Earth Engine.

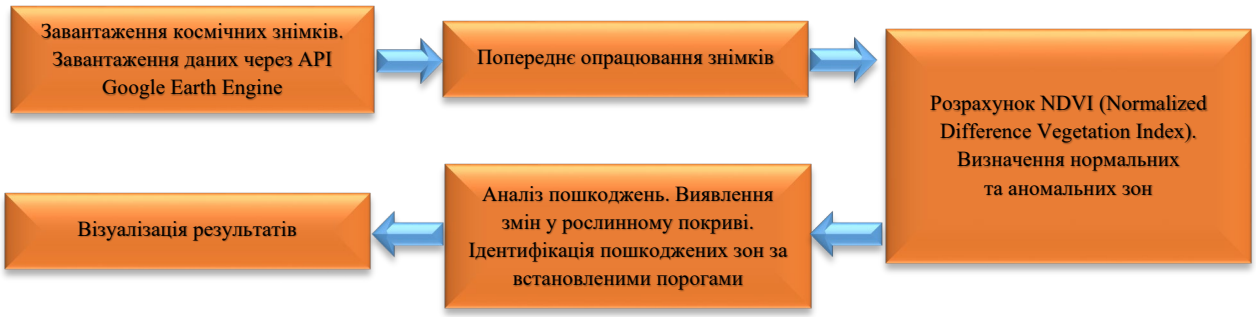


Рис. 2. Технологічна схема визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків в хмарному середовищі Google Earth Engine

Для досліджень використано різночасові космічні знімки знімальної системи Landsat протягом періоду весна-осінь 2023 р. Для отриманих різночасових даних було обчислено вегетаційні індекси у хмарній платформі для геопросторового аналізу даних в планетарних масштабах Google Earth Engine. Використання власних скриптів дозволяє автоматизувати виконання завантаження даних, їх опрацювання та візуалізації. При потребі можна отримати числові значення розрахованих параметрів для кожного окремого пікселя зображення.

1) Вхідні дані. Серія знімків із супутника Landsat, які пройшли атмосферну корекцію (Top-of-Atmosphere Reflectance) на територію дослідження.

2) Використання функції для маскування хмар. При аналізі вегетаційного індексу NDVI хмари можуть спотворювати результати. Маскування хмар дозволяє виключити хмарні області з обробки зображень, що забезпечує більш точні дані для розрахунку NDVI. Це сприятливо впливає на аналіз роботи індексу NDVI, допомагаючи уникнути спотворення результатів.

3) Фільтрування даних. Так як дані за обраний часовий період можуть містити знімки з високим рівнем хмарності, необхідно їх виключити з набору для забезпечення відповідної якості зображень. Для цього ми встановили порогове значення 20 % для параметру "CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE". Цей параметр використовується для кількісної оцінки відсотка покриття хмарами на кожному пікселі зображення. В результаті ми отримали серію зображень з періодом 2–4 тижні, в залежності від наявності знімків з низьким рівнем хмарності.

4) Розрахунок NDVI індексів. Нормалізований диференційований вегетаційний індекс визначає щільність зеленої рослинності, відображеної на супутниковому знімку. Здорова рослинність має характерний спектр відбиття, який можна використовувати для обчислення різниці між видимим червоним та ближнім інфрачервоним діапазонами. Формула NDVI визначається наступним чином:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \qquad (1)$$

де: NIR – відбите світло в ближньому інфрачервоному діапазоні; RED – відбите світло в червоному діапазоні. Згідно з цією формулою, індекс вегетації в певній точці зображення обчислюється як різниця між інтенсивностями відбитого світла в червоному і інфрачервоному діапазонах, поділена на суму цих інтенсивностей. NDVI представляє цю різницю у вигляді числового значення від -1 до 1.

Розрахунок даного індексу в Google Earth Engine при програмуванні не є складною операцією. Можна запрограмувати формулу індексу, або використати наявну функцію. Вхідними параметрами слугують номери каналів в червоному і інфрачервоному діапазонах.

5) Візуалізація отриманих результатів. Для того, щоб обчисленні дані можна було ефективно використати для подальшого аналізу стану сільськогосподарських культур, необхідно подати візуалізацію результатів таким чином, щоб на зображеннях відслідковувалась різниця між різними вегетаційними етапами розвитку та станом рослин. З цією метою ми розділили діапазон значень від -1 до 1 на 6 частин [-1, 0, 0.4, 0.6, 0.8, 1] і присвоїли їм окремі кольори. Так як дуже низькі значення NDVI (0.1 і менше) можуть бути пов'язані з наявністю порожніх скелястих ділянок, піску або снігу, і вони нас не цікавлять, цей діапазон був розділений на меншу кількість відрізків. А зміни в частині, від 0,1 і більше якраз будуть вказувати на зміни в стані здоров'я культури або рослини, так як дозволяє визначити наявність у них хлорофілу та зробити висновок про стан їхнього здоров'я.

Результати та їх обговорення

Результати досліджень визначення пошкоджених культур за допомогою космічних знімків у точному землеробстві свідчать про високий потенціал цього підходу для сільськогосподарського сектору. Застосування високороздільних космічних знімків дозволяє здійснювати точний моніторинг стану культур та розрізняти їхні різні фізіологічні характеристики. Аналіз спектральних та текстурних особливостей на знімках дозволяє виявляти вразливі аспекти рослин, такі як захворювання, стресовий стан чи вплив шкідників.

Дослідницькі зусилля також підтверджують ефективність використання алгоритмів машинного навчання для автоматичної класифікації об'єктів на космічних знімках, що допомагає автоматизувати процес визначення пошкоджень та надає швидку реакцію на виявлені проблеми. Комбіновані підходи, які інтегрують різні методи та дані, забезпечують комплексний аналіз сільськогосподарських угідь, що полегшує прийняття рішень та оптимізує агротехнічні процеси. Отримані результати свідчать про важливість використання космічних технологій у точному землеробстві для забезпечення стійкості сільськогосподарського виробництва та максимізації врожаю.

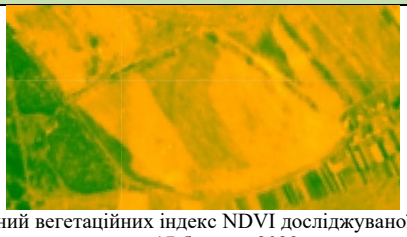
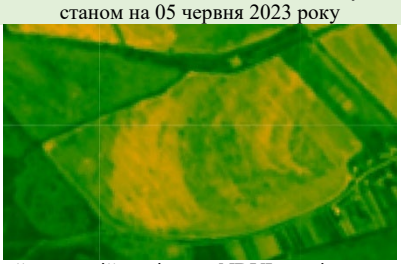
Сіяти кукурудзу в Україні рекомендується в період між кінцем квітня та серединою травня.

При цьому ранній посів при температурі +6–7°C на глибині закладення насіння забезпечує кращу вологозабезпеченість рослин, а також сприяє їх оптимальному запиленню та цвітінню в більш сприятливий температурний період. Недоліком раннього посіву є те, що сходи з'являються лише на 14–16 день, а іноді й пізніше. А пізній посів кукурудзи відповідно продовжує період її вирощування на два-три тижні.

В ***таблиці 1*** представлено обчислені вегетаційні індекси поля дослідної ділянки, яка засіяна кукурудзою станом на березень, червень, серпень та жовтень 2023 року, а також описані отримані вегетаційні показники на кожен період. Також вегетаційні індекси розраховано станом на квітень, травень, серпень, вересень, жовтень та листопад 2023 року. Визначено, що станом на квітень максимальне значення NDVI для поля становить 0.641, що в даному випадку свідчить про самовільну рослинність. Мінімальне значення -0.134 - вказує на наявність відкритого ґрунту.

Таблиця 1

Розраховані індекси NDVI на ключові періоди вирощування кукурудзи

Візуалізація розрахованого індексу NDVI для дослідної ділянки	Опис показників розрахунків
 Обчислений вегетаційних індекс NDVI досліджуваної ділянки станом на 17 березня 2023 року	Цей період вибрано для дослідження, щоб показати стан ділянки до початку польових робіт. Поле ще не було оброблене в новому посівному році і спостерігаються сліди довільної рослинності. Максимальне значення NDVI для поля становить 0.534, що в даному випадку свідчить про самовільну рослинність. Мінімальне значення -0.009 - вказує на наявність відкритого ґрунту та високої вологості
 Обчислений вегетаційних індекс NDVI досліджуваної ділянки станом на 05 червня 2023 року	На обчисленому вегетаційному індексі NDVI за 5 червня 2023 року поле відображається жовтим кольором. При цьому мінімальне значення -0.133 - вказує на наявність відкритого ґрунту і високої вологості. Знімок отриманий після проведення орних та посівних робіт, але ще до появи сходів культури. Максимальне значення NDVI становить 0,318. Після додаткового вивчення виявлено, що підвищені значення індексу мають декілька пікселів лівій нижній частині поля, що спричинено скоріш за все роботою техніки.
 Обчислений вегетаційних індекс NDVI досліджуваної ділянки станом на 15 липня 2023 року	Розрахунок NDVI індексу на зображенні від 15 липня 2023 року показує стан розвитку сходів кукурудзи через півтора місяця після посіву. Максимальне значення NDVI становить 0.660, а мінімальне значення -0.255. На знімку чітко видно місця, де схожість слабша і кукурудза відстає в розвитку.
 Обчислений вегетаційних індекс NDVI досліджуваної ділянки станом на 18 жовтня 2023 року	Значення розрахованих індексів на цей період max: 0.667 і min: 0.323. Аналіз зображень та значень індексів показав наявність ділянки поля (ліва частина) з негативними ознаками розвитку рослин. Детальне вивчення вказує на особливості рельєфу поверхні (ерозійна борозна), яка впливає як на рух техніки і якість обробки ґрунту, так і на фактори вологості та збереження родючого шару.

Станом на травень поле ще також не оброблене. У серпні кукурудза зазвичай перебуває на піку вегетаційного періоду або ближче до завершення активного росту. Показники NDVI max: 0.829 свідчить про зони з високою густотою вегетації та здоровим станом рослин. Це характерно для ділянок із сприятливими умовами росту. Min: 0.608 може вказувати на стресові умови (посуха, шкідники, дефіцит поживних речовин) або нерівномірність густоти посівів. У вересні кукурудза зазвичай перебуває на етапі дозрівання, коли фотосинтетична активність поступово знижується. Значення NDVI max: 0.808 і min: 0.587 інтерпретуються так: max: 0.808 – вказує на ділянки, де рослини все ще мають достатню щільність листкового покриву. Це може бути ознакою пізнього дозрівання або хорошого стану вегетації навіть на пізніх стадіях. Min: 0.587 – демонструє зони, де рослини вже пройшли фазу активного росту або мають нижчу щільність посівів. Це типово для ділянок, які дозрівають швидше або зазнали стресових умов (посуха, збирання врожаю на окремих ділянках). У вересні вигляд ділянки виглядає дуже неоднорідно. На обчисленому вегетаційному індексі NDVI за 2 листопада 2023 року все поле вже відображається жовтим кольором. Значення індексів (max: 0.469; min: 0.088) вказують на відсутність хлорофілу, що означає висихання культури і її готовність для збору врожаю.

Порівнюючи розраховані індекси NDVI для дослідної ділянки з даними Карти посівів України, бачимо цілковиту невідповідність. Це вказує на те, що дані Карти посівів України, отримані шляхом неконтрольованої класифікації (класифікації без навчання) найімовірніше космічних знімків низького або максимум середнього просторового розрізнення, є досить грубими і частіше помилковими, що не відповідають дійсності. Ці дані можна використовувати лише для якогось глобального аналізу, а не для локального (***рис. 3***).

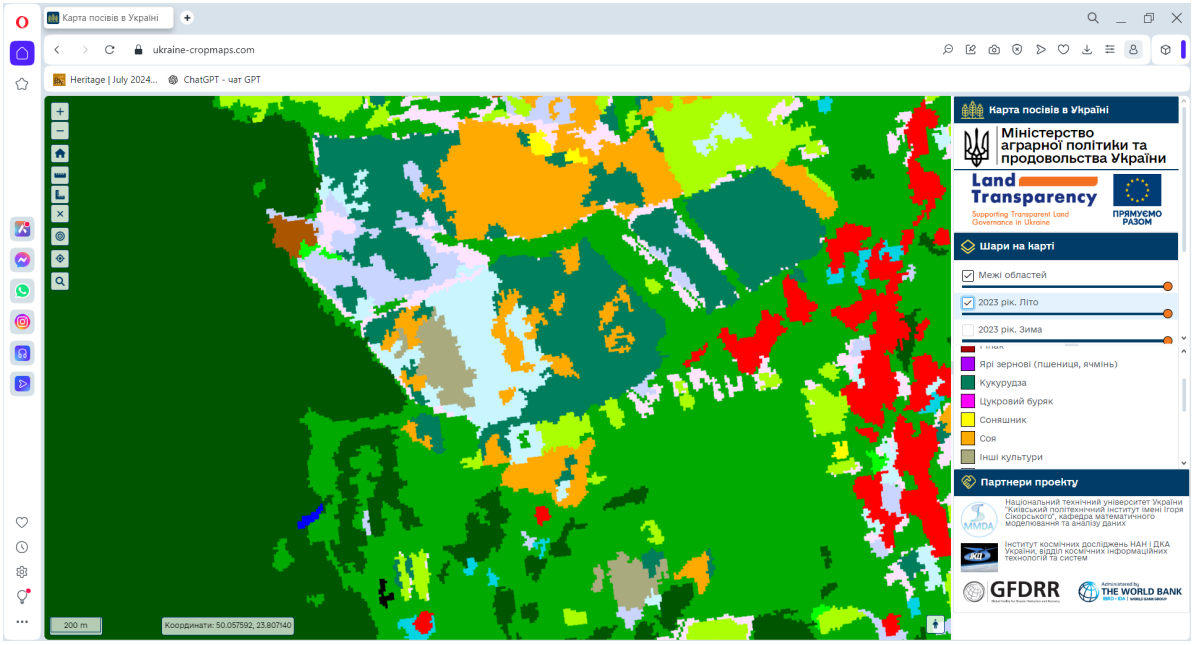


Рис. 3. Онлайн карта посівів України
(*https://ukraine-cropmaps.com*)

Висновки

Висновки досліджень з визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві свідчать про значний прогрес у використанні космічних технологій для сільськогосподарського сектору. Висока роздільна здатність космічних знімків дозволяє деталізовано аналізувати стан культур, виявляти стресові умови та пошкодження, що надає можливість агрономам та виробникам приймати інформовані рішення.

Використання спектрального та текстурного аналізу космічних знімків забезпечує об'єктивні та точні дані щодо стану рослин, визначаючи їхні фізіологічні особливості. Використання алгоритмів машинного навчання для класифікації об'єктів робить цей процес автоматизованим та допомагає в ідентифікації навіть невеликих пошкоджень.

Застосування комбінованих підходів, які об'єднують різні методи та дані, забезпечує більш повний та глибокий аналіз сільськогосподарських угідь. Отримані результати свідчать про потенціал космічних технологій у підвищенні продуктивності, реагуванні на ризики та оптимізації управління сільськогосподарськими процесами. В цілому, використання космічних знімків у точному землеробстві є багатообіцяючим напрямком для підвищення стійкості та ефективності сільського господарства.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку нових методів опрацювання космічних знімків для більш точної ідентифікації пошкоджень культур. Це включає вдосконалення алгоритмів для автоматичного виявлення пошкоджених зон з урахуванням змін в різних індексах рослинності або

використання мультиспектральних знімків для аналізу рослинного покриву на різних етапах розвитку. Важливим напрямком є інтеграція космічних знімків з іншими даними, такими як дані з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також метеорологічні дані (температура, вологість, опади). Це дозволить точніше оцінювати фактори, які впливають на пошкодження культур, та забезпечить більш комплексний підхід до моніторингу стану посівів.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

1. The future of food and agriculture: Trends and challenges. (2017). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome Retrieved from: www.fao.org/3/a-i6583e.pdf
2. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327 (5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899
3. Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111 (4), 1552–1569. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779
4. Buchaillot, Ma. L., Cairns, J., Hamadziripi, E., Wilson, K., Hughes, D., Chelal, J., McCloskey, P., Kehs, A., Clinton, N., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2022). Regional monitoring of fall armyworm (FAW) using early warning systems. *Remote Sensing*, 14 (19), 5003. https://doi.org/10.3390/rs14195003
5. Cavalaris, C., Megoudi, S., Maxouri, M., Anatolitis, K., Sifakis, M., Levizou, E., & Kyparissis, A. (2021). Modeling of durum wheat yield based on Sentinel-2 imagery. *Agronomy*, 11 (8), 1486. https://doi.org/10.3390/agronomy11081486
6. Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012
7. Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148 (3–4), 494–500. https://doi.org/10.1016/s0176-1617(96)80284-7
8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
9. Hunt, M. L., Blackburn, G. A., Carrasco, L., Redhead, J. W., & Rowland, C. S. (2019). High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111410. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111410
10. Lambert, M.-J., Traoré, P. C. S., Blaes, X., Baret, P., & Defourny, P. (2018). Estimating smallholder crops production at village level from Sentinel-2 time series in Mali's cotton belt. *Remote Sensing of Environment*, 216, 647–657. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.036
11. McNairn, H., & Shang, J. (2016). A review of multitemporal Synthetic Aperture Radar (SAR) for crop monitoring. *Multitemporal Remote Sensing*, 317–340. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_15
12. Rouse, J. W. Jr., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. W. (1974) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, 351 (309), 309–317. *3rd ERTS Symposium: National Aeronautics and Space Administration SP-351. (10-14 December 1973)*. Washington: National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614
13. Rozenstein, O., Haymann, N., Kaplan, G., & Tanny, J. (2018). Estimating cotton water consumption using a time series of Sentinel-2 imagery. *Agricultural Water Management*, 207, 44–52. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.017
14. Segarra, J. (2024). Satellite Imagery in Precision Agriculture. *Digital Agriculture*, 325–340. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_10
15. Segarra, J., Buchaillot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10 (5), 641. https://doi.org/10.3390/agronomy10050641
16. Segarra, J., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2022). Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102697. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102697
17. Segarra, J., Rezzouk, F. Z., Aparicio, N., González-Torralba, J., Aranjuelo, I., Gracia-Romero, A., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2023). Multiscale assessment of ground, aerial and satellite spectral data for monitoring wheat grain nitrogen content. *Information Processing in Agriculture*, 10 (4), 504–522. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.05.004
18. Singh, V. (2024). Advances in precision agriculture technologies for sustainable crop production. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30 (2), 61–71. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i21844
19. Skakun, S., Kalecinski, N. I., Brown, M. G. L., Johnson, D. M., Vermote, E. F., Roger, J.-C., & Franch, B. (2021). Assessing within-field corn and soybean yield variability from WorldView-3, Planet, Sentinel-2, and Landsat 8 Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 13 (5), 872. https://doi.org/10.3390/rs13050872
20. Solano, F., Di Fazio, S., & Modica, G. (2019). A methodology based on GEOBIA and WorldView-3 imagery to derive vegetation indices at tree crown detail in olive orchards. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 83, 101912. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101912
21. Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402

ORCID

B. Chetverikov https://orcid.org/0000-0001-8677-1735
L. Babiy https://orcid.org/0000-0002-5772-4865

2024 Chetverikov B. and Babiy L. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License http://creativecommons.org/licenses/by/4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.