

Надія СТЕЦЬКО, Артем КОРНІЄНКО, Ярослав МАРИНЯК

ПРОСТОРО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ ЗМІН В ЕКОСИСТЕМАХ РАЙОНІВ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ І ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНИХ ЗНІМАНЬ

На прикладі ділянки на території України поблизу Гусятина Тернопільської області, яке об'єднує множини полів проаналізовано стан посівів. Продемонстровано інформативність дешифрування карт об'єкта ділянок посівів у межах території України, які об'єднують множини полів конкретного агропідприємства. Аналіз даних дистанційного зондування землі демонструє значний потенціал для точного моніторингу стану посівів. Застосування вегетаційних індексів, таких як NDVI, дозволяє оцінити біомасу рослин, виявити стресові стани та своєчасно вжити заходів для їх усунення. Крім того, ця технологія може бути використана для картографування типів ґрунтів, визначення зон ризику посухи та шкідників, а також для оптимізації використання добрив та пестицидів. Впровадження систем дистанційного зондування в сільське господарство є важливим кроком на шляху до створення розумного сільського господарства та забезпечення продовольчої безпеки.

Ключові слова: екосистеми, вирощування сільськогосподарських культур, аналіз змін, геоінформаційні системи, дистанційні дані.

Abstract:

Nadiia STETSKO, Artem KORNIENKO, Yaroslav MARYNIAK. SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF CHANGES IN ECOSYSTEMS OF CROP GROWING AREAS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND REMOTE SENSING DATA

The article discusses the possibilities of applying the theory of information systems to the processing of remote sensing data and methods based on the satellite positioning system. Food security is one of the most important tasks. Given climate change and the growing demand for food, agriculture requires innovative approaches. One of these solutions is precision agriculture, which combines technological advances with traditional farming methods to increase resource efficiency and reduce the negative impact on the environment. With precision agriculture, farmers can adapt their farming strategies to changing climatic conditions. Precision farming allows farmers to apply inputs more precisely, taking into account the specific conditions in each field. The use of technologies such as GPS and sensors makes it possible to create yield and soil maps, which helps to determine where certain actions need. The choice of test plots in Podillia was made for several reasons. First, the region has all the natural prerequisites for growing crops. Secondly, understanding the application of precision agriculture can contribute to the introduction of the latest technologies in agriculture. The article analyses crop plots within the territory of Ukraine, which unite a set of fields of a particular agricultural enterprise, and on the basis of this analysis, outlines the possibilities of introducing remote sensing systems into agriculture, which is an important step towards creating smart agriculture and ensuring food security. The article highlights important scientific and practical issues that are being studied by both economic geographers, economists, agricultural scientists and geoinformatics.

One of the most important tasks is to analyse remote sensing data, which is the basis for accurate monitoring of crops. The use of vegetation indices such as NDVI makes it possible to estimate plant biomass, identify stress conditions and take timely measures to eliminate them. In turn, an understanding of climate risks can be used to map soil types, identify drought and pest risk zones, and optimize the use of fertilizers and pesticides. The use of remote sensing methods is the basis for developing an effective adaptation strategy for agricultural production in the Podillia region. The introduction of remote sensing systems in agriculture is an important step towards creating smart agriculture and ensuring food security. Precision agriculture uses a number of different methods, the combination of which allows to fully utilize its advantages to optimize crop production processes. Among the methods of precision agriculture are geographic information systems and satellite monitoring and unmanned aerial vehicles (drones). In the context of this article, two methods of precision agriculture are considered: the use of geographic information systems and satellite monitoring. Using the example of a plot of land in Ukraine near Husiatyn, Ternopil Oblast, which unites a number of fields, the article analyses the state of crops. The article demonstrates the informational value of decoding maps of the object of crop plots within the territory of Ukraine, which unite a set of fields of a particular agricultural enterprise. The analysis of remote sensing data demonstrates a significant potential for accurate monitoring of crops. The use of vegetation indices, such as NDVI, allows us to estimate plant biomass, identify stress conditions and take timely measures to eliminate them. In addition, this technology can be used to map soil types, identify drought and pest risk zones, and optimize the use of fertilizers and pesticides. The introduction of remote sensing systems in agriculture is an important step towards creating smart agriculture and ensuring food security. Thus, the analysis of remote sensing data demonstrates significant potential for accurate monitoring of crops. The use of vegetation indices, such as NDVI, allows us to estimate plant biomass, identify stress conditions and take timely measures to eliminate them. In addition, this technology can be used to map soil types, identify drought and pest risk zones, and optimise the use of fertilizers and pesticides. The introduction of remote sensing systems in agriculture is an important step towards creating smart

agriculture and ensuring food security. Among the main limitations and challenges that could be identifying in this area are the high cost of equipment (in the case of unmanned aerial vehicles), the need for qualified specialists and the impact of weather conditions. In the other hand, an affordable technology can be use ding by both small farmers and large agricultural holdings. Theoretical knowledge and practical experience has already been accumulate ding over the decades of this technology's existence and continues to be implement ding in various fields of science and industry. Precision agriculture proves the benefits of using geographic information systems that have already proven themselves in other industries to optimise production process ing, reduce climate impact and cut production costs.

Keywords: *ecosystems, crop production, change analysis, geographic information systems, remote data.*

Постановка науково-практичної проблеми. Суспільство вступило у новий виток свого розвитку який носить назву інформаційна цивілізація. Розвинуті держави світу знаходяться у постінформаційному етапі розвитку. Інформаційне суспільство висуває свої власні виклики. Інформаційні технології пронизують різні сфери діяльності людства. Звичайно науки про Землю та географія найбільш гостро потребує застосування геоінформаційних технологій. Власне географія, природничі науки, економіка та інженерія є полігоном для використання цифрових технологій. У науковому обігу використовується сучасний термін трансдисциплінарність як вища форма зв'язку між дисциплінами.

Зрозуміло, що синтезом досягнень вище перелічених наук є застосування теорії інформаційних систем, географії, картографії та інших геоінформаційних технологій інтегрується у спеціальний науковий напрям. За останні десятиріччя сформувалася нова наука геоінформатика, яка увібрала теоретичні, технологічні та прикладні аспекти роботи з просторово-координованою інформацією.

Провідне місце серед фундаментальних досліджень з теорії геоінформації і просторового аналізу належить технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та методів автоматизованої обробки даних ДЗЗ, що ґрунтуються на супутниковій системі позиціонування. Отже, автоматизоване картографування, комп'ютерне програмування, комп'ютерні науки (комп'ютерна графіка, теорії і технології баз даних, мови програмування), а також дистанційне зондування, просторовий аналіз, географічне та картографічне моделювання.

Актуальність і новизна дослідження. Сучасні виклики людства пов'язані з продовольчою безпекою. У сучасному світі, де населення стрімко зростає, забезпечення продовольчої безпеки стає одним із найважливіших завдань. З огляду на зміни клімату та зростаючий попит на продукти харчування, сільське господарство потребує інноваційних підходів. Одним із таких рішень є точне землеробство, яке поєднує технологічні досягнення з традиційними методами ведення господарства, дозволяючи підвищити ефективність використання ресурсів та

зменшити негативний вплив на довкілля.

Продовольча безпека означає наявність достатньої кількості безпечних і поживних продуктів харчування для всіх людей. Зі збільшенням світового населення та змінами клімату, виклики щодо забезпечення продовольчої безпеки стають все гострішими. Точне землеробство може зіграти ключову роль у вирішенні цієї проблеми. Завдяки точному землеробству фермери можуть підвищити ефективність вирощування культур, що зменшує втрати та збільшує врожайність. Це допомагає забезпечити стабільне постачання продуктів харчування навіть в умовах змінного клімату.

Кліматичні зміни вже мають значний вплив на сільське господарство. Збільшення частоти екстремальних погодних умов, таких як посухи, повені та урагани, ставить під загрозу врожайність і стійкість аграрних систем. Зміни в температурі та режимах опадів також можуть вплинути на сезонність сільськогосподарських культур та розширення зони поширення шкідників і захворювань.

Завдяки точному землеробству фермери можуть адаптувати свої стратегії ведення господарства до мінливих кліматичних умов. Наприклад, використання сенсорних систем для моніторингу вологості ґрунту дозволяє фермерам вчасно реагувати на посухи та ефективніше використовувати водні ресурси. Крім того, аналіз даних щодо температури, вологості та інших параметрів допомагає краще планувати час посіву та збору врожаю, щоб мінімізувати ризики, пов'язані з несприятливими погодними умовами.

Основи точного землеробства. Точне землеробство дозволяє фермерам застосовувати ресурси точніше, враховуючи специфічні умови на кожній ділянці поля. Використання технологій, таких як GPS і датчики, дає можливість створювати карти врожайності та ґрунту, що допомагає визначати, де саме необхідні певні дії. Наприклад, автоматичні системи внесення добрив можуть регулювати кількість необхідного добрива залежно від потреб кожної окремої ділянки поля. Це зменшує витрати на добрива та покращує екологічну стійкість господарства.

Крім того, точне землеробство сприяє

економії води, що є особливо важливим у регіонах з обмеженими водними ресурсами або в умовах зміни клімату. Системи зрошення, які використовують датчики вологості ґрунту, дозволяють подавати воду тільки в ті ділянки, де вона дійсно необхідна. Це знижує витрати на водні ресурси та енергію, необхідну для зрошення.

Отже, точне землеробство не лише підвищує ефективність і врожайність, але й дозволяє значно скоротити витрати на вирощування культур, що робить сільське господарство більш прибутковим та стійким.

Вибір тестових ділянок дослідження на території Поділля зумовлений декількома причинами. По-перше, саме тут є усі природні передумови для вирощування сільськогосподарських культур. По-друге, розуміння застосування точного землеробства може сприяти впровадженню новітніх технологій у сільському господарстві.

Мета статті – проаналізовано ділянки посівів у межах території України, які об'єднують множину полів конкретного агропідприємства й на основі цього аналізу окреслено можливості впровадження систем дистанційного зондування в сільське господарство, що є важливим кроком на шляху до створення розумного сільського господарства та забезпечення продовольчої безпеки.

Зв'язок теми статті з важливими науково-практичними завданнями. Стаття висвітлює важливі науково-практичні проблеми, що досліджуються як економіко-географами, економістами, фахівцями з аграрних наук та геоінформатики. Одним із важливих завдань є аналіз даних дистанційного зондування Землі, що є основою для точного моніторингу стану посівів. Застосування вегетаційних індексів, таких як NDVI дає можливість оцінити біомасу рослин, виявити стресові стани та своєчасно вжити заходів для їх усунення. В свою чергу розуміння кліматичних ризиків може бути використане для картографування типів ґрунтів, визначення зон ризику посухи та шкідників, а також для оптимізації використання добрив та пестицидів. Використання методів дистанційного зондування землі є основою вироблення дієвої стратегії адаптації сільськогосподарського виробництва у Подільському регіоні. Впровадження систем дистанційного зондування в сільське господарство є важливим кроком на шляху до створення розумного сільського господарства та забезпечення продовольчої безпеки.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. Коротко розглянемо стан розроб-

лення цієї проблематики у вітчизняній та зарубіжній науці. Методологічною основою дослідження є праці зарубіжних та вітчизняних вчених з теорії інформаційних систем, географії, картографії та інших геоінформаційних технологій, природничих наук, економіки, інженерних наук, які стали полігоном для використання цифрових технологій. Слід відмітити, що вплив цифровізації, значну увагу приділяли вітчизняні вчені. У геоінформатиці Світличний О., Плотницький С. [4], геоекології Круглов І. [1], економічній літературі Д. Лайон, В.І., Піжук О.І. [2,3], сільському господарстві Трускавецький С. та ін. [5]. У зарубіжній літературі фундаментальними працями з цієї проблематики є публікації Крістофера Баретта у дослідженні продовольчої безпеки [6], П'єра Робера [19], Брюса Еріксона та Скота Фості [8], в галузі точного землеробства.

Методи дослідження. Точне землеробство використовує низку різних методів, поєднання яких дозволяє повноцінно використовувати його переваги для оптимізації процесів вирощування сільськогосподарських культур. Серед методів точного землеробства:

1. Геоінформаційні системи (ГІС) є фундаментом точного землеробства. Вони дозволяють зібрати, обробити, проаналізувати та представити (візуалізувати) просторові дані про поля такі як: тип ґрунту, рельєф, вологість та інші параметри. Також просторові дані, які можна обробити з використанням геоінформаційних систем дозволяють оцінити стан посівів, отримати інформацію про можливі пошкодження, затоплення та інші наслідки негативного впливу зовнішніх факторів на посіви. Серед інших аспектів використання ГІС є можливість уникнення зайвих витрат ресурсів, необхідних для ведення сільського господарства і зниження негативного впливу на довкілля шляхом більш коректного використання добрив та інших засобів для покращення продуктивності полів.

Джерелом даних які можна обробляти з використанням ГІС можуть служити як супутниковий моніторинг, так і безпілотні літальні апарати обладнані засобами отримання даних у розширеному спектрі (мультиспектральні сенсори), що необхідно для проведення аналізу.

2. Супутниковий моніторинг і безпілотні літальні апарати (дрони). Використання супутників та дронів дозволяє отримати високоточні дані про стан полів з використанням спеціального обладнання: камери, сенсори, радары та лідари. З використанням безпілотних літальних апаратів можливо отримати детальні та точні дані, що можуть бути використані у

точному землеробстві. Використання даних супутників дозволяє отримати дані з мінімальними витратами часу та коштів, проте за рахунок зменшення деталізації даних.

Інші методи точного землеробства, що не розглядаються в контексті цієї роботи:

1. Точне внесення добрив і засобів захисту рослин.

Однією з ключових переваг точного землеробства є можливість точно визначати потребу рослин у добривах та засобах захисту. Системи точного внесення дозволяють розподіляти добрива й пестициди тільки в тих зонах, де вони дійсно потрібні. Це значно знижує витрати на хімічні засоби та добрива, а також мінімізує ризики забруднення навколишнього середовища.

2. Зонування полів і змінні норми внесення.

Зонування поля полягає у поділі його на окремі зони з різними характеристиками ґрунту і рослинності. Використання змінних норм внесення дозволяє фермерам адаптувати кількість добрив, води та інших ресурсів під конкретні умови кожної зони. Це допомагає оптимізувати процеси виробництва, зменшити втрати та підвищити врожайність.

3. Системи управління сільськогосподарськими машинами. Сучасні трактори, комбайни та інші сільськогосподарські машини оснащуються системами GPS та автоматичного керування. Це дозволяє точно виконувати агро-технічні операції, зменшуючи помилки та підвищуючи ефективність робіт. Наприклад, трактори можуть автоматично керувати собою, дотримуючись оптимальної траєкторії руху, що знижує витрати палива та знос техніки.

4. Аналіз даних та прогнозування.

Сучасні методи обробки великих даних (Big Data) і машинного навчання дозволяють прогнозувати врожайність, оптимальні терміни посіву та збору врожаю, а також виявляти можливі ризики для урожаю. Це забезпечує більш точне планування і зменшує невизначеність у сільськогосподарському процесі.

У контексті цієї роботи буде описано два методи точного землеробства: використання геоінформаційних систем та супутникового моніторингу.

Методи та методологія осмислення проблеми.

1. Дистанційне зондування Землі як джерело даних для точного землеробства. Дистанційне зондування землі (ДЗЗ) є одним з ключових інструментів сучасного точного землеробства. Технології, які лежать в основі ДЗЗ, дозволяють фермерам та агрономам або іншим організаціям які використовують методи точ-

ного землеробства отримувати велику кількість інформації про стан сільськогосподарських угідь, що сприяє підвищенню ефективності вирощування культур.

Поняття дистанційного зондування землі означає отримання інформації про поверхню землі використовуючи космічні літальні апарати (супутники), а також безпілотні літальні апарати (дрони) обладнані засобами фіксації оптичного та електромагнітного випромінювання, що відбувається від поверхні Землі.

Сучасні засоби отримання інформації обладнані мультиспектральними датчиками і саме вони дозволяють використовувати інформацію з результатів дистанційного зондування Землі у точному землеробстві для оцінки стану посівів.

Фінальним результатом дистанційного зондування Землі є геоприв'язане растрове зображення, що може бути використано у геоінформаційній системі для обробки, аналізу, прогнозування та подальшого прийняття рішень.

Растрове зображення у геоінформаційних системах являє собою цифрову модель аналогового зображення розбиту на регулярну сітку елементів, що називається пікселями кожен піксель має числове значення що відповідає яскравості або відтінку в певній точці простору.

Основні характеристики растрових зображень що можуть бути використані в контексті геоінформаційних систем:

Роздільна здатність. Визначає детальність зображення і залежить від розміру пікселя. Чим менший піксель, тим вища роздільна здатність. Як правило, зображення з нижчою роздільною здатністю можуть охоплювати більшу площу поверхні Землі, проте містити меншу кількість деталей і навпаки – зображення з високою роздільною здатністю охоплюють меншу площу, проте надають значно більшу детальність, що може бути використана у подальшому аналізі.

Геоприв'язка (геореференсінг): Процес прив'язки растрового зображення до географічної або прямокутної систем координат, що дозволяє інтегрувати його з іншими геопросторовими даними. За результатами дистанційного зондування Землі зображення надходять з даними геоприв'язки і можуть бути внесені до геоінформаційних систем без додаткової підготовки.

Атрибути пікселів: Числові значення, що асоціюються з кожним пікселем і можуть представляти різні типи інформації, такі як відбивна здатність, температура, вологість тощо. Ці атрибути зберігаються у вигляді смуг

(Bands). Смуги являють собою канали, об'єднання яких дозволяє візуалізувати растрове зображення, а використання каналів окремо дозволяє працювати над аналізом та обробкою даних растрових зображень.

Наприклад, зображення, що містить три канали з видимого спектра світла - це червоний, синій та зелений. Окремо вони показують інформацію у градаціях сірого кольору де чорний колір як правило позначає нуль і білий колір позначає максимальне значення атрибута пікселя. Об'єднання цих каналів дає можливість показати повноцінне кольорове зображення використання цих каналів окремо дає можливість проводити класифікацію растрових зображень використовуючи інструменти растрової алгебри. Саме за допомогою класифікації здійснюється аналіз стану посівів у точному землеробстві.

Інструменти растрової алгебри доступні у сучасних настільних ГС. Принцип роботи полягає у арифметичних розрахунках значень пікселів для різних зображень, що накладаються одне до одного. Пікселі можуть належати до певних смуг або каналів растрового зображення.

Основними перевагами використання результатів дистанційного зондування землі отриманих з космічних апаратів (супутників):

- Широка площа охоплення.
- Регулярність збору даних без необхідності виїзду на місце.
- Доступність даних з можливістю безоплатно отримувати дані низької та середньої роздільної здатності (10 м/піксель, або 30 м/на піксель), а також на платній основі більш точні дані з роздільною здатністю 1 м/піксель – 5 м/піксель.

Серед недоліків використання даних дистанційного зондування з космічних апаратів є:

- Залежність від погодних умов, зокрема від хмарності.
- Знижена точність результатів при використанні зображень середньої або низької роздільної здатності.

Основні переваги використання безпілотних літальних апаратів (дронів):

- Використання безпілотних літальних апаратів дозволяє отримувати ще більшу роздільну здатність і, відповідно, збільшити точність результатів.
 - Можливість самостійного визначення частоти отримання даних, можливість отримання даних “позачергово”.
 - Висока точність висока роздільна здатність зображень що отримується.
- Недоліки використання дронів:

- Вартість отримання даних, обумовлена вартістю обладнання.

- В залежність від погодних умов в тому числі від хмарності.

2. Спектральний аналіз. Спектральний аналіз передбачає вимірювання відбиття світла від рослин у різних діапазонах електромагнітного спектра. Кожен об'єкт, у тому числі рослини, має унікальний спектральний підпис, який залежить від його фізіологічних та біохімічних характеристик. Наприклад, здорові рослини поглинають більше червоного та синього світла, відбиваючи при цьому більше зеленого, що зумовлює їх характерний колір. Своєю чергою, рослини, які зазнають стресу, змінюють свій спектральний підпис, що дозволяє фіксувати ці зміни за допомогою відповідних приладів.

Особливості кольору, за допомогою яких якого визначається здоров'я рослини пов'язані з наявністю хлорофілу в рослинах.

Відповідно, за кольором рослини можна визначити наявність хлорофілу в листках і таким чином визначити наскільки вона здорова і чи є на рослинах механічні пошкодження або пошкодження іншого характеру.

Хлорофіл поглинає світло переважно в червоній і синій частинах спектра, відбиваючи при цьому зелене світло, що надає рослинам їх характерний зелений колір. У спектральному аналізі це явище використовується для оцінки стану рослин через вимірювання рівня відбиття та поглинання світла в різних діапазонах спектра. Зміни в концентрації хлорофілу, що відбуваються внаслідок стресових умов, таких як нестача води, хвороби або пошкодження шкідниками, можуть бути зафіксовані шляхом аналізу спектральних характеристик рослин.

Одним із найпоширеніших інструментів, що використовується для оцінки стану рослин за допомогою спектрального аналізу, є *Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)*. *NDVI* розраховується на основі співвідношення між поглинанням червоного світла (яке активно поглинається хлорофілом) і відбиттям ближнього інфрачервоного світла (яке відбивається від рослинних клітин). Високі значення *NDVI* свідчать про високий вміст хлорофілу, що є ознакою здорових, активно зростаючих рослин. Низькі значення *NDVI* можуть вказувати на пошкодження або стрес, пов'язаний зі зниженням фотосинтетичної активності.

Спектральний аналіз дозволяє виявляти навіть незначні зміни у вмісті хлорофілу, що робить його незамінним інструментом для ранньої діагностики проблем у розвитку рослин. Загальнодоступними джерелами мультиспект-

ральних даних для дистанційного зондування Землі, що можуть бути використані для оцінки стану посівів є ресурси:

Sentinel Hub (Copernicus): Це європейська ініціатива, яка містить дані супутників *Sentinel-1*, *Sentinel-2* та інших. *Sentinel-2*, зокрема, забезпечує дані з високою роздільною здатністю для моніторингу рослинності. Дані доступні безоплатно на порталі *Copernicus Data Space Ecosystem*.

Landsat (NASA/USGS): Програма **Landsat** надає багаторічні дані про земну поверхню. *Landsat 8* та *Landsat 9* є сучасними версіями, які забезпечують дані з роздільною здатністю 30 метрів і підходять для оцінки стану рослинності. Дані доступні через платформу *Earth Explorer*.

MODIS (NASA): Супутники *Terra* і *Aqua* оснащені сенсорами *MODIS*, які забезпечують дані з меншою роздільною здатністю, але з високою частотою знімання. Це дозволяє відстежувати динаміку стану посівів в часі. Дані можна знайти через портал *NASA Worldview*.

Planet Labs: Приватна компанія, яка надає зображення з високою роздільною здатністю з супутників *Planet Scope*. Вони підходять для точкового моніторингу невеликих ділянок. Дані доступні через платні підписки.

Google Earth Engine: Хмарна платформа, яка надає доступ до великих обсягів супутникових даних, включаючи *Sentinel*, *Landsat*, *MODIS* та інші. Ця платформа дозволяє виконувати складні обчислення та аналіз даних дистанційного зондування безпосередньо в хмарі.

Radiant Earth Foundation: Ця платформа надає безоплатний доступ до супутникових зображень і аналітичних інструментів для моніторингу сільськогосподарських угідь та інших екосистем.

Agro Monitoring: Комерційна платформа, яка надає спеціалізовані сервіси для аграріїв, включаючи моніторинг стану посівів, прогнозування врожайності та інші аналітичні інструменти.

Індекси оцінки стану рослини (посівів). У рамках спектрального аналізу використовуються спеціалізовані індекси (Один з них -

NDVI вже був описаний вище).

Індекси – це наступний крок обробки даних після отримання з джерел дистанційного зондування землі вони розраховуються з використанням геоінформаційних систем та спектрального аналізу.

Для отримання індексів вегетативності необхідно використовувати результати дистанційного зондування Землі у вигляді растрових зображень що містять додаткові смуги (Bands) з інформацією, що надходить з мульти-спектральних сенсорів космічних апаратів та дронів.

Мультиспектральні сенсори отримують інформацію у видимому діапазоні (червоний синій та зелений), а також у ближньої інфрачервоної області спектра невидимого світла - *NIR* (Near-Infrared).

NIR - це діапазон інфрачервоного електромагнітного спектра, що охоплює хвилі від 780 нм до 2500 нм.

Спектральний аналіз здійснюється засобами класифікації растрових зображень, що отримуються в результаті дистанційного зондування Землі з комбінуванням різних смуг растрових зображень. Виконуючи розрахунки з використанням спеціальних формул отримуються індекси, що використовуються у подальшому аналізі. Нижче наведено у таблиці 1. значення деяких індексів з коротким описом їх призначення.

NDVI – це один із найбільш поширених індексів, що використовуються для оцінки рослинного покриття. Він розраховується на основі різниці між ближнім інфрачервоним (*NIR*) і червоним (*Red*) спектрами світла, що відбиваються від рослин. Формула виглядає так:

$$NDVI = (NIR + Red) \div (NIR - Red) \quad (1)$$

Значення *NDVI* варіюються від -1 до 1:

- Значення, близькі до 1, вказують на густий і здоровий рослинний покрив.
- Значення, близькі до 0, можуть свідчити про відсутність рослинності.
- Від'ємні значення свідчать про присутність неживих об'єктів (вода, будівлі).

Таблиця 1

Основні індекси вегетативності*

Найменування індексів	Повна назва індексів		Пояснення	Смуги, які використовуються	Використання
NDVI	Normalized Difference Vegetation	Нормалізований диференційний	Найпоширеніший індекс для оцінки біомаси	Червона (RED), Ближня	Моніторинг посух, деградації земель, зростання

	Index	ий індекс рослинності.	та здоров'я рослинності. Чутливий до хлорофілу.	інфрачервон а (NIR)	рослинності.
ENDVI	Enhanced Normalized Difference Vegetation Index	Покращений нормалізований диференційний індекс рослинності.	Аналогічний до NDVI, покращена чутливість до змін у вегетації та зменшення впливу атмосферних явищ	Червона (RED), Ближня інфрачервон а (NIR)	Моніторинг посух, деградації земель, зростання рослинності.
EVI	Enhanced Vegetation Index	Покращений індекс рослинності.	Модифікація NDVI, менш чутлива до атмосферних ефектів і насичення сигналу.	Червона (RED), Ближня інфрачервон а (NIR), Синя (BLUE)	Моніторинг густих рослинних покривів, лісів.
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index	Індекс рослинності, скоригований на ґрунт.	Покращена версія SAVI, менш чутлива до змін вологості ґрунту.	Червона (RED), Ближня інфрачервон а (NIR)	Моніторинг областей з оголеною землею, посушливих регіонів.

* Складено авторами на основі літературних джерел [6-18]

ENDVI – це покращена версія *NDVI*, яка включає додаткову інформацію з зеленого спектра (Green) для більш точної оцінки рослинності. Формула виглядає так:

$$ENDVI = (NIR + Green) + 2 \times Red \div (NIR + Green) - 2 \times Red \quad (2)$$

ENDVI дозволяє точніше оцінити стан рослинності, особливо в умовах, де звичайний *NDVI* може бути менш ефективним, наприклад, при високій щільності рослинного покриву.

EVI – це індекс, що був розроблений для покращення чутливості до густої рослинності та зменшення впливу атмосферних умов. Формула для *EVI* включає коефіцієнти корекції:

$$EVI = 2.5 \times ((NIR - Red) \div (NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)) \quad (3)$$

Де:

- *C1* і *C2* – коефіцієнти для корекції аерозольного розсіювання,
- *L* – коефіцієнт для корекції фонового шуму.

EVI є більш надійним у випадках, коли *NDVI* може бути насиченим або спотвореним через атмосферні умови.

SAVI – це індекс, який враховує вплив ґрунту на відображення світла, що особливо важливо в умовах, коли рослинний покрив не є дуже густим. Формула для *SAVI* виглядає так:

$$SAVI = ((NIR - Red) \div (NIR + Red + L)) \times (1 + L) \quad (4)$$

Де *L* – це коригуючий коефіцієнт, який зазвичай приймає значення 0.5, але може змінюватися залежно від умов місцевості.

SAVI корисний для аналізу рослинності в областях із низькою щільністю рослинного покриву, де результати розрахунку *NDVI* можуть бути спотворені через домінуючий вплив ґрунту.

Наданий перелік - це частина індексів. Загальна кількість налічує близько 519. Деякі з них подібні за своїми формулами та призначенням, але можуть бути використані з урахуванням додаткових умов, наприклад – щільність рослинного покриву і необхідність вилучення світла, що відбивається від ґрунту тощо.

Інструментом за допомогою якого можна проводити аналіз і оцінку стану посівів є геоінформаційні системи.

Дані з результатів дистанційного зондування землі можуть бути внесені до геоінформаційних систем і показані на карті. Враховуючи той факт, що результати надходять з геоприв'язкою - одразу після внесення можна проводити обробку цих результатів, проведення аналізів зокрема розрахунку індексів вегета-

тивності для подальшого прийняття рішень.

Комбінуючи растрові дані дистанційного зондування землі та векторні дані які можна створювати з використанням інформаційних систем можливо створювати інформативні плани полів, виокремити проблемні місця і визначити ділянки що потребують особливої уваги спеціалістів фермерських господарств.

Предмет дослідження. Для демонстрації аналізу стану посівів було обрано ділянку на території України. Об'єкт дослідження:

- ділянка об'єднує множину полів;
- знаходиться приблизно 7 км на північний захід від міста Гусятин Тернопільської області;

- дата даних на основі яких проводилось дослідження - 31 липня 2024 року.

Точні координати кутів ділянки дослідження у системі координат EPSG:3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator наведено у таблиці 2. деяких індексів з коротким описом їх призначення.

Таблиця 2

Точні координати кутів ділянки дослідження у системі координат EPSG:3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator*

Параметр	Значення
X _{min}	2902624.75
Y _{min}	6290149.5
X _{max}	2913386.75
Y _{max}	6299393.5

* Розраховані авторами

Для цього дослідження з метою демонстрації можливих похибок до області було включено фрагмент зображення, що містить хмару.

Для обробки даних було використано програмне забезпечення QGIS. Це забезпечення з відкритим кодом, що відповідає стандартам OGC (Open Geospatial Consortium).

Sentinel-2 – це супутникова місія Європейського Союзу (ESA), яка є частиною програми Copernicus. Основна мета цієї місії – забезпечення високоякісними оптичними зображеннями для моніторингу земної поверхні. Супутники Sentinel-2 оснащені мультиспектральними сенсорами, які дозволяють отримувати дані в різних діапазонах електромагнітного спектра. Це дає змогу проводити детальний аналіз земного покриття, рослинності, водних ресурсів та інших параметрів.

L2A - це рівень обробки супутникових даних Sentinel-2. Він означає "Level 2A Atmospheric Correction" і являє собою набір даних, який пройшов ряд етапів обробки, включаючи:

1) Геометричну корекцію: Зображення приводяться до географічної проєкції, що дозволяє точно прив'язувати їх до місцевості.

2) Атмосферну корекцію: Зображення коригуються з урахуванням впливу атмосфери, що дозволяє отримати більш точні дані про поверхню Землі.

3) Обчислення відбивної здатності: Отримуються значення відбивної здатності по-

верхні в різних спектральних каналах, що є важливим параметром для багатьох застосувань.

Отримання та обробка даних дистанційного зондування Землі космічними апаратами для проведення оцінки стану посівів.

Дані було отримані з ресурсу "Copernicus Data Space Ecosystem", що надає дані космічних апаратів Sentinel, Landsat та інших у відкритому доступі.

Copernicus Data Space Ecosystem - є всеосяжною європейською ініціативою, яка надає безоплатний та відкритий доступ до великого обсягу геопросторових даних, отриманих з супутників Європейського Союзу (ESA) та NASA. Цей портал слугує фундаментальною інфраструктурою для широкого спектра застосувань, від моніторингу довкілля до планування міст та управління надзвичайними ситуаціями.

Растрові дані постачаються з таким набором смуг (Bands) наведено у таблиці 3.

Для отримання даних використовувався браузер платформи *Copernicus Data Space Ecosystem* див. рис. 1-3. За допомогою інструментів браузера було вказано параметри пошуку:

- Супутник: Sentinel-2.
- Рівень даних: L2A.
- Максимальний відсоток хмарності на зображенні: 15%.
- Область або територія що має бути

включена до результату: Тернопільська об-
ласть.

- Діапазон дат серед якого буде здійс-
нюватися пошук: з 01.07.2024 по 31.07.2024.

Таблиця 3

Растрові дані постачаються з таким набором смуг (Bands)*

Назва	Опис		Роздільна здатність
AOT	Aerosol Optical Thickness map, based on Sen2Cor processor	Показник оптичної товщини аерозолів в атмосфері	10 м / піксель
B02	Blue, 492.4 nm (S2A), 492.1 nm (S2B)	Синій колір	10 м / піксель
B03	Green, 559.8 nm (S2A), 559.0 nm (S2B)	Зелений колір	10 м / піксель
B04	Green, 559.8 nm (S2A), 559.0 nm (S2B)	Червоний колір	10 м / піксель
B08	NIR, 832.8 nm (S2A), 833.0 nm (S2B)	Ближній інфрачервоний	10 м / піксель
TCI	True Color Image	Зображення з комбінованими смужками синього, зеленого та червоного кольорів, що відображає істинні кольори.	10 м / піксель

* Складено авторами на основі літературних джерел [6-18]

Після завершення запиту до системи було отримано результати і завантажено необхідний фрагмент.

Результати містять:

1) Набір растрових зображень у форматі JP2 включно з інформацією про геоприв'язку.

2) Супутні файли та дані, що поста-
чаються разом із растровими зображеннями (Метадані, інформація DATASTRIP, додаткові файли та презентаційні файли для демонстрації результатів у браузері). Ці дані не викорис-
товувались у дослідженні.

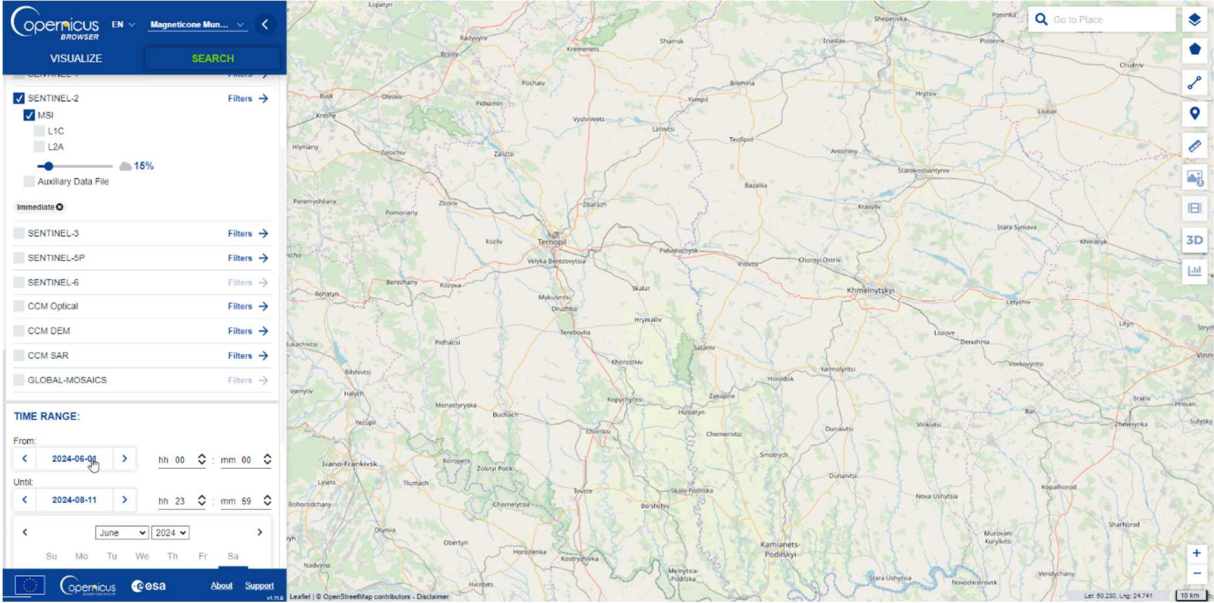


Рис. 1. Налаштування параметрів запиту на порталі Copernicus Browser

Отримані дані було внесено до геоінформаційної системи для подальшої обробки.

Серед даних що були внесені до системи це растрові зображення відповідних смуг:

- B02.

- B03.

- B04.

- B08.

TCI (для оглядової оцінки результатів).

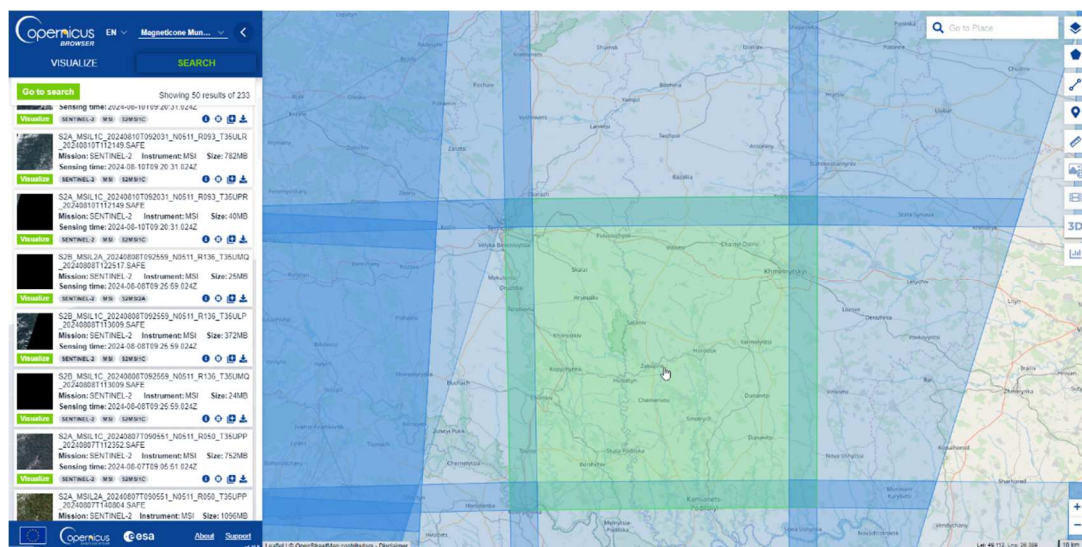


Рис. 2. Демонстрація території, яку охоплює зображення

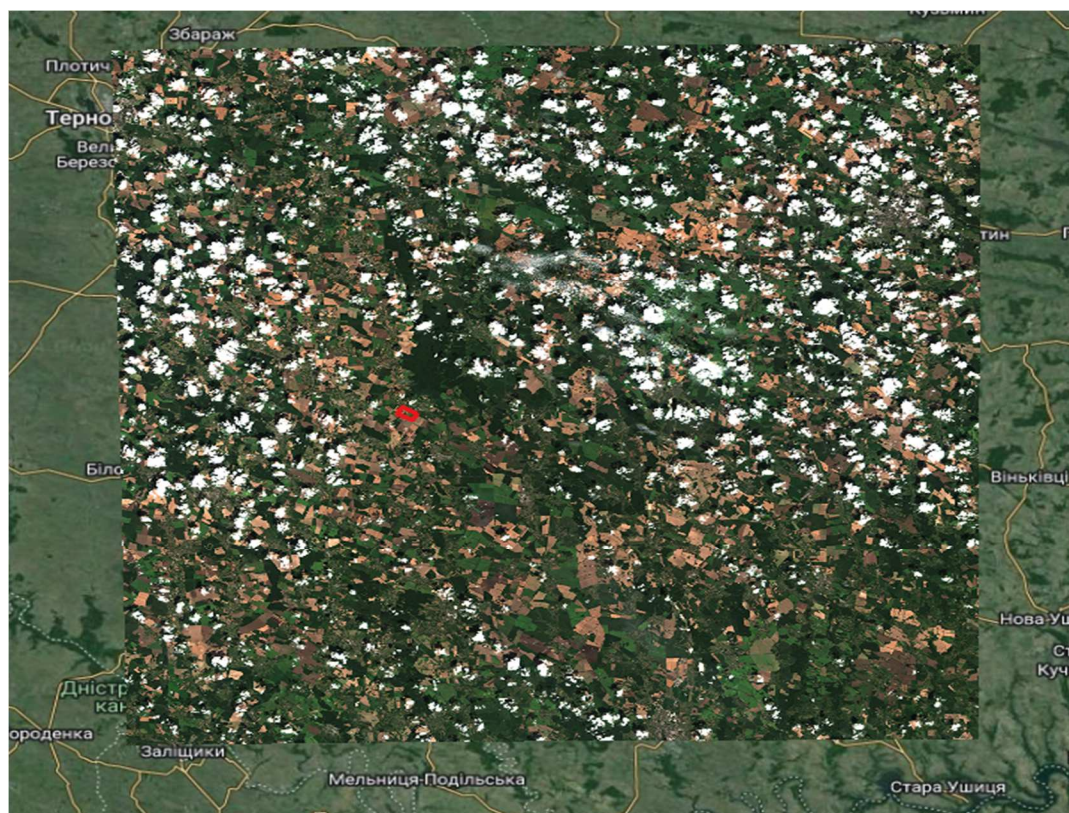


Рис. 3. Результат дистанційного зондування землі з використанням супутника Sentinel-2 показаний в істинних кольорах. Червоним позначено розташування області дослідження. Зображення містить інформацію про геоприв'язку і точно відтворює розташування і враховує кривизну поверхні Землі

У рамках внесення даних до QGIS (див. рис. 4-5) було здійснено ряд підготовчих процедур:

1) Додана картографічна основа *Google Maps* для орієнтування в просторі системи.

2) Внесені растрові зображення необхідні для розрахунку. Растровим зображенням надано спеціальний псевдонім, що дозволяє скоротити їхню назву та зробити розрахунки зручнішими зменшивши ймовірність помилки

при введенні даних для розрахунків.

ження для пришвидшення процесу та оптимізації використання ресурсів комп'ютера.

3) Здійснено обмеження області дослід-

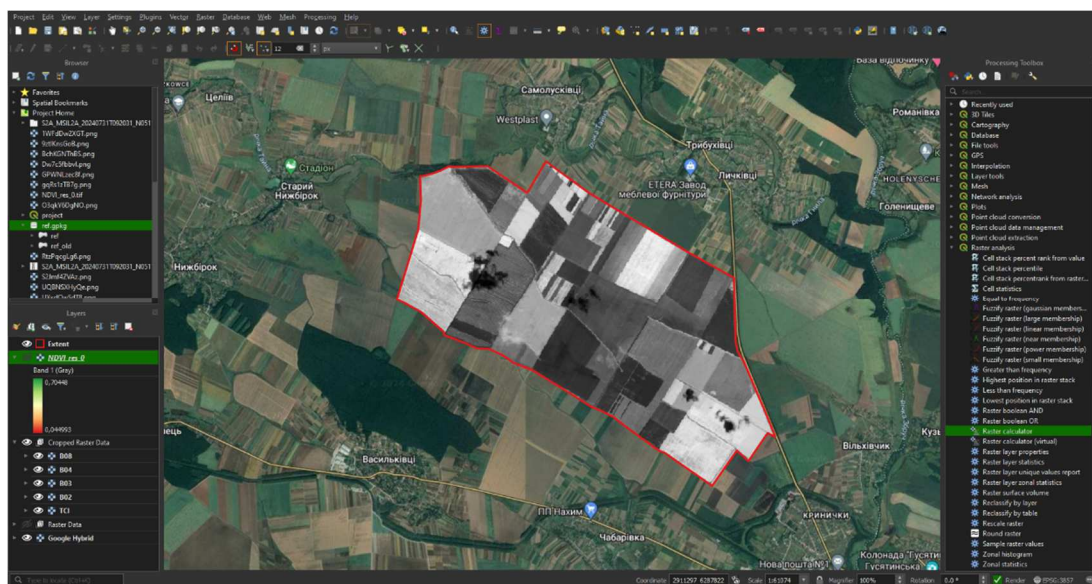
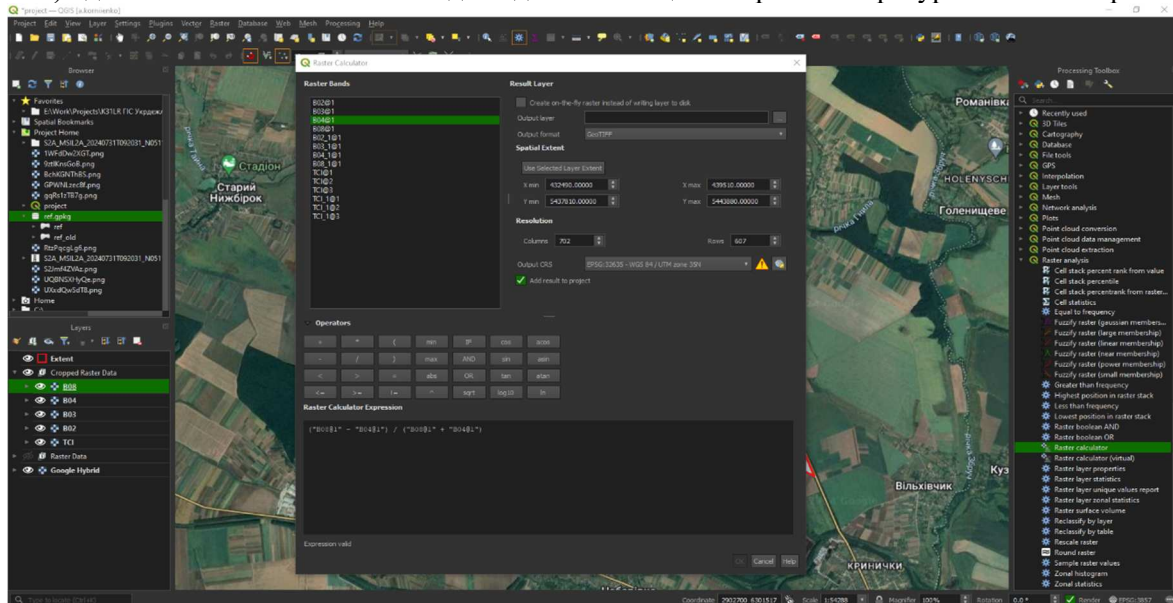


Рис. 4. Підготовлене до дослідження середовище QGIS



Рис. 5. Вигляд карти з областю дослідження. На області чітко видно наявність хмари - це зроблено для демонстрації можливих похибок через хмарність

Наступний крок - розрахунок з використанням растрової алгебри. Для цього було використано інструмент Raster Math, який поставляється разом з пакетом QGIS, де було введено формулу для розрахунку:

$$("B08@1" - "B04@1") / ("B08@1" + "B04@1") \quad (5)$$

Підготовка до розрахунку NDVI в середовищі QGIS. У результаті отримано растро-

ве зображення в градаціях сірого. Для покращення візуалізації даних їх було класифіковано.

У результаті класифікації було отримано такі висновки (див. рис. 6-7.):

1) Індеси коливаються від 0.04 до 0.7. Найменше значення означає відсутність рослинності або її стан. Максимальне значення NDVI - 1.0, що може досягати в окремих випадках.



Рис. 6. Результат розрахунку NDVI



Рис. 7. Відповідність кольорів на результаті аналізу до значень NDVI. На зображенні кольори інтерполюються

2) Максимальне значення (в зелених кольорах - від 0.55 до 0.7) показує максимальну присутність рослинності та вказує на те що вона, ймовірно, здорова.

3) Жовті кольори (значення від 0.21 до 0.54) вказують на рослинність, що ще проростає і не досягла високого рівня фотосинтезу. Жовті кольори, або середні значення NDVI також можуть вказувати на негативні стани рослин та пошкодження.

4) Червоні кольори (від 0 до 0.2), як правило, вказують на відсутність рослин.

5) Значення менше нуля відсутні (вони вказують на неорганічні об'єкти, наприклад - асфальтні дороги, будівлі тощо). Це може

свідчити про те, що до області дослідження вони не потрапили.

Також на зображенні є місця з помилковими значеннями індексів, що виникли через наявність хмар. Хмарність, а також тіні від хмар завжди вказує або мінімальні або нульові значення індексу вегетативності NDVI, або інших індексів, через це необхідно використовувати зображення з мінімум хмарності або без.

Висновки та перспективи використання результатів дослідження. Отже, аналіз даних дистанційного зондування землі демонструє значний потенціал для точного моніторингу стану посівів. Застосування вегетаційних

індексів, таких як NDVI, дозволяє оцінити біомасу рослин, виявити стресові стани та своєчасно вжити заходів для їх усунення. Крім того, ця технологія може бути використана для картографування типів ґрунтів, визначення зон ризику посухи та шкідників, а також для оптимізації використання добрив та пестицидів. Впровадження систем дистанційного зондування в сільське господарство є важливим кроком на шляху до створення розумного сільського господарства та забезпечення продовольчої безпеки.

Серед основних обмежень та викликів які можна було окреслити в цій галузі є висока вартість обладнання (в разі використання безпілотних літальних апаратів), необхідність квалі-

фікованих фахівців та вплив погодних умов.

З іншого боку – це доступна технологія що може бути використана як дрібними фермерами фермерськими господарствами, так і великими агрохолдингами. Теоретичні знання та практичний досвід вже накопичений за десятки років існування цієї технології і продовжує впроваджуватись серед різних галузей науки та промисловості.

Точне землеробство доводить користь використання геоінформаційних систем, що вже проявили себе в інших галузях для оптимізації процесів виробництва зменшення впливу на клімат та зменшення витрат у виробництві.

Література:

1. Круглов І. Трансдисциплінарна геоекологія. Монографія: Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 292 с.
2. Лайон Д. Інформаційне суспільство: проблеми та ілюзії // *Сучасна зарубіжна соціальна філософія*. Київ, 1996. С.362-380.
3. Піжук О.І. Цифрова трансформація економіки України: обмеження та можливості : моногр. Ірпінь : Ун-т держ. фіск. служби України, 2020. 504 с.
4. Світличний О.О., Плотницький С.В. Основи геоінформатики: навч. посібник. Суми: ВТК «Університетська книга», 2006. 295 с.
5. Трускавецький С., Биндич Т., Коляда Л., Вяткін К., Шерстюк О. (2020). Використання даних супутникової зйомки в системах точного землеробства. Науковий журнал «Інженерія природокористування», (1(7)), 29-35. вилучено із <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/108>
6. Barrett, C. B. (2020). Overcoming Global Food Security Challenges through Science and Solidarity. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(2), 422–447. <https://doi.org/10.1111/ajae.12160>
7. Chan, Y. K., Koo, V. C., Choong, E. H. K., & Lim, C. S. (2021). The drone based hyperspectral Imaging system for precision agriculture. *NVEO - NATURAL VOLATILES & ESSENTIAL OILS JOURNAL* | NVEO, 5561–5573. <https://nveo.org/index.php/journal/article/view/1703>
8. Erickson, B., & Fausti, S. W. (2021). The role of precision agriculture in food security. *Agronomy Journal*, 113(6), 4455–4462. <https://doi.org/10.1002/agj2.20919>
9. Garcia, S. N., Osburn, B. I., & Jay-Russell, M. T. (2020). One health for food safety, food security, and sustainable food production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00001>
10. Georgi, C., Spengler, D., Itzerott, S., & Kleinschmit, B. (2017). Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data. *Precision Agriculture*, 19(4), 684–707. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9549-y>
11. Giofandi, E., Munibah, K., Kraugusteeliana, K., Novalinda, A., & Sekarrini, C. (2023). The comparison of vector and raster data for the calculation of landscape environment using a geographic Information System approach. *IT JOURNAL RESEARCH AND DEVELOPMENT*, 7(2), 209–219. <https://doi.org/10.25299/itjrd.2023.10878>
12. Guo, J., Li, X., Li, Z., Hu, L., Yang, G., Zhao, C., Fairbairn, D., Watson, D., & Ge, M. (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19(5), 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>
13. Jin, X., Yu, X., Wang, X., Bai, Y., Su, T., & Kong, J. (2020). Deep Learning Predictor for sustainable Precision agriculture based on Internet of Things system. *Sustainability*, 12(4), 1433. <https://doi.org/10.3390/su12041433>
14. Pascucci S., Pignatti S., Casa, R., Darvishzadeh, R., & Huang, W. (2020). Special issue “Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation.” *Remote Sensing*, 12(21), 3665. <https://doi.org/10.3390/rs12213665>
15. Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The role of remote sensing data and methods in a modern approach to fertilization in precision agriculture. *Remote Sensing*, 14(3), 778. <https://doi.org/10.3390/rs14030778>
16. Segarra J., Buchaillet 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>
17. Sood, Kunal & Singh, Sharda & Rana, Ranbir & Rana, Aditya & Kalia, Vaibhav & Kaushal, Arun. (2015). Application of GIS in precision agriculture. 10.13140/RG.2.1.2221.3368.
18. Zhang, X., & Zhang, Q. (2016). Monitoring interannual variation in global crop yield using long-term AVHRR and MODIS observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 191–205. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.010>
19. Robert, P. C. (2001). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. *Springer eBooks*, 692. https://doi.org/10.1007/0-306-47624-x_335

References:

1. Kruhlov I. Transdystyplinarna heeokolohiia. Monohrafiia: Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2020. 292 s.
2. Laion D. Informatsiine suspilstvo: problemy ta iluзии // Suchasna zarubizhna sotsialna filosofii. Kyiv, 1996. S.362-380.
3. Pizhuk O.I. Tsyfrova transformatsiia ekonomiky Ukrainy: obmezheniia ta mozhlyvosti : monohr. Irpin : Un-t derzh. fisk. sluzhby Ukrainy, 2020. 504 s.
4. Svitlychnyi O.O., Plotnitskyi S.V. Osnovy heoinformatyky: navch. posibnyk. Sumy: VTK «Universytetska knyha», 2006. 295 s.
5. Truskavetskyi S., Byndych T., Koliada L., Viatkin K., Sherstiuk O. (2020). Vykorystannia danykh suputnykovoi ziomky v systemakh tochnoho zemlerobstva. Naukovyi zhurnal «Inzheneriia pryrodokorystuvannia», (1(7)), 29-35. vylucheno iz <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/108>

6. Barrett, C. B. (2020). Overcoming Global Food Security Challenges through Science and Solidarity. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(2), 422–447. <https://doi.org/10.1111/ajae.12160>
7. Chan, Y. K., Koo, V. C., Choong, E. H. K., & Lim, C. S. (2021). The drone based hyperspectral Imaging system for precision agriculture. *NVEO - NATURAL VOLATILES & ESSENTIAL OILS JOURNAL* | NVEO, 5561–5573. <https://nveo.org/index.php/journal/article/view/1703>
8. Erickson, B., & Fausti, S. W. (2021). The role of precision agriculture in food security. *Agronomy Journal*, 113(6), 4455–4462. <https://doi.org/10.1002/agj2.20919>
9. Garcia, S. N., Osburn, B. I., & Jay-Russell, M. T. (2020). One health for food safety, food security, and sustainable food production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00001>
10. Georgi, C., Spengler, D., Itzerott, S., & Kleinschmit, B. (2017). Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data. *Precision Agriculture*, 19(4), 684–707. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9549-y>
11. Giofandi, E., Munibah, K., Kraugusteeliana, K., Novalinda, A., & Sekarrini, C. (2023). The comparison of vector and raster data for the calculation of landscape environment using a geographic Information System approach. *IT JOURNAL RESEARCH AND DEVELOPMENT*, 7(2), 209–219. <https://doi.org/10.25299/itjrd.2023.10878>
12. Guo, J., Li, X., Li, Z., Hu, L., Yang, G., Zhao, C., Fairbairn, D., Watson, D., & Ge, M. (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19(5), 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>
13. Jin, X., Yu, X., Wang, X., Bai, Y., Su, T., & Kong, J. (2020). Deep Learning Predictor for sustainable Precision agriculture based on Internet of Things system. *Sustainability*, 12(4), 1433. <https://doi.org/10.3390/su12041433>
14. Pascucci S., Pignatti S., Casa, R., Darvishzadeh, R., & Huang, W. (2020). Special issue “Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation.” *Remote Sensing*, 12(21), 3665. <https://doi.org/10.3390/rs12213665>
15. Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The role of remote sensing data and methods in a modern approach to fertilization in precision agriculture. *Remote Sensing*, 14(3), 778. <https://doi.org/10.3390/rs14030778>
16. Segarra J., Buchailot 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>
17. Sood, Kunal & Singh, Sharda & Rana, Ranbir & Rana, Aditya & Kalia, Vaibhav & Kaushal, Arun. (2015). Application of GIS in precision agriculture. 10.13140/RG.2.1.2221.3368.
18. Zhang, X., & Zhang, Q. (2016). Monitoring interannual variation in global crop yield using long-term AVHRR and MODIS observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 191–205. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.010>
19. Robert, P. C. (2001). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. Springer eBooks, 692. https://doi.org/10.1007/0-306-47624-x_335

Надійшла до редакції 03.06.2025р.