

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.87.368-387

УДК 528.46

д.т.н., професор **Куліковська О.Є.**,
kulikovskaja13@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2168-1445,
к.е.н., доцент **Колодій П.П.**,
pavlokolodiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9847-9520,
д.е.н., доцент **Ступень Р.М.**,
romomas@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4951-2838,
Львівський національний університет природокористування

РОЗКРИТТЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ ТОЧНОЇ ОЦІНКИ ПОСІВІВ

Описано теоретичні та технічні аспекти отримання інформації про стан посівів зернових культур на основі матеріалів космічного мультиспектрального знімання середньої дозвільної здатності. Виконано експериментальні дослідження з метою створення цифрових індексних карт для сільськогосподарських угідь. Доведено високу ефективність методики дослідження стану полів за мультиспектральними космічними знімками із використанням продуктів рівня L1C і більш високого рівня опрацювання L2A, показано особливості та обмеження застосування методики.

Ключові слова: землекористування; інноваційні методи; космічний моніторинг сільськогосподарських угідь; мультиспектральні знімки; карта історії поля; карта вегетаційних індексів; гістограма.

Проблема і її зв'язок із науковими і практичними завданнями. Космічний моніторинг полів відіграє дедалі більшу роль як для технології вирощування рослинної продукції, так і в супутній діяльності – формування аграрної політики, управління галуззю, забезпечення потреб страхового бізнесу тощо. Сільськогосподарська галузь ефективно застосовує сервіси контролю полів за даними дистанційного зондування Землі [1, 5]. На першому місці тут є моніторинг сільськогосподарських культур та прогнозування урожайності. Багато агропромислових корпорацій використовують матеріали високого і середньої дозвільної здатності і більш того самостійно планують виводити власні супутники дистанційного зондування Землі. Актуальним є вивчення, дослідження методики опрацювання та поводження із супутниковими даними.

В умовах сьогодення необхідною умовою організації ефективного сільськогосподарського виробництва є можливість оперативного отримання та точної інтерпретації інформації про розподіл і використання земельних ресурсів, стан сільськогосподарських угідь та динаміку фенологічного розвитку

насаджень і посівів. Сучасне аграрне підприємство будь-якої спеціалізації рільництва може перебувати на сучасному технологічному рівні та бути конкурентним лише при умові впровадження цифрових технологій, сучасних методів збору та опрацювання інформації про динамічні параметри територій, де відбувається вирощування культур, мати змогу постійно контролювати фенологічні процеси росту і визрівання культур.

Означені положення є важливою частиною світового тренду інновацій, зокрема точного землеробства. Його основна функція полягає у покращенні результатів зрошування культур завдяки впровадженню цифрових роботизованих технологій обробки ґрунту та збору врожаю, індивідуалізованому підході у виборі агротехнічних технологій на різних ділянках поля, постійному контролю (моніторингу) їхнього стану та умов зовнішнього середовища.

Супутниковий моніторинг – діюча система спостереження за об'єктами у часових рамках, визначених завданнями дослідження, побудована на основі систем супутникової навігації, супутникового знімального обладнання, технологій обчислювальної техніки та геоінформатики. Реалізація систем супутникового моніторингу відбувається у руслі розвитку наукових і технічних дисциплін в науках про Землю. У теперішній час спостерігаються дві тенденції цього розвитку: спеціалізація й інтеграція. Після окреслення нових принципів отримання знань, розвитку нових технологій часто відбувається відділення нових, вузько спеціалізованих дисциплін. Проте, як тільки ці дисципліни досягають певного розвитку, їх досягнення виявляються затребуваними в інших галузях, настає етап інтеграції. Супутниковий моніторинг посівів сільськогосподарських культур має на меті відстежувати позитивні та негативні зміни у динаміці розвитку рослин шляхом спостереження за змінами індексу вегетації, отриманих за допомогою спектрального аналізу супутникових знімків середнього і високого розрізнення, на визначених територіях для окремих сільськогосподарських культур. У зв'язку із зазначеним, постає задача удосконалення або вивчення практичних можливостей застосування сучасних продуктів для одержання найкращих, обґрунтованих результатів аналізу землекористування та рослинного покриву.

Метою роботи є розгляд теоретичних і технічних аспектів отримання інформації про стан посівів зернових культур на основі матеріалів космічного багатоспектрального знімання середньої дозвільної здатності для аналізу вегетаційних етапів їх розвитку.

Аналіз останніх публікацій. В останні десятиліття велись активні наукові дослідження в галузі розроблення оперативних і точних методів моніторингу посівів сільськогосподарських культур на основі супутникових

технологій [1, 16]. Існуючі супутникові угруповання високої (просторове розрізнення – до 10 м) і надвисокої (субметрової) роздільної здатності працюють у широкому спектральному діапазоні та дозволяють отримувати достатньо точні дані про площі насаджень і посівів окремих сільськогосподарських культур [11].

В науках про Землю такими основними дисциплінами є геоінформаційні системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та система глобального позиціонування і навігації (ГНСС). Супутниковий моніторинг посівів сільськогосподарських культур та визначення параметрів їхнього стану доцільно здійснювати на основі інтеграції існуючих систем збору й спостереження, даних дистанційного зондування в програмному середовищі геоінформаційної системи. ГІС надають програмні інструменти для обробки, відображення і поширення даних про площі, стан, біометричні характеристики посівів [1, 12]. У роботах [5, 14, 15, 17, 19] вказано на інтеграцію даних GPS, ДЗЗ і ГІС при проведенні моніторингу стану навколишнього середовища, як на одну з актуальних задач.

Із 2015 року після запуску Європейським космічним агентством багатофункційного супутникового сузір'я Sentinel відбувся суттєвий стрибок у доступності космічних даних саме для моніторингових програм. Ця подія також активізувала пошук рішень для конкретних потреб аграрної галузі в Україні [2].

На основі супутникових даних створено і активно функціонують аналітичні інтернет-платформи, які надають сервісно-інформаційні послуги аграріям щодо стану їхніх полів та формують рекомендації щодо корекції технології вирощування тих чи інших культур. Крім оперативної інформації надаються такі інформаційні продукти як історії полів – на основі накопичених архівів супутникових даних [8, 13]. Архіви супутникових зображень середньої дозвільної здатності доступні користувачам за останні декілька років, а архіви даних MODIS – понад 20 років.

Найбільш розвинені і практично апробовані в різних країнах є супутникові методи моніторингу площ посіву озимих сільськогосподарських культур [9, 11]. Ці методи дають надійні оцінки та широко застосовуються не тільки окремими виробниками аграрної продукції, а й урядовими структурами та міжнародними організаціями. Так, за оцінками незалежних дослідників, станом на середину грудня 2023 року в Україні зернових зібрали 57,57 млн. тон, олійних – 20,74 млн. тон.

Для порівняння, у 2022 році станом на 17 грудня 44,9 млн. тон. Також оцінено втрати врожаю на землях, де відбуваються військові дії. В NASA Harvest підрахували, що тільки цього року Україна зазнала економічних збитків у розмірі близько \$2 млрд грн. (рис. 1). через втрату врожаю [4].

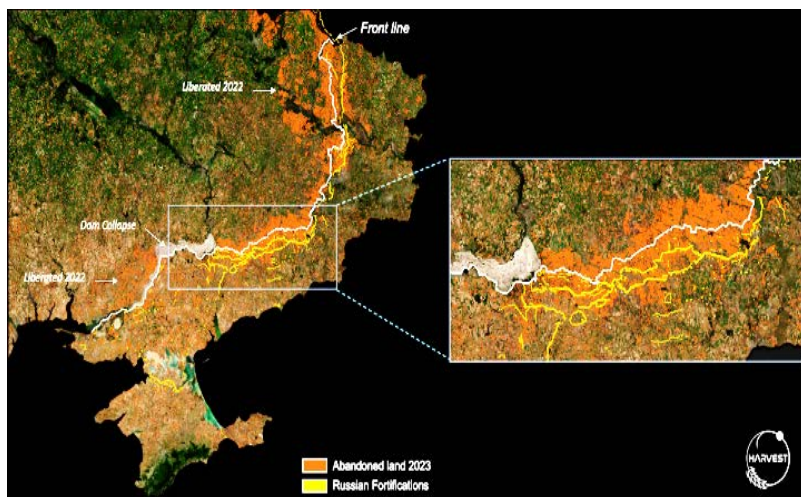


Рис. 1. Результати супутникового моніторингу: пошкоджені та покинуті угіддя внаслідок військових дій

Аналіз супутникових зображень дистанційного зондування дозволили NASA Harvest кількісно оцінювати вплив військових дій на сільське господарство. Кількість зібраної пшениці у 2023 році, становить 6,42 млн тон.

Також супутниковий моніторинг дозволив виявити те, що пошкоджені покинуті угіддя складають 2,1-2,8 млн га. Ці занедбані поля складають від 6,5 до 8,5% від загальної площі посівних площ України і розташовані вздовж лінії фронту в смузі 30-50км.

У роботі [18] автори проаналізували використання даних дистанційного зондування для моніторингу врожайності рису. Для цього використовували великий набір даних по врожайності рису на полі. Результати показали дуже різну кореляцію спектральних смуг NIR із кінцевою врожайністю залежно від сорту рису і фенології на різних етапах вегетації. Зроблено висновок про те, що агрономічні рішення в управлінні культурами із застосуванням даних супутникових знімків мають вирішальне значення для підвищення врожайності, тим самим просуваючи науку точного землеробства.

Виклад матеріалу і результати. Цикл супутникового моніторингу полів починається від передпосівної підготовки поля та закінчується безпосередньо перед збором врожаю [3]. Його етапи окреслено на рис. 2.

Для вивчення продуктивності рослин, об'ємів біомаси та інтенсивності фотосинтезу отримують серію похідних зображень із вхідних супутникових знімків. Для цього застосовують спеціальні алгоритми, аргументами яких є спектральні коефіцієнти яскравості пікселів знімків, отриманих в окремих зонах спектра [8, 16].

Інфрачервоний діапазон є найбільш важливим для діагностики стану рослин, оскільки саме в двох його ділянках яскравості відбитого світла відображають важливі фізичні процеси: ближній інфрачервоний (NIR) (700-1400 нм) – відбивні характеристики залежать від структури клітин;

короткохвильовий інфрачервоний (1400-2000 нм) – відбивні характеристики залежать від вмісту води в тканинах.

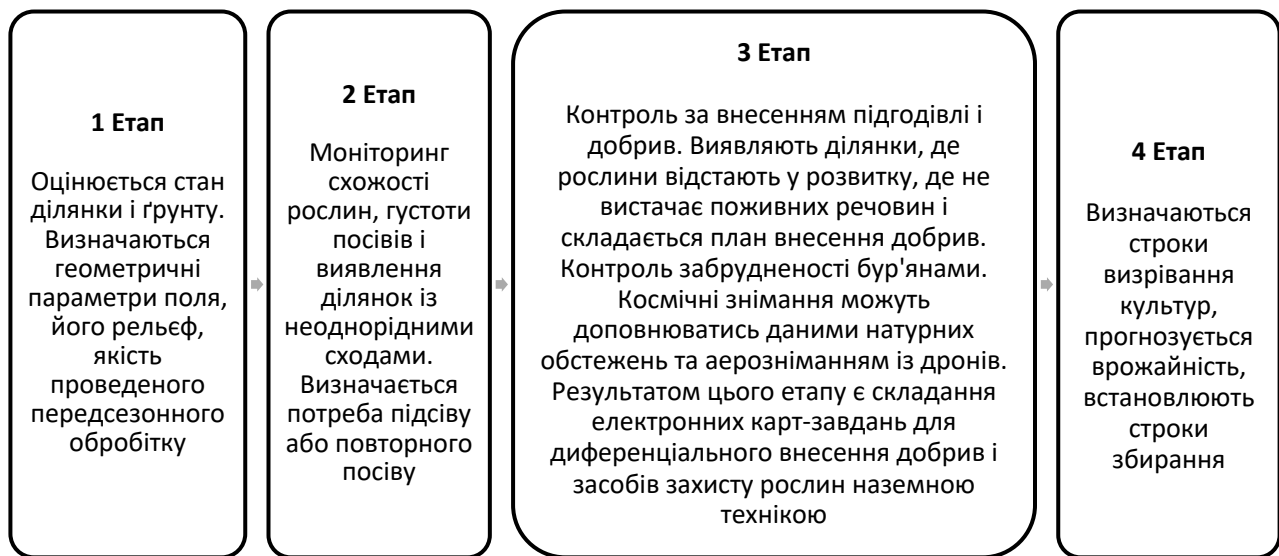


Рис. 2. Основні етапи супутникового моніторингу

Таблиця 1.

Показники й інструменти для оцінювання стану озимих культур у різні періоди проведення моніторингу

Рекомендовані показники й інструменти	Період моніторингу			
	Осінь	Зима	Весна	Літо
Супутникові зображення, в тому числі індексні	+	+	+	+
Температура і опади	+	+	+	+
Гідротермічний коефіцієнт і волога в ґрунті	+	–	+	+
Глибина снігового покриву	–	+	–	–
Сезонна динаміка NDVI	+	–	+	+
Карти озимих культур, створені за супутниковими даними	+	–	+	±
Карта відхилень NDVI від багаторічної норми	+	–	+	±
Карта відхилень максимумів NDVI від багаторічних максимумів	–	–	–	+

Видимий оптичний діапазон є більш складним для моніторингу через відсутність власного випромінювання в ньому рослинних об'єктів. Формування СКЯ залежить від зовнішнього освітлення, також є перспективним для дистанційної діагностики стану рослин: синій канал (400-499 нм), знаходиться під сильним впливом поглинання хлорофілом і каротиноїдами; синьо-зелений канал (500-549 нм) призводить до зеленого піку відбиття за 550 нм; червоний канал (650-699 нм) пов'язаний із сильним поглинанням енергії хлорофілом.

Особливість багатоканальних знімків полягає в тому, що знаючи особливості хвильових характеристик каналів і їх комбінацій, можна отримати

необхідну інформацію про властивості різних географічних і екологічних об'єктів. Етап аналізу даних ДЗЗ, головним завданням якого є розпізнавання та ідентифікація об'єктів, виявлених на знімку, називається дешифруванням зображення. Наприклад, для супутникових знімків середньої дозвільної здатності можна виділити такі п'ять груп основних комбінацій каналів, за якими будують синтезовані зображення, придатні для дешифрування об'єктів на знімках у таких комбінаціях: «природні кольори»; «штучні кольори» з переважанням червоного кольору; «штучні кольори» з переважанням жовтого кольору; «штучні кольори» з переважанням зеленого кольору; інфрачервоні канали з переважанням синього кольору [15].

Кількісною характеристикою стану посівів і насаджень є індексна карта.

Найбільшого поширення серед багатьох існуючих варіантів розрахунку індексів набув NDVI (Normalised Vegetation Index, нормалізований вегетаційний індекс). Обчислення NDVI засноване на методі математичного порівняння кількості поглинутого рослиною чи часткою ґрунту видимого червоного світла і відбитого цією рослиною чи ґрунтом ближнього інфрачервоного світла. Пігмент хлорофілу здорової рослини поглинає більшу кількість видимого червоного світла, а клітинна структура рослин відбиває більшу кількість у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру. Це означає, що висока фотосинтетична активність, яка традиційно асоціюється з розвинутою, щільною рослинністю, буде менше відбивати світло в діапазоні і більше – в ближньому інфрачервоному. Порівнюючи ці значення, можна достовірно оцінювати стан рослинного покриву, виділяючи його серед інших природних і штучних типів покриву.

В певній точці зображення NDVI — це відношення різниці інтенсивності відбитого світла в інфрачервоному (nir) і червоному (red) діапазонах спектра до їх суми:

$$NDVI = nir - red / nir + red.$$

За цією формулою обчислення індексу здійснюють послідовно для всіх пікселів космічного знімка, отримуючи в підсумку індексну карту.

На ринку послуг супутникового моніторингу часто пропонують і моніторинг із використанням БПЛА. У такому випадку моніторинг більш детальний, але потребує суттєво вищих затрат.

Компанія Smart Farming пропонує послуги супутникового моніторингу і надає клієнту NDVI-карти стану посівів, векторні карти із зазначенням зон неоднорідності, звіт із окремих культур. Гравець світового рівня на ринку щодо надання послуг супутникового моніторингу сільськогосподарських територій – компанія Scorio за координатами полів клієнта та інформацією про вирощувані культури, методи обробки ґрунту, внесені добрива та ін., а також

ретроспективну інформацію (сівозміна, врожайність та ін.) надає індивідуальну модель аналізу із щоденним оновленням прогнозу. Типовим для сервісних компаній продуктом є складання карт вегетації, контроль сходів, моніторинг фізичних пошкоджень, аналіз використання земельного банку на основі супутникового моніторингу та ін. Деякі компанії є розробникам зручних додатків для смартфонів та планшетів. Наприклад Харвіо пропонує продукт «Field Manager», функціонал якого може скласти рекомендації щодо управління польовими роботами та надає інформацію про виявлені ризики на основі опрацювання супутникових знімків, допомагає визначити час та норму внесення добрив і засобів захисту, формує карти диференційованого їх внесення. Система ідентифікує та розраховує можливість виникнення характерних захворювань та шкідників для пшениці, ячменю, та інших базових культур.

Європейське космічне агентство є розробником масштабних проектів у галузі сільського господарства. Таким, зокрема, є проект Sentinels for Common Agricultural Policy – Sen4CAP спрямований на надання європейським і національним зацікавленим сторонам підтверджених алгоритмів, продуктів, робочих процесів і найкращих практик для моніторингу сільського господарства, що має значення для управління. Проект приділятиме особливу увагу наданню доказів того, як інформація, отримана Sentinel, може підтримувати модернізацію та спрощення адміністрування, зокрема підтвердження декларацій на субсидіювання сільгоспвиробників. Програмний продукт доступний пересічним користувачам для апробації, але через суворі вимоги до комп'ютерного забезпечення поки не знайшов широкого поширення в дослідницьких колах.

Нижче наводяться результати проведення експерименту з виконання аналізу продуктів Sentinel-2 різних рівнів опрацювання.

Європейське космічне агентство через власні інтернет-сервіси (ESA) надає користувачам програмне забезпечення для створення за найчастіше розповсюджуваними продуктами рівня L1C, а також продукти більш високого рівня опрацювання L2A. Наприклад, таким програмним засобом є процесор Sen2Cor, який можна використовувати в автономному режимі. Розглянемо структуру процесора Sen2Cor, набори вхідних та вихідних даних. Це дозволить сформулювати уявлення про можливості програмного забезпечення та інформаційну цінність супутникових знімків Sentinel-2 для застосування в геоінформаційних системах аграрного спрямування. Продукти Sentinel-2 рівнів опрацювання L1C і L2A надаються у виді гранул фіксованого розміру для кожного рівня. Кожен продукт рівнів 1C та 2A складається з фрагментів 110x110 км² у картографічній проекції UTM/WGS84. Землю поділено на

попередньо визначений набір плиток, визначених у проекції UTM/WGS84 із кроком 100 км.



Рис. 3. Ідентифікація гранули продуктів Sentinel-2 рівнів опрацювання L1C та L2A на територію м. Дубляни

Проте кожна плитка має площу 110x110 км², щоб забезпечити перекриття із сусідньою плиткою (рис. 3). Зображення обох рівнів ортотрансформовані для виправлення геометричних спотворень із застосуванням цифрової моделі рельєфу. Продукт Level-2A надає зображення поверхневого відбиття (SR) із атмосферою корекцією, що отримані з відповідних продуктів Level-1C.

Атмосферна корекція зображень SENTINEL-2 Level-2A включає корекцію розсіювання молекул повітря (розсіювання Релея), ефектів поглинання та розсіювання атмосферних газів, зокрема озону, кисню та водяної пари, а також корекцію поглинання та розсіювання за рахунок частинок аерозолу. Продукти рівня 2A систематично генеруються з 2018 року. Продукти Level-1C містять дані з коефіцієнтами відбиття на верхній межі атмосфери в 13 каналах із різною дозвільною здатністю із параметрами для перетворення їх у випромінювання. Використовується така формула для перетворення коефіцієнта відбиття в яскравість: $\text{випромінювання} = \text{відбивна здатність} \cdot \cos(\text{радіани } (SunZenithAngle)) \cdot \text{сонячне випромінювання} \cdot U/\pi$. Додатково надаються маски суходолу і водних поверхонь, хмарні маски і дані ECMWF (стовп озону, водяної пари і середній атмосферний тиск на рівні моря). Структура продукту показана на рис. 4.

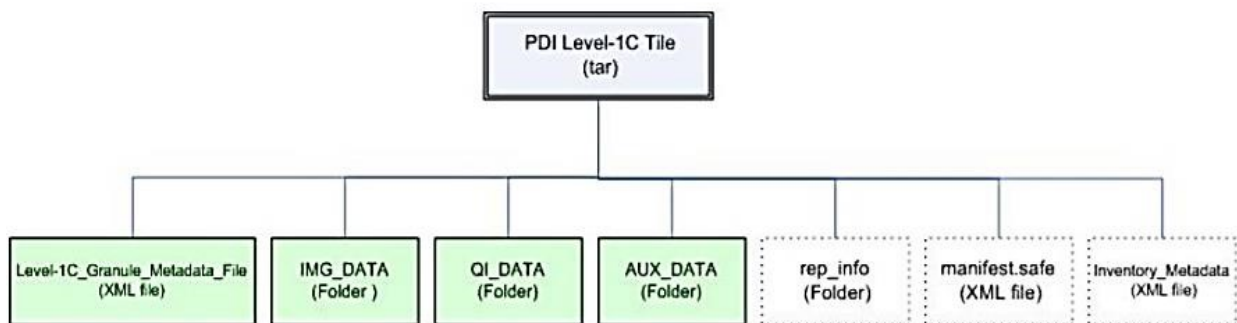


Рис. 4. Файлова структура продукту L1C [16]

Директорія плитки рівня 1С містить таку інформацію: 1) Level-1C_Tile_Metadata_File: файл метаданих XML, що містить рівень інформації та посилається на всі елементи продукту, що становлять плитку; 2) IMG_DATA: папка, що містить файли даних зображень, стиснуті за допомогою алгоритму JPEG2000, по одному файлу на канал; 3) QI_DATA: папка, що містить звіти XML, включаючи перевірки якості, файли маски GML та файл JP2 PCI; 4) AUX_DATA: папка з ECMWF дані перераховані у проекції UTM; 5) Inventory_Metadata.xml: файл, що містить метадані, необхідні для інвентаризації PDI; 6) manifest.safe: XML - файл, що містить метадані безпеки; 6) rep_info: папка, що містить доступну схему XSD, яка перевіряє компоненти PDI; 7) Level-2A подає відображення на нижній межі атмосфери, тоді як 1С – на верхній межі атмосфери. Продуктом другого рівня є набір таких даних для різної дозвільної здатності: синтез у природних кольорах; коефіцієнти відбиття на нижній межі атмосфери; карта аерозольної оптичної товщини; карта водяної пари; результат класифікації (12 класів); показники ймовірності снігу/льоду; показники ймовірності хмар.

Основна відмінність L2A від L1C полягає в тому, що папка IMG_DATA містить три каталоги: по одному для кожної роздільної здатності на 60 м, 20 м і 10 м. Плитка класифікації сцени доступна в корені папки IMAGE_DATA на 20 м або 60 м залежно від обраного користувачем типу обробки.

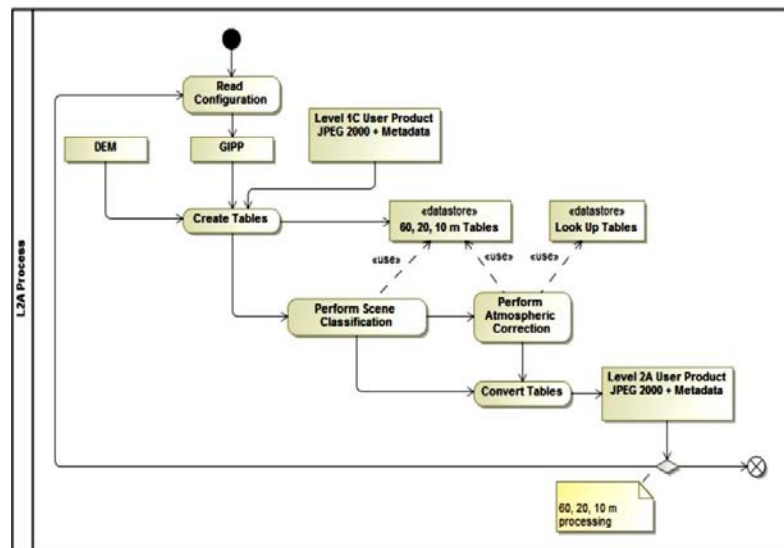


Рис. 5. Схема роботи плагіна Sen2Cor [16]

Для отримання продуктів другого рівня Європейське космічне агентство використовує плагін Sen2Cor. Ця програма використовує два головні допоміжні джерела даних: радіаційні таблиці та цифрову модель висот (DEM) і складається з 10 основних модулів.

На рис. 5. наведено графічну схему виконання модуля L2A_Process, починаючи з читання конфігураційних даних до отримання продукту другого рівня L2A. Під час опрацювання гранул верхнього рівня атмосфери (TOA) – їх перетворюють в продукт відбиття рівня Level-2A за такою схемою, яка показана на рис. 6.

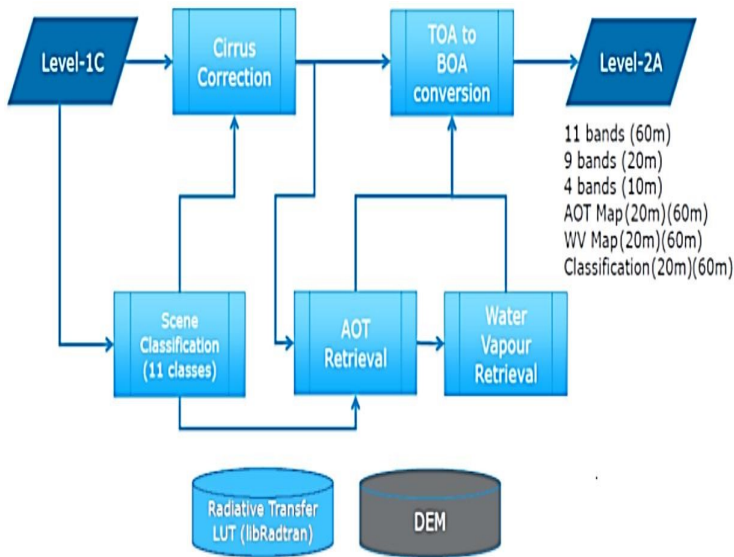


Рис. 6. Блок-схема алгоритму перетворення продуктів із рівня L1C в L2A [22]

Алгоритм модуля класифікації сцен дозволяє виявляти хмари, сніг, тіні хмар та генерувати класифікаційну карту, яка складається з 4 різних класів для хмар, 4 класів для тіней хмар, рослинності, відкритого ґрунту, води та снігу. Алгоритм заснований на серії порогових тестів, які використовують як вхідні дані відображення верхньої частини атмосфери від спектральних смуг Sentinel-2.

На рис. 7 показано результати класифікації сцени (праворуч) на основі зміни вхідних даних (ліворуч). Подано дванадцять різних класів.

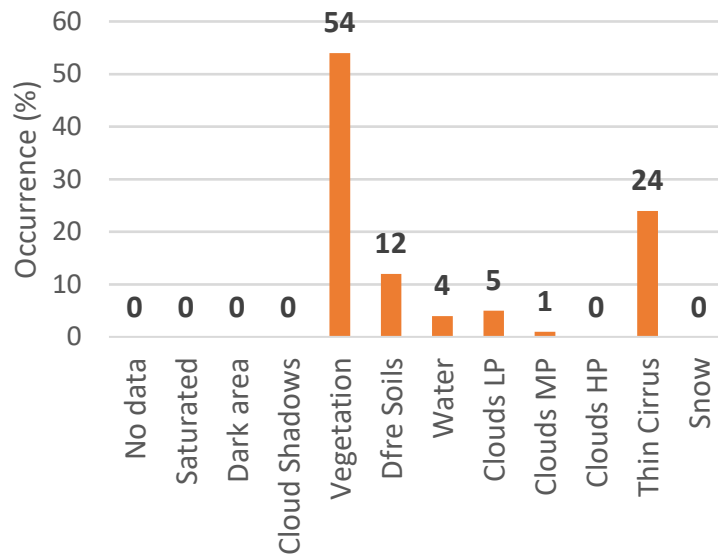
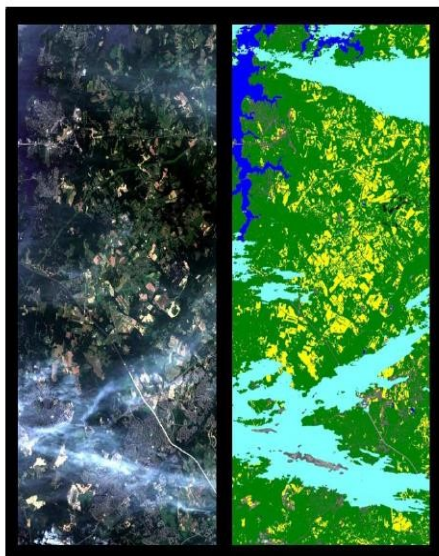


Рис. 7. Результат класифікації сцени плагіном Sen2Cor

За описаною методою нами перетворено знімок, отриманий 17 квітня 2023 року (гранула 34UGA) і поширюваний через сервіс-браузер за адресом <https://dataspace.copernicus.eu/browser/> [10]. Результати перетворення можна оцінити візуально. На рис. 8 показано фрагмент зображення каналу B04 Red до та після перетворення.

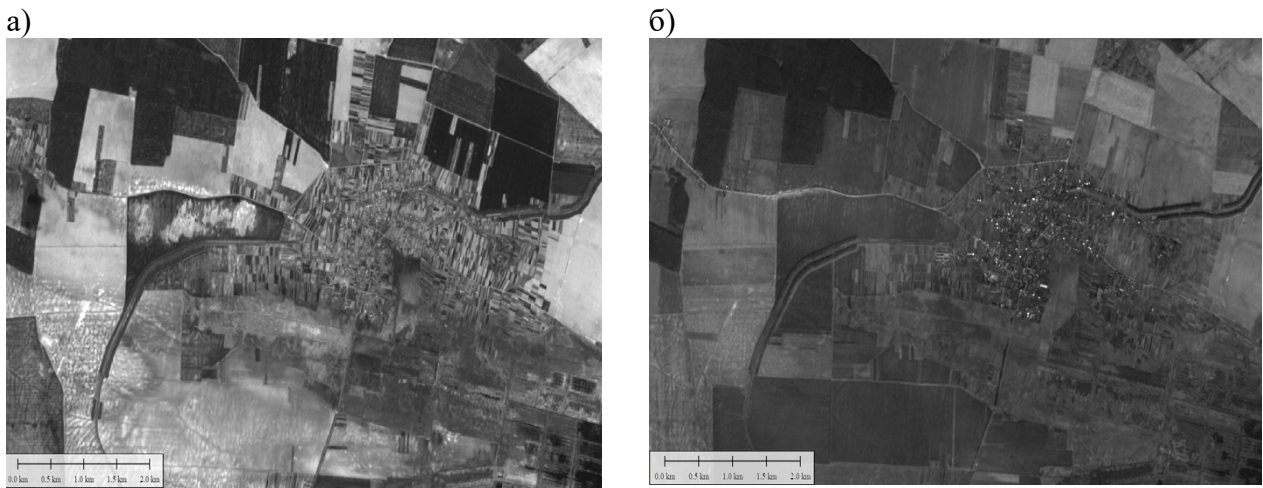


Рис. 8. Результати опрацювання знімків: рівень 1С (а), рівень 2А (б) на основі 1С (канал В04, с. Стоянів, Львівська область)

Треба зазначити, що більше предметним є результат корекції при візуалізації знімків, синтезованих у натуральних кольорах зображень (рис. 9).



Рис. 9. Результати візуалізації в природних кольорах (компонент В04 - В03 - В02): а) до опрацювання, б) після опрацювання

Очевидно, результати атмосферної корекції знімків повинні позитивно проявитись не тільки при візуалізації зображень, а й при отриманні аналітичних продуктів, таких як індексні карти для вивчення рослинності.

Наступний етап експериментальних робіт пов'язаний зі створенням індексних карт NDVI за отриманими на попередньому етапі продуктами рівня опрацювання L2A. Програмним інструментом, який було використано є калькулятор растрів геоінформаційної системи Global Mapper (рис. 10). Калькулятор дозволяє самостійно складати вирази для обчислень, в яких аргументами є одноканальні растри. Для задачі розрахунку індексу NDVI такими растрами є файли каналів NIR (канал № 8) Red (канал № 4).

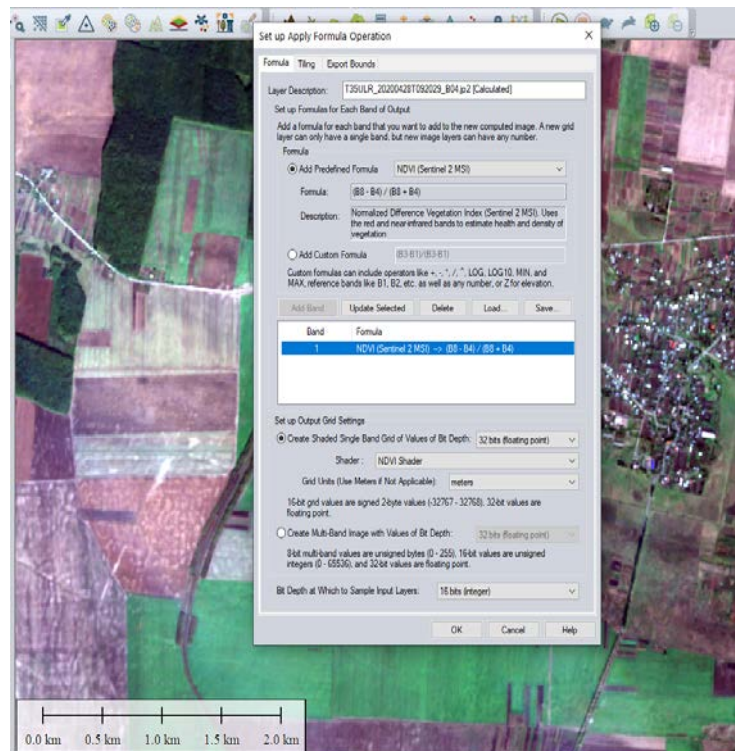


Рис. 10. Діалог побудови карт вегетаційного індексу NDVI

Для порівняння результатів виконаної нами атмосферної корекції індексні карти будувались для вхідного L1C та опрацьованого L2A рівнів (рис. 11).

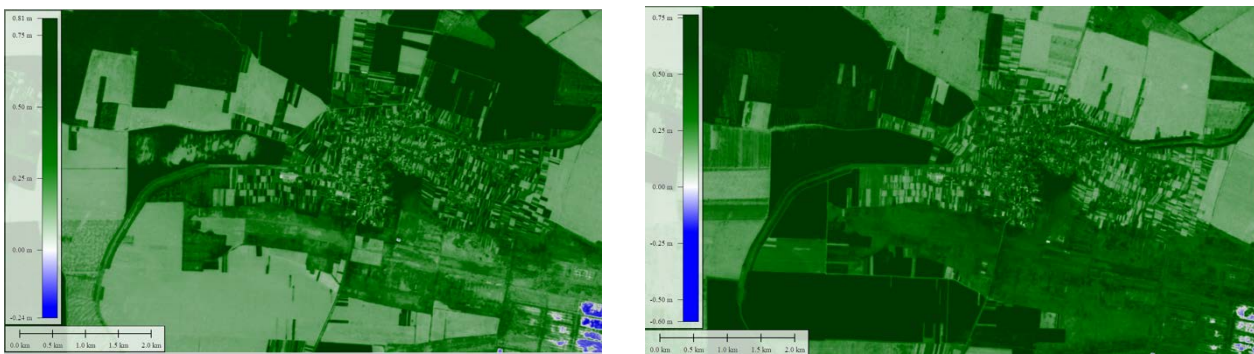


Рис. 11. Карти вегетаційного індексу NDVI. Сільськогосподарські угіддя в с. Стоянів (ліворуч – створена за продуктом L1C, праворуч – за продуктом L2A)

В даній роботі досліджувались поля посіву озимих сезону 2022/2023 року площею 7,56 км². Обраний сервіс програми Copernicus [10] надає зручні засоби для вибору продуктів із розділенням їх типів, джерел, часу та умов отримання. Для одержання статистичної інформації тільки про конкретне поле, створено його полігональний контур, вибрано тип джерела даних – в нашому випадку це продукт Sentinel-2 L2A, допустимий відсоток хмарності (обрано 15%) та тип картографічного шару NDVI (рис. 12).

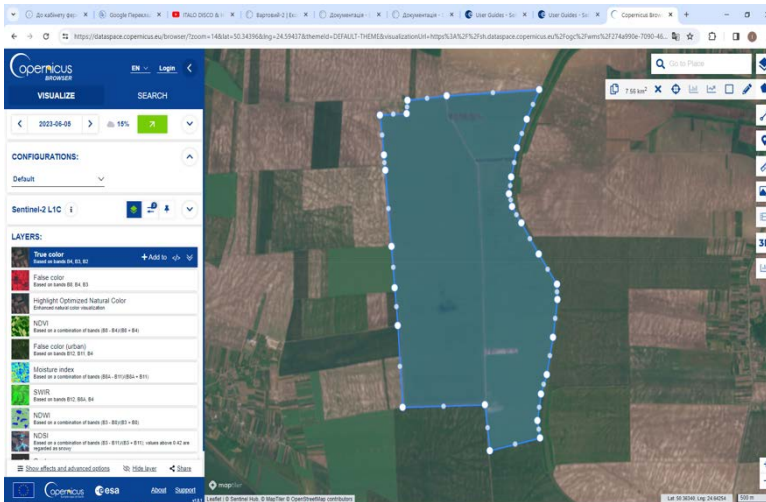


Рис. 12. Територія дослідного поля в браузері програми Copernicus [10]

На кожну з цих дат отримуємо індексну карту і статистичні параметри розподілу величини вегетаційного індексу в межах окресленого поля.

1. 17-03-2023. На цю дату практично тільки посіви озимих класифікуються як вегетуюча рослинність на сільськогосподарських угіддях. Власне, оцінка NDVI рівнів Sentinel-2 L1C та Sentinel-2 L2A подається як карти та гістограми розподілу частот (рис. 13).

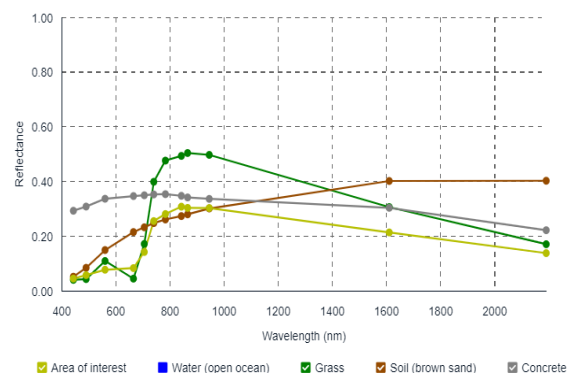
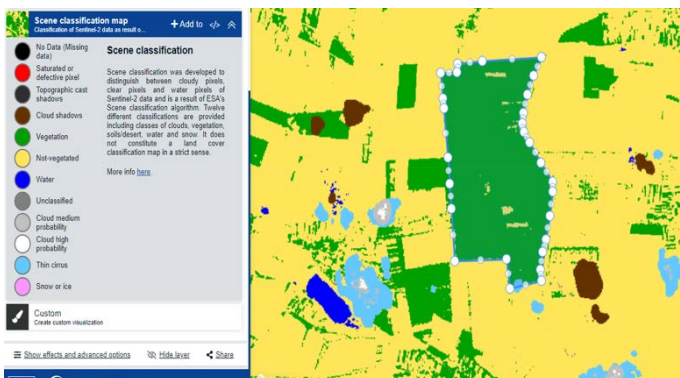


Рис. 13. Класифікація ландшафту в районі на початок дослідження

Відразу можемо зауважити, що індекси, розраховані за продуктом L2A мають дещо менші абсолютні значення (рис. 14).

2. 21-04-2023. На третю декаду квітня спостерігаємо різке зростання частоти високих значень індексу. Індексна карта за продуктом L2A демонструє наявність ділянки поля з явно випереджуючим ростом біомаси (рис. 15).

3. 21-05-2023. На третю декаду травня спостерігаємо практичне вирівнювання гістограм рівнів L1C та L2A. Це можна пояснити високою прозорістю атмосфери, сухим повітрям у кінці травня – вплив стану атмосфери на знімки несуттєвий. Індекс зростає, отже рослини продовжують набирати біомасу (рис. 16).

Часовий ряд будувався шляхом відбору безхмарних знімків у період із березня до кінця липня. Виявилися придатними знімки, які отримані на такі дати: 17-03-2023; 21-04-2023; 21-05-2023; 23-06-2023; 17-07-2023. Для порівняння впливу на результат розрахунку збиралась статистика на обидва рівні – Sentinel-2 L1C та Sentinel-2 L2A.



Рис. 14. Індексні карти поля пшениці станом на 17-03-2023

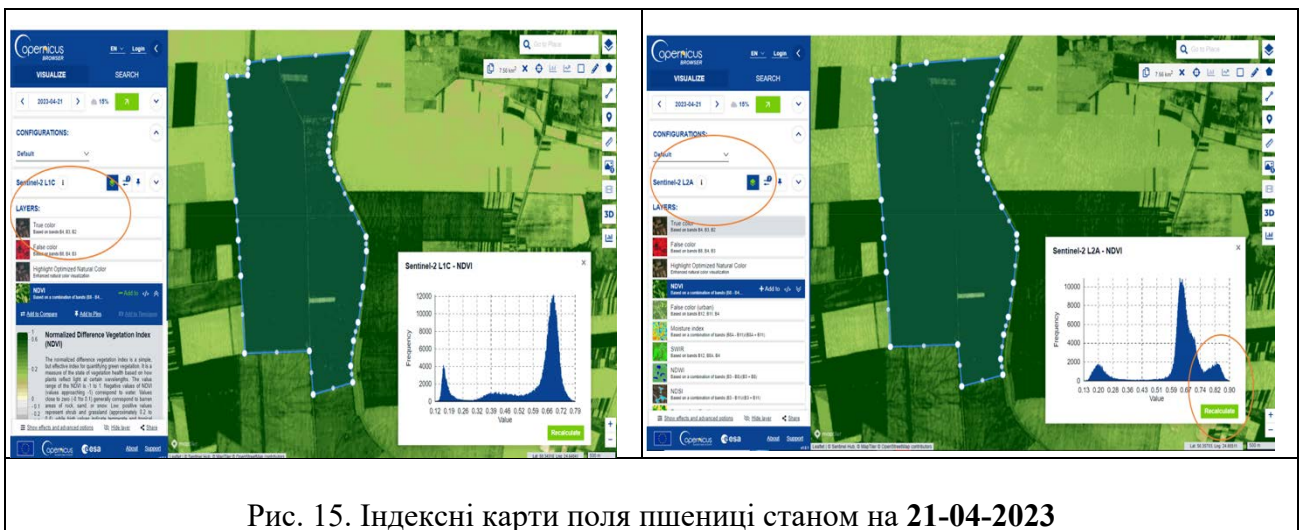
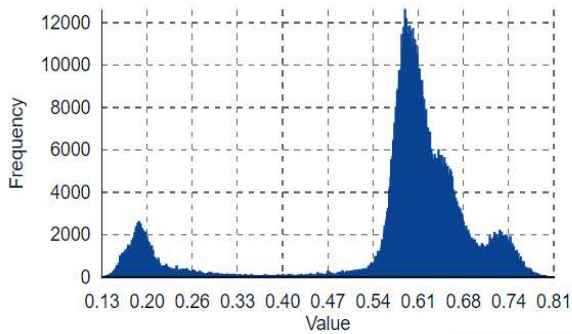


Рис. 15. Індексні карти поля пшениці станом на 21-04-2023

Sentinel-2 L1C - NDVI



Sentinel-2 L2A - NDVI

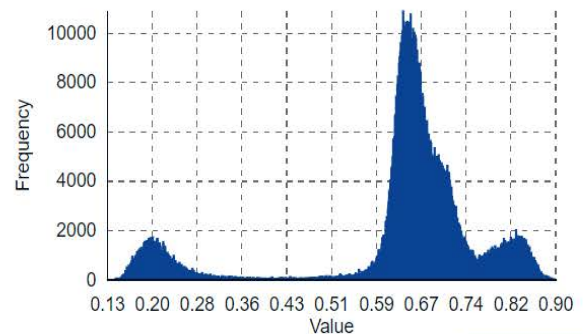


Рис. 16. Гістограми з побудованих індесних карт поля пшениці станом на 21-05-2023

4. **22-06-2023.** Спостерігається практичне вирівнювання гістограм рівнів L1C та L2A: індекс зростає, рослини продовжують набирати біомасу (рис. 17).

5. **17-07-2023.** Різкі зміни показників індексної карти фіксують вже зібране поле. Практично, на цьому етапі зміщення піку гістограми ліворуч, в бік низьких значень індексу вказує на відсутність значимої кількості біомаси. Це підтверджують і результати класифікації зображення. Також, на нашу думку, цікавий візуальний вияв різного рівня забур'янення західної і східної частин поля (рис. 18).

Опрацювання знімку на останню дату із класифікацією ландшафту в районі дослідження представлено нижче на рис. 19.

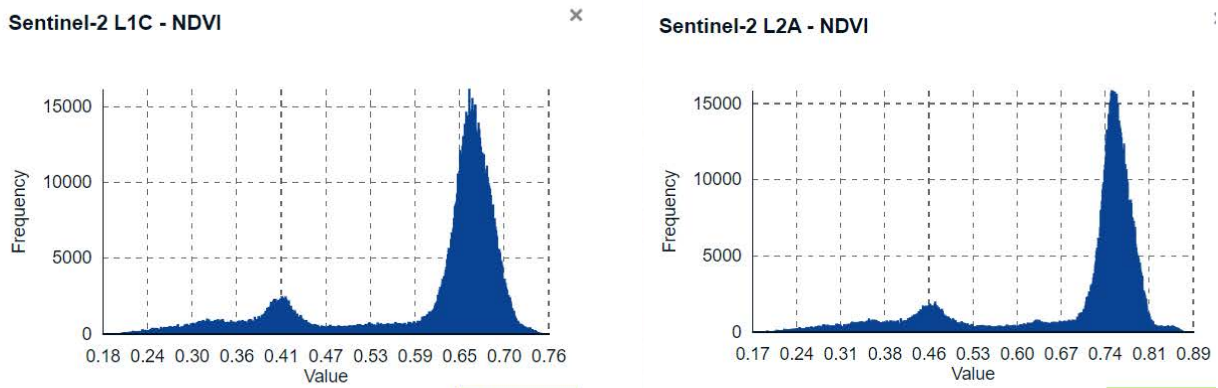


Рис. 17. Гістограми з індексних карт поля пшениці станом на 22-06-2023



Рис. 18. Індексні карти поля пшениці станом на 17-07-2023

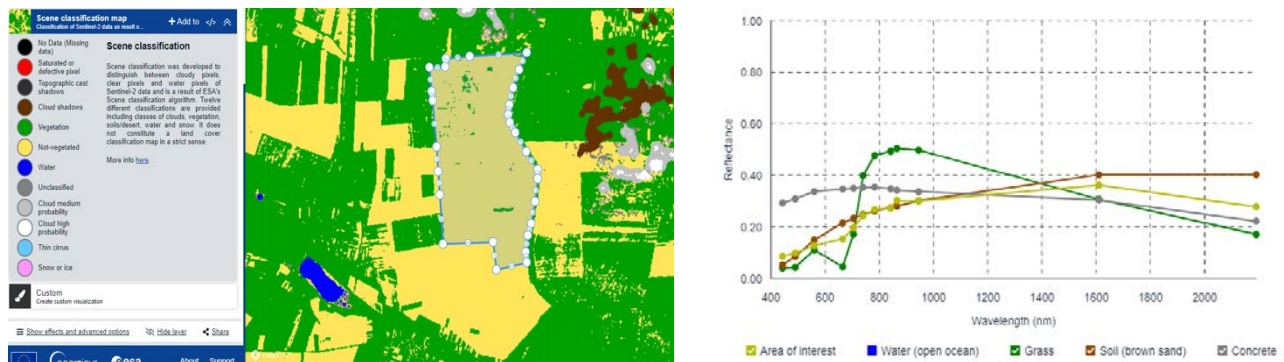


Рис. 19. Класифікація ландшафту на кінець дослідження

Детальний аналіз створених графіків на початку дослідження (рис. 13) і наприкінці (рис. 19) свідчить про те, що показники побудованих ліній для води, трав'яної рослинності та піску, які можна було дешифрувати на знімках, залишилися незмінними. Тільки для обраного ареалу, а саме для поля пшениці, дані зазнали змін. Таким чином, на нашу думку, космічні знімки у версіях Sentinel-2 L1C та Sentinel-2 L2A є цінним джерелом для отримання інформації про стан посівів.

Висновки. Теоретичні та методичні засади опрацювання результатів багатоспектрального космічного знімання реалізовано в багатьох прикладних сервісах і програмному забезпеченні. Вони дозволяють, передусім, формувати такі важливі для пояснення стану рослинності на полях продукти, як карти вегетаційних індексів.

Космічні знімки у версіях Sentinel-2 L1C та Sentinel-2 L2A є цінним і самим доступним джерелом для отримання інформації про стан посівів. В ході експериментального дослідження виконано опрацювання продуктів знімання супутників Sentinel-2 L1C для їхнього доведення до рівня продуктів Sentinel-2 L2A. Це складний етап, пов'язаний із правильним обранням моделі атмосферної корекції і перерахунку значень пікселів у величину відбивної здатності об'єктів на поверхні Землі. Також важливим етапом у цьому процесі є ортокорекція зображень із застосуванням глобальних моделей рельєфу земної поверхні. Така корекція може бути важливою для подальшого генерування карт-завдань для обробітку ґрунту і рослин.

Створення часового ряду карт вегетаційних індексів для поля з посівами озимої пшениці є дуже предметним способом формування історії поля, в повній мірі підтверджує теорію дистанційного спостереження за станом полів. Отримані відомості дозволяють скоригувати алгоритм обробки для уточнення вимірювання та прогнозування кількісних показників (розрахунок кількості біомаси, прогноз врожайності та інше).

Результати виконаної роботи дозволили розкрити позитивні особливості і недоліки методу створення індексних карт. Так, при певних погодних умовах в літній період корекція знімків за вплив атмосфери несуттєво впливає на розраховані значення індексів. Натомість, при заявленому, обмеженому часовому періоді знімань (як в нашому випадку – 5 діб) може виявитись, що безхмарних днів у весняний період вегетації в місяці – не більше 3-5, що значно впливає на оперативність складання карт. Відповідно, більш надійним і точним, але суттєво більш коштовним, є мультиспектральне знімання полів із БПЛА.

Список літератури

1. Агроекологічний супутниковий моніторинг / О. Тараріко та ін. Київ : Аграрна наука, 2019. 204 с.

2. Булакевич С. Використання супутникової системи Landsat для моніторингу озимої пшениці на території Західної України. *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки*. 2019. № 1(85). С. 60–70.
3. Булакевич С., Качановський О. Моніторинг стану сільськогосподарських угідь озимої пшениці з використанням даних супутників Sentinel та систем штучного інтелекту. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2018. № 1. С. 59–63.
4. Головний сайт для агрономів. Урожай пшениці у 6,42 млн т оцінює NASA Harvest на окупованих територіях України. *Superagronom.com*. URL: <https://superagronom.com/news/> (дата звернення: 15.09.2024).
5. Зацерковний В. Аналіз моделей інтеграції технологій ГІС, ДЗЗ і GPS в задачах моніторингу стану навколишнього середовища. *Математичні машини і системи*. 2014. № 4. С. 44–52.
6. Марюшко М., Пащенко Р., Коблюк Н. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків СЕНТИНЕЛІ-2. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2019. № 1(89). С. 99.
7. Методичні рекомендації з агроекологічної оцінки структури агроландшафтів і систем землекористування за даними дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності. Київ, 2012. 34 с.
8. A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa / C. Nakalembe et al. *Global food security*. 2021. Vol. 29. P. 100543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543> (date of access: 15.09.2024).
9. ASAP: a new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis / F. Rembold et al. *Agricultural systems*. 2019. Vol. 168. P. 247–257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.07.002> (date of access: 15.09.2024).
10. Copernicus browser. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (date of access: 16.09.2024).
11. Crop type maps for operational global agricultural monitoring / I. Becker-Reshef et al. *Scientific data*. 2023. Vol. 10, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02047-9> (date of access: 15.09.2024).
12. Development of a 10-m resolution maize and soybean map over China: matching satellite-based crop classification with sample-based area estimation / H. Li et al. *Remote sensing of environment*. 2023. Vol. 294. P. 113623. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113623> (date of access: 15.09.2024).
13. DLR – German satellite data archive (D-SDA) user services. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*. URL: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/research-infrastructure/d-sda-user-services> (date of access: 15.09.2024).
14. Field-scale dynamics of planting dates in the US Corn Belt from 2000 to 2020 / J. M. Deines et al. *Remote sensing of environment*. 2023. Vol. 291. P. 113551. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113551> (date of access: 15.09.2024).
15. Monitoring winter wheat growth performance at sub-field scale using multitemporal Sentinel-2 imagery / B.-B. Goh et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 115. P. 103124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103124> (date of access: 15.09.2024).
16. National satellite land remote sensing data archive | U.S. geological survey. *USGS.gov | Science for a changing world*. URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/national-satellite-land-remote-sensing-data-archive> (date of access: 15.09.2024).
17. Satellite forecasting of crop harvest can trigger a cross-hemispheric production response and improve global food security / T. Tanaka et al. *Communications earth & environment*. 2023. Vol. 4, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00992-2> (date of access: 15.09.2024).

18. Within-Field rice yield estimation based on sentinel-2 satellite data / B. Franch et al. *Remote sensing*. 2021. Vol. 13, no. 20. P. 4095. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13204095> (date of access: 15.09.2024).

19. Yang M., Guo B., Wang J. Phenological-Based method for monitoring winter wheat and summer maize rotation cropping pattern using sentinel-2. *Agricultural science*. 2023. P. 39. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4556021 (date of access: 15.09.2024).

Doctor of Technical Sciences, Professor **Kulikowska Olha**,
PhD in Economics, Associate Professor **Kolodiy Pavlo**,
Doctor of Economics, Associate Professor **Stupen Roman**,
Lviv National Environmental University

UNLOCKING THE POSSIBILITIES OF USING MULTI-SPECTRAL IMAGES FOR ACCURATE CROP ASSESSMENT

The paper describes the theoretical and technical aspects of obtaining information on the condition of cereal crops based on medium resolution space multispectral imagery. Experimental studies have been carried out to create digital index maps for fields with grain crops. The high efficiency of the methodology for studying the state of fields using multispectral satellite images with the use of L1C and higher L2A processing level products is proved, the features and limitations of the methodology are shown.

The theoretical and methodological foundations for processing multispectral satellite imagery results have been implemented in many application services and software. They allow, first of all, to generate such important products for explaining the state of vegetation in fields as vegetation index maps.

Sentinel-2 L1C and Sentinel-2 L2A space imagery is a valuable and inexpensive source of information on crop condition. During the pilot study, Sentinel-2 L1C satellite image products were processed to bring them up to the level of Sentinel-2 L2A products. This is a complex step related to the correct selection of the atmospheric correction model and the conversion of pixel values into reflectivity of objects on the Earth's surface. Another important step in this process is the ortho-correction of the images using global terrain models. Such correction can be important for the further generation of task maps for soil and crop management.

The creation of a time series of vegetation index maps for a field of winter wheat is a very substantive way to build a field history that fully confirms the theory of remote field monitoring. The information obtained allows us to adapt the processing algorithm to refine the measurement and prediction of quantitative indicators (biomass calculation, yield prediction, etc.).

The experiment also revealed some positive features and drawbacks of the method of creating index maps. For example, under certain weather conditions in

summer, correcting the images for atmospheric influence does not significantly affect the calculated index values. On the contrary, with the specified acquisition period (5 days), it may turn out that there are no more than 3-5 cloudless days in a month during the spring growing season, which significantly affects the efficiency of mapping. Accordingly, more reliable and accurate, but significantly more expensive, is the multispectral field survey from unmanned aerial vehicles.

Keywords: land use; innovative methods; spatial monitoring of agricultural land; multispectral imagery; field history map; vegetation index maps; histogram.

REFERENCES

1. Ahroekolohichniy suputnykoviy monitorynh / O. Tarariko ta in. Kyiv : Ahrarna nau-ka, 2019. 204 s. {In Ukrainian}
2. Bulakevych S. Vykorystannia suputnykovoi systemy Landsat dlia monitorynhu ozymoi pshenytsi na terytorii Zakhidnoi Ukrainy. Visnyk NUVHP. Silskohospodarski nauky. 2019. № 1(85). S. 60–70. {In Ukrainian}
3. Bulakevych S., Kachanovskyi O. Monitorynh stanu silskohospodarskykh uhid ozymoi pshenytsi z vykorystanniam danykh suputnykiv Sentinel ta system shtuchnoho intelek-tu. Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva. 2018. № 1. S. 59–63. {In Ukrainian}
4. Holovnyi sait dlia ahronomiv. Urozhai pshenytsi u 6,42 mln t otsiniuie NASA Harvest na okupovanykh terytoriiakh Ukrainy. Superagronom.com. URL: <https://superagronom.com/news/18252-cherez-vtratu-vrojayu-na-okupovanih-teritoriyah-ukrayina-zaznala-vtrat-u-2-mlrd--nasa-harvest> (data zvernennia: 15.09.2024). {In Ukrainian}
5. Zatserkovnyi V. Analiz modelei intehratsii tekhnolohii HIS, DZZ i GPS v zadachakh mo-nitorynhu stanu navkolyshnoho seredovyscha. Matematychni mashyny i systemy. 2014. № 4. S. 44–52. {In Ukrainian}
6. Mariushko M., Pashchenko R., Kobliuk N. Monitorynh silskohospodarskykh kultur iz zastosuvanniam kosmichnykh znimkiv SENTINEL-2. Radioelektronni i kompiuterni systemy. 2019. № 1(89). S. 99. {In Ukrainian}
7. Metodychni rekomendatsii z ahroekolohichnoi otsinky struktury ahrolandshaftiv i sys-tem zemlekorystuvannia za danymy dystantsiinoho zonduvannia Zemli vysokoi rozdilnoi zdat-nosti. Kyiv, 2012. 34 s. {In Ukrainian}
8. A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa / C. Nakalembe et al. Global food security. 2021. Vol. 29. P. 100543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543> {In English}.
9. ASAP: a new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis / F. Rembold et al. Agricultural

- systems. 2019. Vol. 168. P. 247–257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.07.002> (date of access: 15.09.2024) {In English}.
10. Copernicus browser. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (date of access: 16.09.2024). {In English}.
11. Crop type maps for operational global agricultural monitoring / I. Becker-Reshef et al. Scientific data. 2023. Vol. 10, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02047-9>. {In English}.
12. Development of a 10-m resolution maize and soybean map over China: matching satellite-based crop classification with sample-based area estimation / H. Li et al. Remote sensing of environment. 2023. Vol. 294. P. 113623. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113623> (date of access: 15.09.2024) {In English}.
13. DLR – German satellite data archive (D-SDA) user services. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. URL: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/research-infrastructure/d-sda-user-services> (date of access: 15.09.2024) {In English}.
14. Field-scale dynamics of planting dates in the US Corn Belt from 2000 to 2020 / J. M. Deines et al. Remote sensing of environment. 2023. Vol. 291. P. 113551. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113551>. {In English}.
15. Monitoring winter wheat growth performance at sub-field scale using multitemporal Sentinel-2 imagery / B.-B. Goh et al. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 115. P. 103124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103124> (date of access: 15.09.2024). {In English}.
16. National satellite land remote sensing data archive | U.S. geological survey. USGS.gov | Science for a changing world. URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/national-satellite-land-remote-sensing-data-archive> (date of access: 15.09.2024) {In English}.
17. Satellite forecasting of crop harvest can trigger a cross-hemispheric production response and improve global food security / T. Tanaka et al. Communications earth & environment. 2023. Vol. 4, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00992-2>. {In English}.
18. Within-Field rice yield estimation based on sentinel-2 satellite data / B. Franch et al. Remote sensing. 2021. Vol. 13, no. 20. P. 4095. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13204095> (date of access: 15.09.2024) {In English}.
19. Yang M., Guo B., Wang J. Phenological-Based method for monitoring winter wheat and summer maize rotation cropping pattern using sentinel-2. Agricultural science. 2023. P. 39. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4556021 (date of access: 15.09.2024) {In English}.