

**Й. Й. Білинський, д. т. н., проф.; Б. П. Книш, к. т. н., доц.;
Я. А. Кулик, к. т. н., доц.**

ОБРОБКА ТА ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В АГРОМОНІТОРИНГУ

В роботі проведено аналіз процесу обробки зображень в агромоніторингу, що дозволяє отримувати комплексну інформацію про стан полів та сільськогосподарських культур, які вирощуються на них. Це передбачає проходження через складні етапи попередньої обробки, яка забезпечує корекцію і поліпшення зображень космічної або аерофотозйомки, та тематичної обробки, яка забезпечує процес дешифрування або розпізнавання об'єктів та явищ на знімках космічної або аерофотозйомки. Кожен з цих етапів включає в собі відповідні йому види та способи реалізації, причому деякі методи поліпшення зображень передбачають зміну спектральних характеристик знімка, тому після їх застосування не можна використовувати методи тематичної обробки, які ґрунтуються на аналізі значень спектральної яскравості пікселів (класифікації, арифметичні перетворення каналів тощо). В роботі на основі проведеного аналізу літературних джерел виділено види та способи обробки мультиспектральних зображень, що стосуються агромоніторингу, оскільки робота з такими зображеннями за рахунок невеликої кількості смуг спектра забезпечує менші затрати на обробку без втрати якості, на відміну від гіперспектральних зображень. Розглянуто види попереднього етапу обробки, а саме: геометрична корекція зображень, радіометричне калібрування знімків, радіометрична корекція впливу атмосфери, відновлення пропущених пікселів, контрастування шляхом лінійного розтягування гістограми, контрастування шляхом нормалізації гістограми, контрастування шляхом вирівнювання гістограми, фільтрація. Розглянуто способи тематичного етапу обробки, а саме: перетворення кольору, аналіз головних компонентів, спектральне розділення, класифікація з навчанням та без навчання, індексація зображення, визначення кількісних показників. Описано їх особливості, умови використання тощо. Запропоновано схему, яка описує етапи обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу з врахуванням усіх видів та способів реалізації кожного етапу.

Ключові слова: *вегетаційні індекси, мультиспектральні зображення, обробка, агромоніторинг, схема.*

Вступ

З огляду на активний розвиток агробізнесу в світі, який сьогодні став локомотивом багатьох національних економік, такі країни як Україна стали найбільшими у світі експортерами сільськогосподарської продукції (соняшникова олія, зерно тощо) [1]. Це досягнуто завдяки широкому впровадженню точного землеробства, яка включає сукупність технологій, які ґрунтуються на результатах агромоніторингу, а саме на точних даних, тобто на знімках супутників чи безпілотних літальних апаратів з використанням технологій для їх обробки. Такі дані агромоніторингу є знімками різних зон покриття та широкого діапазону роздільної здатності (супутники – від 10 до 1 м/піксель [2], безпілотні літальні апарати – менше 1 см/піксель [3]).

На сьогодні в галузі обробки зображень в агромоніторингу спостерігається сплеск активності. Це пов'язано зі створенням та модернізацією апаратних та програмних комплексів, розробкою та вдосконаленням методів обробки зображень, удосконаленням апаратів, які здійснюють зйомку (космічні супутники, безпілотні літальні апарати), і наземних станцій управління, постійним збільшенням їх кількості, розширенням функціональних можливостей і спектра виконуваних завдань. Застосування космічних супутників та безпілотних літальних апаратів [4] для моніторингу сільськогосподарських зон

дозволяє аналізувати поля, виявляти проблеми (шкідники, хвороби, наслідки негоди), здійснювати планування і, таким чином, контролювати врожайність [5].

Процес обробки зображень в агромоніторингу є складним, оскільки потребує постійного усунення різноманітних атмосферних впливів, які спотворюють знімки, зокрема неоднорідностей освітлення, затемнених або навпаки занадто освітлених областей тощо. Крім того, обробка проводиться мульти- або гіперспектральних зображень. Це знімки, в яких характеристики зображення фіксуються в певних діапазонах довжин хвиль (мультиспектральне зображення – від 3 до 15 спектральних смуг, гіперспектральне зображення – сотні спектральних смуг) [6]. Найпоширенішою є обробка мультиспектральних зображень, оскільки невелика кількість смуг спектра забезпечує менші затрати на обробку без втрати якості.

На практиці при дослідженні зображень, що стосуються агромоніторингу, та їх подальшої обробки виникає необхідність вибору схеми проведення цієї обробки, оскільки існує широкий спектр специфічних задач і, відповідно, видів та способів їх реалізації [7]. Таким чином, **метою роботи** є аналіз етапів обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу з врахуванням усіх видів та способів реалізації кожного етапу та створення схеми, яка б найбільш повно висвітлювала процес обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу.

Схема обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу

Повноцінний процес обробки зображень передбачає проходження через певні складні етапи, кожен з яких включає в собі види та способи реалізації цих етапів [8]. Це дозволить отримати весь масив корисної інформації про стан полів та сільськогосподарських культур, які вирощуються на них, у вигляді мультиспектральних зображень.

Узагальнена схема обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу може бути описана як показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу

Основні етапи обробки мультиспектральних зображень

Основні етапи обробки мультиспектральних зображень передбачають проведення попередньої обробки та тематичної обробки.

Попередня обробка знімків – це корекція та поліпшення якості зображень, отриманих внаслідок космічної або аерофотозйомки. Проте потрібно мати на увазі, що деякі методи поліпшення якості зображень (фільтрація, зміна контрасту) передбачає зміну спектральних характеристик знімка, тому після їх застосування не можна використовувати методи тематичної обробки, які ґрунтуються на аналізі значень спектральної яскравості пікселів (класифікації, арифметичні перетворення каналів тощо).

Тематична обробка знімків – це процес дешифрування або розпізнавання об’єктів і явищ на знімках. Оскільки здійснюється обробка кольорового зображення, то використовуються різні системи такі як CMY і CMYK, HIS, RGB, система псевдокоleurів, перетворення яскравості в колір тощо. Так, наприклад, для систем RGB кольорове зображення на моніторі формується шляхом складання трьох основних кольорів, які відповідають монохроматичному випромінюванню з довжиною хвилі 0,7 мкм (червоний – R); 0,5461 мкм (зелений – G); 0,4358 мкм (синій – B) [9, 10].

Попередня обробка мультиспектральних зображень

Попередня обробка мультиспектральних зображень проводиться у зв'язку з потребою підготовки знімка до безпосереднього аналізу заради виявлення або розпізнавання об'єктів і явищ, визначення кількісних показників тощо. Основними методами попередньої обробки мультиспектральних зображень є радіометричне калібрування, радіометрична корекція впливу атмосфери, відновлення пропущених пікселів, контрастування, фільтрація.

Радіометричне калібрування знімків передбачає, що знімки, отримані з апаратів, які здійснюють зйомку, записані у вигляді «сирих значень» яскравості DN (Digital Number). Дані в такому форматі можна адекватно порівняти з даними інших зйомок. Завдання радіометричного калібрування полягає у приведенні цих значень до фізичних одиниць. Формула для калібрування мультиспектральних знімків в оптичному діапазоні:

$$B_z = K_z \cdot DN + C_z,$$

де B_z – енергетична яскравість для спектральної зони Z ; K_z – калібрувальний коефіцієнт, який залежить від спектральної зони Z ; C_z – калібрувальна константа, які відповідає мінімальній величині яскравості, що реєструється в залежності від спектральної зони Z [6, 10].

Основними атмосферними впливами, які спотворюють знімки, є поглинання і розсіювання електромагнітних хвиль, які проходять крізь озон, водяну пару, вуглекислий газ, кисень, метан, пил, дим, а також хмарність, яка є перешкодою при зйомці в оптичному діапазоні. Радіометрична корекція впливу таких явищ здійснюється за рахунок використання математичних методів побудови моделей стану атмосфери з урахуванням типів розсіювання в атмосфері, пори року, метеорологічних даних. Для уточнення таких моделей використовують наземне вимірювання відбивної здатності об'єктів під час польоту апарату, який здійснює зйомку. Хмари та тумани добре видно на тлі води, оскільки в червоному та інфрачервоному діапазонах спектра поверхня води за своїми оптичними характеристиками близька до абсолютно чорного тіла. Тому вміст водяної пари і аерозолів (диму) в атмосфері можна оцінити по знімках, в яких наявні ділянки морів і океанів [8, 10].

Однією з основних задач попередньої обробки мультиспектральних зображень є усунення різноманітних дефектів на знімках, зокрема пропущені пікселі, слабка контрастність, зашумленість тощо.

Пропущені пікселі можуть виникати під час зйомки або передачі даних. Трапляється також заміна значень яскравості цілого рядка значеннями сусіднього рядка. Такі явища можуть стати перешкодою під час тематичної обробки знімка. Пропущені пікселі можна відновити інтерполяцією з певною похибкою [9, 10].

Слабка контрастність знімка є найпоширенішим дефектом, оскільки контрастність є різницею між максимальним і мінімальним значеннями яскравості. Для цього існують декілька методів підвищення контрасту (рис. 2) шляхом цифрової обробки:

- лінійне розтягування гістограми – всім значенням яскравості присвоюються нові значення з метою охоплення всього можливого інтервалу зміни яскравості (0, 255);
- нормалізація гістограми – на весь можливий інтервал зміни яскравості розтягується не вся гістограма, а лише її ділянка з найбільшою інтенсивністю;
- вирівнювання гістограми – зміна значень яскравості пікселів таким чином, щоб для кожного рівня яскравості була однакова кількість пікселів [10 – 12].

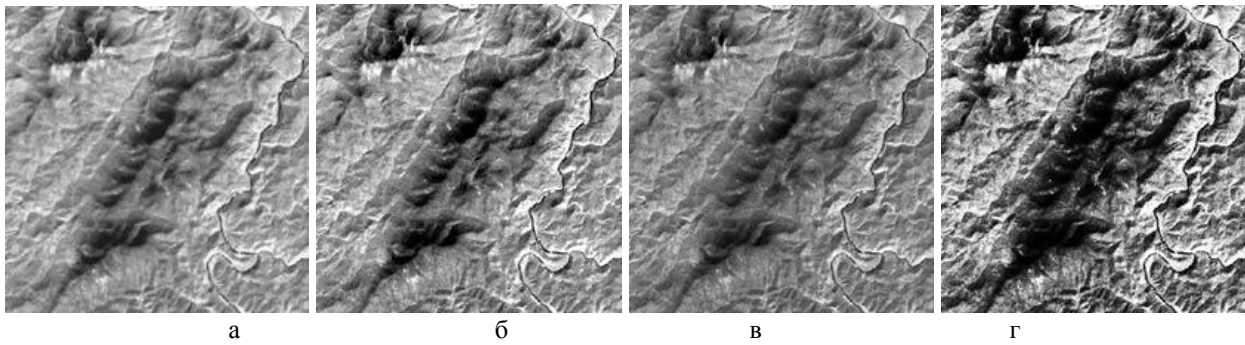


Рис. 2. Методи підвищення контрастності зображення: а – початкове зображення; б – зображення після лінійного розтягування гистограми; в – зображення після нормалізації гистограми; г – зображення після вирівнювання гистограми

Будь-яким реальним знімкам властива наявність слабковиражених об'єктів, випадкових перешкод (шумів) тощо. Усунути подібні дефекти дозволяє фільтрація зображення. Один з найпростіших способів її проведення – це перетворення в ковзному вікні. При такому перетворенні перераховуються значення яскравості всіх пікселів зображення, а саме, коли цей піксель є центральним у вікні, яке «рухається» по знімку, йому надається нове значення, яке є функцією значень сусідніх з ним пікселів (ваговий коефіцієнт). Розмір вікна може бути, наприклад, 3x3 або 5x5 пікселів. Щоразу вікно зміщується на 1 піксель і рухається до тих пір, поки не пройде весь знімок [9 – 12]. Взагалі для всіх пікселів вікна вагові коефіцієнти можна встановлювати виходячи з цілей дешифрування.

Тематична обробка мультиспектральних зображень

Тематичну обробку проходять підготовлені на попередньому етапі мультиспектральні зображення, що дозволяє отримувати комплексну інформацію про стан полів та сільськогосподарських культур, які вирощуються на них. Основними способами тематичної обробки мультиспектральних зображень є перетворення кольору, аналіз головних компонентів, спектральне розділення, класифікації, індексація зображення, визначення кількісних показників.

Перетворення кольору дозволяє візуально виділяти об'єкти, які мало відрізняються за яскравістю на півтоновому зображенні. Цей процес передбачає фарбування зображення в натуральні і неприродні кольори [12]. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені значення R, G, B каналів знімка, то зображення представлено в натуральних кольорах. Якщо в канали R, G, B зображення підставлені інші канали знімка, то зображення представлено в неприродних кольорах. Наприклад, в канал зображення R підставити канал знімка, в якому значення яскравості пікселів високі, а в канали G і B канали з низькими значеннями яскравості, то зображення буде забарвлене переважно в червоні тони. Таким чином, самі об'єкти доцільно визначати на зображеннях в натуральних кольорах, а проводити їх розділення чи виділення контуру зручніше на зображеннях в неприродних кольорах [9, 10].

Одним з поширених способів тематичної обробки мультиспектральних зображень є аналіз головних компонентів, а саме аналіз мультиспектральних корельованих даних, тобто коли при зростанні яскравості пікселя в одному спектральному каналі підвищуються значення яскравості в інших спектральних каналах. Можливості аналізу головних компонентів:

- Якщо знімок містить більше трьох спектральних каналів, можна створити кольорове зображення з трьох головних компонентів, оскільки в типовому мультиспектральному зображенні зазвичай перші два або три компоненти здатні описати практично всю зміну спектральних характеристик. Інші компоненти найчастіше схильні до шумових впливів. Відкидаючи ці компоненти можна зменшити обсяг даних без помітної втрати інформації.

○ Таке перетворення проводять для серії різночасових знімків, приведених в єдину систему координат, для виявлення динаміки, яка яскраво проявляється в одній або двох компонентах [11].

Один піксель знімка може відображати від декількох квадратних метрів до тисяч квадратних метрів площі, і містити інформацію не про один об'єкт, а про групу об'єктів, які розташовані на відповідній території. Тому використовують метод спектрального розділення для розпізнавання на знімках об'єктів, розмір яких значно менший за розмір пікселя. Суть методу полягає в наступному: змішані спектри аналізують, порівнюючи їх з відомими чистими спектрами, наприклад, з спектральних бібліотек чистих матеріалів. Відбувається кількісна оцінка співвідношення цього відомого (чистого) спектра і домішок в спектрі кожного пікселя. Після виконання такої оцінки може бути отримано зображення, розфарбоване так, що колір пікселя буде означати, який компонент переважає в спектрі цього пікселя [9 – 11].

Під час обробки зображень часто постає потреба в їх дешифруванні. Її вирішує класифікація, яка дозволяє здійснювати процес автоматизованого розподілу всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам [13]. Основними видами класифікацій є класифікація з навчанням і класифікація без навчання.

Класифікація з навчанням – це процес, при якому відбувається порівняння значення яскравості кожного пікселя з еталонами, в результаті чого кожен піксель відноситься до найбільш підходящого класу об'єктів. Класифікацію з навчанням можна застосовувати, якщо заздалегідь відомо, які об'єкти є на знімку; на знімку є невелика кількість (до 30) класів; ці класи чітко розрізняються на знімку. Класифікації без навчання – це процес, при якому розподіл пікселів зображення відбувається автоматично, на основі аналізу статистичного розподілу яскравості пікселів. Класифікацію без навчання застосовують в разі якщо заздалегідь невідомо які об'єкти є на знімку; на знімку є велика кількість об'єктів (більше 30) зі складними межами; як попередній етап перед класифікацією з навчанням [2, 10].

При дослідженні об'єктів за мультиспектральними знімками, коли важливі не абсолютні значення, а характерні співвідношення між значеннями яскравості об'єкта в різних спектральних зонах, використовують індексацію зображень. Вона передбачає обчислення значення яскравості кожного пікселя шляхом застосування арифметичних операцій над значеннями яскравості конкретного пікселя з різних каналів знімка. На таких зображеннях більш яскраво та контрастно виділяються шукані об'єкти в порівнянні з вихідним знімком [11 – 13]. В табл. 2 наведено деякі індекси, які використовуються при індексації зображення.

Варто зазначити, що серед усіх розглянутих способів тематичної обробки зображень для агромоніторингу найпоширенішою є індексація знімків, а саме використання вегетаційних індексів (EVI2, GNDVI, NDVI, NDVI contrast тощо) [16]. На рис. 3 наведено порівняння зображення поля [16] в натуральних кольорах з аналогічними, але обробленими з використанням вегетаційних індексів EVI2, GNDVI, NDVI, NDVI contrast.

Індекси для індексації зображення

Назва	Визначення	Використання
Індекс вмісту оксиду заліза	Відношення значень яскравості в червоному (Ч) каналі до значень яскравості в синьому каналі (С): $\frac{Ч}{С}$	Для виявлення вмісту оксидів заліза
Індекс вмісту глинистих мінералів	Відношення значень яскравості в межах середнього інфрачервоного каналу (СІЧ): $\frac{СІЧ1}{СІЧ2}$, де СІЧ1 – це діапазон від 1,55 до 1,75 мкм, а СІЧ2 – це діапазон від 2,08 до 2,35 мкм	Для виявлення вмісту глинистих мінералів
Індекс вмісту залізистих мінералів	Відношення значення яскравості в середньому інфрачервоному (СІЧ1) каналі до значення яскравості в ближньому інфрачервоному каналі (БІЧ): $\frac{СІЧ1}{БІЧ}$	Для виявлення вмісту залізистих мінералів
Нормалізований диференціальний вегетаційний індекс (NDVI) [14]	Хлорофіл в листі рослин відбиває випромінювання в ближньому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні електромагнітного спектра і поглинає в червоному (Ч). Відношення значень яскравості в цих двох каналах дозволяє чітко відокремлювати рослини від інших природних об'єктів та аналізувати їх: $NDVI = \frac{БІЧ - Ч}{БІЧ + Ч}$	Показує наявність і стан рослинності. Значення NDVI коливається в межах від -1 до 1
Нормалізований диференціальний індекс снігу (NDSI) [15]	NDSI – це відносна величина, яка характеризується різницею відбивної здатності снігу в червоному (Ч) і короткохвильовому інфрачервоному (КІЧ) діапазонах: $NDSI = \frac{Ч - КІЧ}{Ч + КІЧ}$	Використовується для виділення територій, покритих снігом. Для снігу $NDSI > 0,4$
Водний індекс (WI)	$WI = 0,9 \text{ мкм} / 0,97 \text{ мкм}$	Застосовується для визначення по гіперспектральних знімках вмісту води в рослинності

Як видно з рис. 3, на зображенні в натуральних кольорах наведено ділянка поля з будівлею, на обробленому з використанням вегетаційного індексу EVI2 яскраво виділено будівлю та зменшено атмосферні впливи, на обробленому з використанням вегетаційного індексу GNDVI показано однорідний вміст вологи на ділянці, на обробленому з використанням вегетаційного індексу NDVI темним тоном наведено густу рослинність, а на обробленому з використанням вегетаційного індексу NDVI contrast червоним кольором виділено хворі рослини.

Обробка мультиспектральних зображень в агромоніторингу дозволяє визначати проблемні ділянки поля, що дає можливість вчасно виявити та попереджати різноманітні фактори втрат врожаю чи порушення нормального розвитку рослин [17].

Найважливішим способом тематичної обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу є визначення кількісних показників. Він дозволяє отримати різноманітні дані про контури полів, якість культур, наявність бур'янів, хвороб чи інших проблем на полі, потребу внесення добрив тощо.

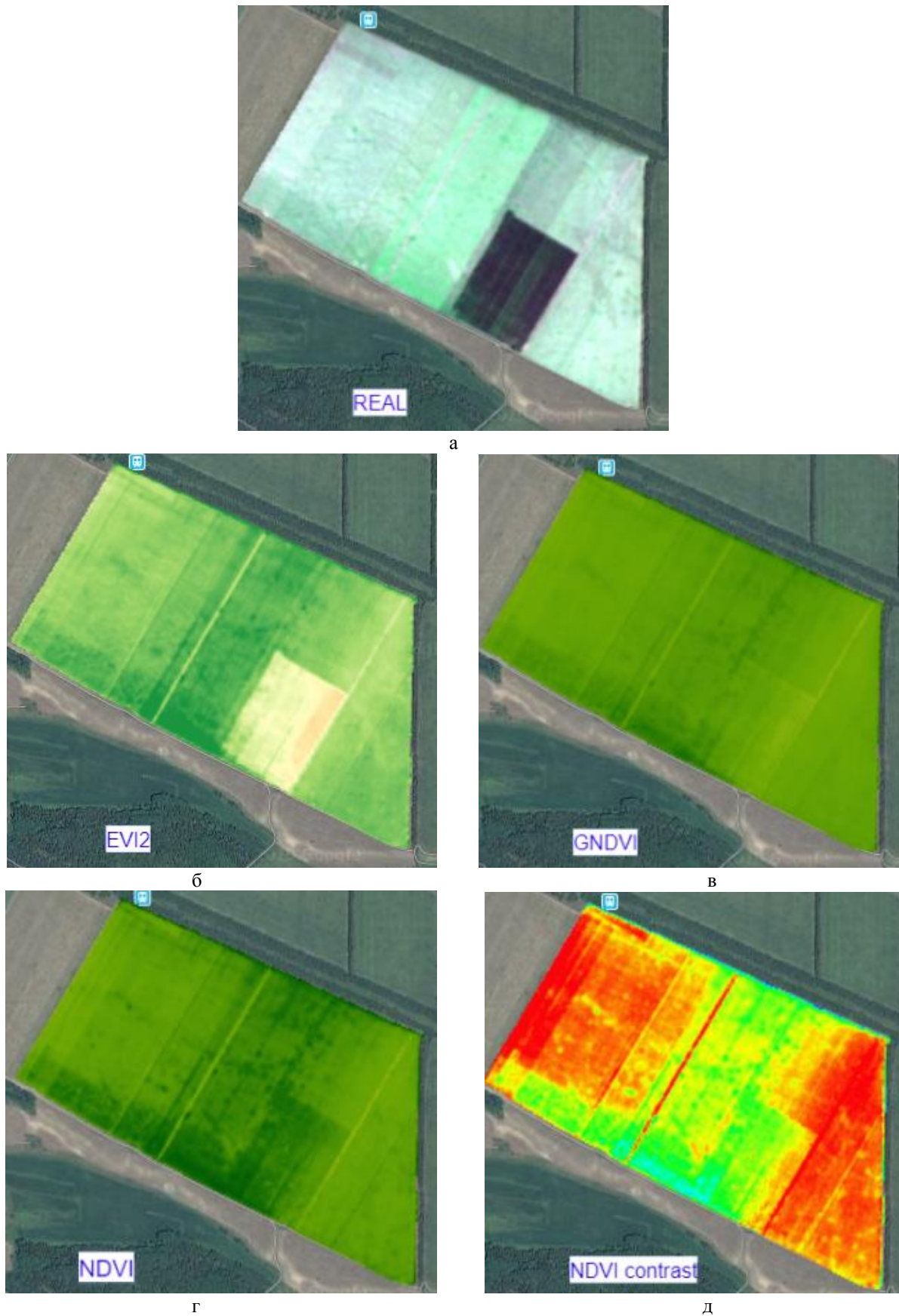


Рис. 3. Зображення поля в натуральних кольорах (а) та оброблене з використанням вегетаційних індексів EVI2 (б), GNDVI (в), NDVI (г) та NDVI contrast (д)

Невідповідність оброблювальної та юридичної площі земель, масштаби агробізнесу та динаміка змін у земельному банку створюють необхідність регулярно оновлювати контури полів. Наявність актуальних контурів, точної площі і меж оброблених полів, дозволяє уникнути надлишкових витрат на «неіснуючі» гектари та є основою для впровадження точного землеробства на підприємстві. Наприклад, на рис. 4 наведено результати аналізу зображення поля [18], які дозволяють встановити кількісні показники, що характеризують продуктивність його площі.

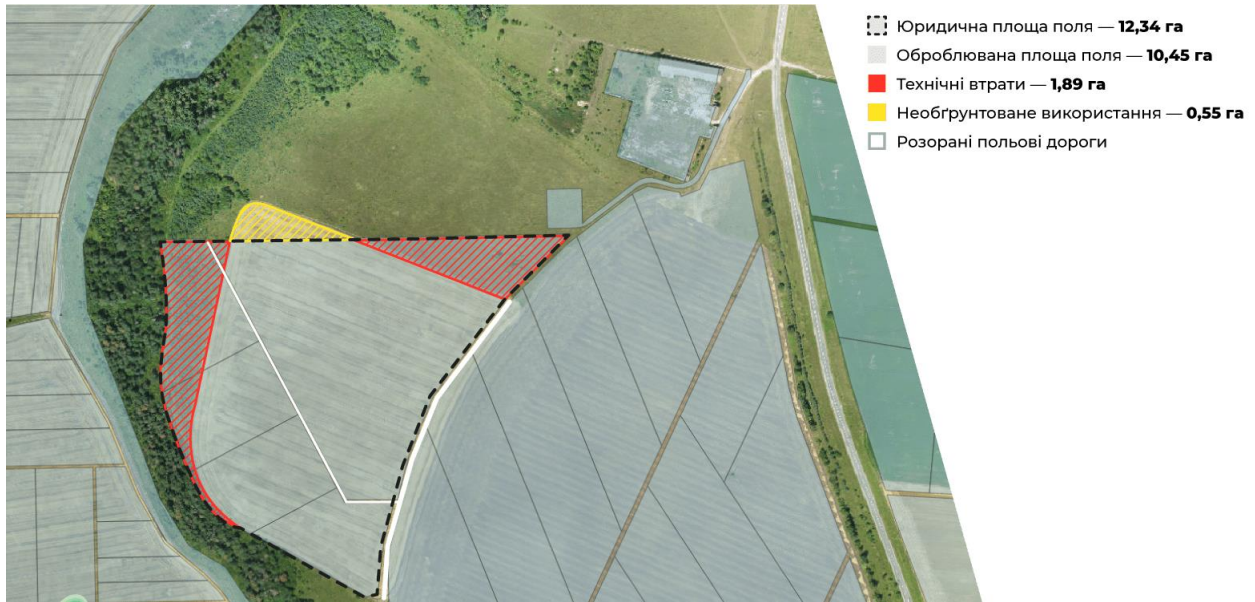


Рис. 4. Аналіз поля на продуктивність його площі

Заростання меж поля лісосмугою, чагарники навколо опор ліній електропередач на полі, солончаки та заболочені ділянки – типові приклади втрат продуктивної площі. Таким чином, в середньому невідповідність юридичної та фактично оброблювальної площі землі становить 2 – 5% [18].

Обробка мультиспектральних зображень в агромоніторингу дозволяє оцінити фактори загальних втрат врожаю від шкідників, хвороб чи бур'янів, причому на частку останніх припадає близько 30% втрат. На рис. 5 наведено зображення поля [5] враженого бур'янами.



Рис. 5. Зображення поля враженого бур'янами

Для кількісної оцінки засміченості поля використовують його мультиспектральні зображення, які проходять обробку за допомогою вегетаційних індексів, що дозволяє виявляти, попереджати поширення бур'янів, відрізнити їх від посівів, визначити їх частку та, інколи, різновид. В результаті цього агроном, отримуючи більш точну інформацію, може вчасно внести правильну норму гербіциду [5].

Одним з варіантів усунення подібних негативних факторів під час вегетаційного періоду сільськогосподарських культур є контроль за внесенням добрив та гербіцидів. Для цього проводять обробку зображення поля з метою визначення кількісних показників норм внесення діючих речовин. Зокрема на рис. 6 наведено карту внесення добрив [19], що являє собою оброблене мультиспектральне зображення посівного поля.

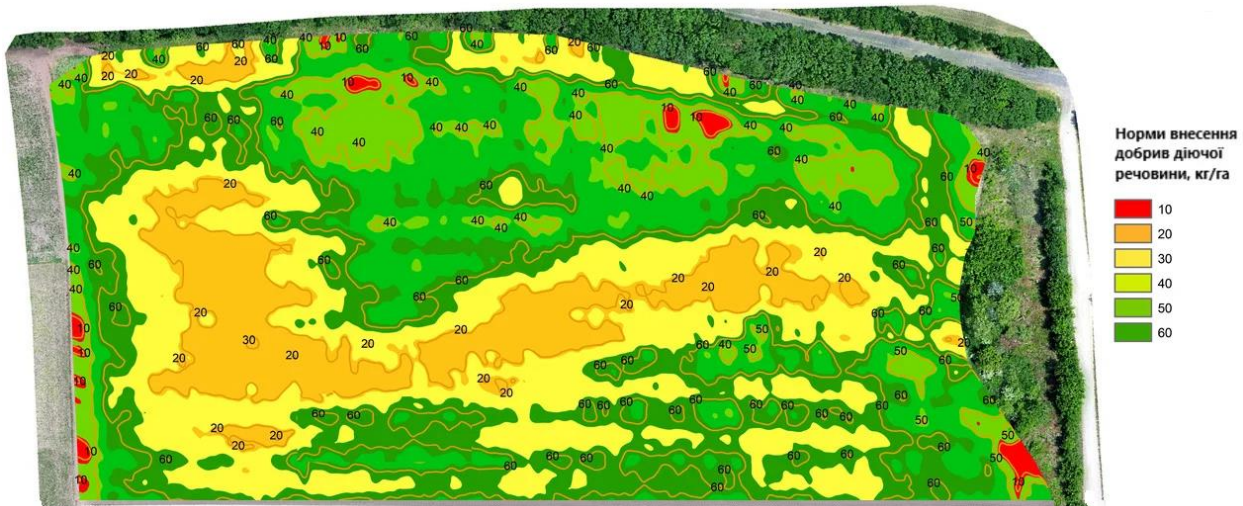


Рис. 6. Карта внесення добрив

Як видно з рис. 6, на зображенні виділені кількісні показники норм внесення добрив, значення яких є інформативними параметрами для оптимізації живлення рослин, економії добрив та пального [19].

Висновки

В роботі проведено аналіз процесу обробки даних агромоніторингу, що дозволяє отримувати комплексну інформацію про стан полів та сільськогосподарських культур, які вирощуються на них. Дані представлені у вигляді мультиспектральних зображень, які в процесі обробки проходять відповідні етапи. Кожен з цих етапів включає в собі відповідні йому види та способи реалізації, причому деякі методи поліпшення зображень передбачають зміну спектральних характеристик знімка, тому після їх застосування не можна переходити на наступні етапи обробки. В роботі виділено види та способи обробки мультиспектральних зображень, що стосуються агромоніторингу, на основі проведеного аналізу літературних джерел. Описано їх особливості, умови використання тощо. Запропоновано схему, яка описує етапи обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу з врахуванням усіх видів та способів реалізації кожного етапу. Таким чином, можна зробити висновок, що запропонована схема найбільш повно висвітлює процес обробки мультиспектральних зображень в агромоніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сільське господарство в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dlf.ua/ua/silskogospodarstvo-v-ukrayini/#main>.

2. Методы и технологии обработки мультигиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения / О. И. Потатуркин, С. М. Борзов, А. О. Потатуркин [и др.] // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – С. 60 – 67.
3. Аерофотозйомка за допомогою БЛА (БПЛА) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.bkc.com.ua/news-type/aerofotozjomka-za-dopomogou-bla-bpla>.
4. Книш Б. П. Оцінювання стану об'єктів безпілотними літальними апаратами / Б. П. Книш, М. А. Алексеев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 2. – С. 58 – 65.
5. Дрони і супутники: моніторинг стану посівів впродовж сезону [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://smartfarming.ua/insayty/drony-i-sputyky-monitorynh-stanu-posiviv-vprodovzh-sezonu>.
6. Garzelli A. Pansharpning of Multispectral Images Based on Nonlocal Parameter Optimization / A. Garzelli // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – № 4 (53). – P. 2096 – 2107. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2354471>.
7. Дослідження мультиспектральних зображень в агромоніторингу [Електронний ресурс] / Б. П. Книш // Наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету, Вінниця, 2021. – Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzip/all-frtzip-2021/paper/view/11349/9482>.
8. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования / У. Г. Рис. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.
9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.
10. Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ / Н. С. Абрамов, Д. А. Макаров, А. А. Талалаев [и др.] // Программные системы: теория и приложения. – 2018. – Т. 9, № 4 (39). – С. 417 – 442.
11. Обработка данных ДЗЗ - Этапы обработки данных [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=26&table=Menu.
12. Бибииков С. А. Распознавание растительного покрова на гиперспектральных изображениях по показателю сопряжённости / С. А. Бибииков, Н. Л. Казанский, В. А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 846 – 854.
13. Красиленко В. Г. Моделювання методів розпізнавання та класифікації фрагментів кольорових зображень земель сільськогосподарського призначення при їх дистанційному моніторингу / В. Г. Красиленко, Р. О. Яцковська, В. І. Яцковський // Системи обробки інформації. – 2017. – № 5 (151). – С. 55 – 61.
14. Черепанов А. С. Вегетационные индексы / А. С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98 – 102..
15. NDSI [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://eos.com/uk/ndsi/>.
16. Broadband Greenness [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/BroadbandGreenness.html#Differen>.
17. Индексы вегетации нового поколения EVI2, GNDVI в IoT платформе “Агроконтроль” [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://blog.agrocontrol.net/?p=1861>.
18. Обмір полів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://smartfarming.ua/upravlinnya-zemel-nym-bankom/inventarizatsiya-zemel-noho-banku/obmir-poliv>.
19. Ефективність внесення добрив [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/14705-efektyvnist-vnesennia-dobryv.html>.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2020.

Стаття пройшла рецензування 23.12.2020.

Білинський Йосип Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки та наносистем.

Книш Богдан Петрович – к. т. н., доцент кафедри електроніки та наносистем, tutmos-3@i.ua.

Кулик Ярослав Анатолійович – к. т. н., доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Вінницький національний технічний університет.