

УДК 631.171

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.6.11>

АВТОМАТИЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ РОСЛИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ

Муравйов О. В. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-7699-0245

Домашенко А. В. – студентка кафедри автоматизації та систем неруйнівного
контролю Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0009-0008-9262-5660

У статті розглянуто актуальні питання автоматизованого аналізу стану та контролю росту рослин із використанням спектральних методів дослідження. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності агровиробництва в умовах обмеженості природних ресурсів, кліматичних змін та зростання вимог до якості й стабільності врожаю. Традиційні методи оцінки стану рослин, що базуються на візуальних спостереженнях або контактних вимірюваннях, не забезпечують достатньої оперативності та масштабованості, що обмежує їх застосування у сучасних системах точного землеробства.

Проаналізовано сучасний стан розвитку автоматизованих систем моніторингу рослинності та наведено порівняльну характеристику контактних і безконтактних методів визначення фізіологічного стану рослин. Основну увагу приділено оптичним методам, які дозволяють здійснювати дистанційний аналіз рослинного покриву без порушення його цілісності. Показано, що мультиспектральна зйомка у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах створює передумови для ефективного застосування вегетаційних індексів як кількісних показників стану рослин.

У роботі детально розглянуто вегетаційні індекси NDVI, GNDVI, SAVI, EVI та VARI, які відображають різні аспекти розвитку рослинності, зокрема рівень фотосинтетичної активності, густоту листового покриву та можливі прояви стресових станів. Запропоновано підхід до автоматизованої обробки RGB і NIR зображень, що включає етапи попередньої обробки даних, розрахунку індексів, побудови просторових карт, масок рослинності, гістограм розподілу значень та табличної інтерпретації результатів.

Отримані результати демонструють здатність запропонованого підходу виявляти просторову неоднорідність розвитку рослин і локальні ділянки з потенційними ознаками стресу. Показано, що комбіноване використання декількох вегетаційних індексів підвищує достовірність оцінки стану рослин порівняно з аналізом за одним показником. Підтверджено можливість створення доступних автоматизованих рішень для практичного застосування у фермерських господарствах та науково-дослідних установах.

Ключові слова: оптичні методи контролю, стан рослин, контроль росту рослин, вегетаційні індекси, NDVI, спектральний аналіз.

Muraviov O. V., Domashenko A. V. Automation of plant condition monitoring using vegetation indices

The paper addresses current issues related to automated analysis of plant condition and growth monitoring using spectral methods. The relevance of this research is driven by the need to improve agricultural productivity under conditions of limited natural resources, climate change and increasing requirements for crop quality and yield stability. Conventional approaches to

plant condition assessment based on visual inspection or contact measurements are often time-consuming, subjective and poorly scalable, which limits their applicability in modern precision agriculture systems.

The current state of development of automated plant monitoring systems is analyzed, and a comparative overview of contact and non-contact methods for assessing plant physiological condition is provided. Particular attention is given to optical monitoring techniques, which enable remote and non-destructive analysis of vegetation. It is shown that multispectral imaging in the visible and near-infrared spectral ranges provides a reliable basis for the application of vegetation indices as quantitative indicators of plant health and development.

The study focuses on widely used vegetation indices such as NDVI, GNDVI, SAVI, EVI and VARI, which characterize different physiological and structural properties of vegetation, including photosynthetic activity, canopy density and stress-related changes. An automated approach to processing RGB and NIR images is proposed. The developed methodology includes image preprocessing, vegetation index calculation, generation of spatial distribution maps, vegetation masking, histogram analysis and tabular interpretation of numerical results.

The obtained results demonstrate the capability of the proposed approach to detect spatial heterogeneity in plant growth and identify localized areas with potential stress symptoms. It is shown that the combined use of multiple vegetation indices significantly improves the reliability and informativeness of plant condition assessment compared to single-index analysis. The presented solution confirms the effectiveness of optical monitoring techniques and the feasibility of developing affordable automated systems for plant growth analysis. Such systems can be applied in precision agriculture, greenhouse monitoring, as well as research environments.

Key words: *optical monitoring methods, plant condition assessment, vegetation indices, NDVI, spectral analysis.*

Постановка проблеми. Сільське господарство на сучасному етапі розвитку стикається з низкою системних викликів, серед яких ключовими є зростання потреби у продовольстві, обмеженість природних ресурсів, деградація ґрунтів, кліматичні зміни та підвищення вимог до екологічної сталості виробництва. За цих умов традиційні підходи до вирощування рослин, що ґрунтуються переважно на періодичних візуальних спостереженнях та усереднених агротехнічних нормах, виявляються недостатньо ефективними. Вони не дозволяють своєчасно виявляти початкові ознаки стресу рослин, що призводить до зниження врожайності та нерационального використання водних, енергетичних і матеріальних ресурсів.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності агровиробництва є впровадження автоматизованих систем моніторингу стану та росту рослин, здатних забезпечити об'єктивну, оперативну та просторово детальну інформацію про фізіологічний стан рослинного покриву. Особливе значення такі системи набувають у контексті розвитку концепцій точного землеробства, де кожна ділянка поля або теплиці розглядається як окремий об'єкт управління. Автоматизація процесів збору, обробки та аналізу даних дає змогу зменшити вплив людського фактору, підвищити точність прийняття рішень і своєчасно реагувати на негативні зміни у розвитку рослин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки спостерігається помітна інтенсифікація досліджень у сфері дистанційного моніторингу стану рослин. Значна частина робіт присвячена розвитку і валідації різних вегетаційних індексів як інструментів швидкої оцінки біофізичних параметрів рослинності та виявлення стресових станів. Одночасно активно розвиваються методи комбінування різних спектральних каналів (RGB + NIR, мультиспектр і гіперспектр) для підвищення інформаційної насиченості даних і зниження впливу зовнішніх перешкод (атмосфера, ґрунт, тінь) [1]. Огляд сучасних підходів показує, що оптимальна комбінація індексів і методів препроцесингу дозволяє підвищити чутливість моніторингу до ранніх проявів дефіциту поживних речовин та водного стресу [2].

Окрему групу робіт становлять дослідження, спрямовані на застосування БПЛА та високороздільної аерофотозйомки для оперативного картографування полів [3]. Праці з цього напрямку демонструють ефективність поєднання дронів з мультиспектральними камерами для побудови просторових карт індексів та виявлення локалізованих аномалій у рослинності. Такі рішення особливо корисні для середніх і великих господарств, де традиційний ручний огляд є неприйнятно трудомістким.

Незважаючи на науковий прогрес, у літературі також відзначається брак доступних та недорогих рішень, адаптованих для малих і середніх господарств або навчально-дослідних лабораторій. Багато комерційних систем залишаються дорогими та складними у впровадженні, що створює простір для розробки простих програмних інструментів, які працюють із доступними RGB+NIR камерами та забезпечують корисну аналітику в середовищі, придатному для наукової обробки. Саме ці напрямки – оптимізація набору індексів, вдосконалення препроцесингу зображень і розробка дружніх інтерфейсів для візуалізації результатів – перебувають у фокусі останніх публікацій і становлять методологічну основу представленої роботи.

Постановка завдання. Завданням роботи є аналіз сучасних методів контролю стану рослин та розробка підходу до автоматизованої обробки мультиспектральних зображень сільськогосподарських культур із використанням вегетаційних індексів. Реалізація поставленої мети дозволяє продемонструвати можливість створення ефективної, доступної та масштабованої системи моніторингу рослинності, що може бути використана для практичних аграрних задач та наукових досліджень.

Виклад основного матеріалу. Постійне збільшення обсягів агровиробництва та зниження придатності сільськогосподарських земель спонукають до використання технологій, що реалізують моніторинг стану рослин у реальному часі. Проте на сьогоднішній день для аналізу здоров'я сільськогосподарських культур широко використовуються також різноманітні лабораторні методи дослідження.

Методи визначення стану рослин. Методи визначення стану рослин можна умовно поділити на контактні та безконтактні. Кожна група має свої особливості, переваги та обмеження, що обумовлюють сферу їх застосування.

Контактні методи контролю базуються на безпосередньому вимірюванні фізіологічних та біохімічних характеристик листя або інших тканин рослини. До найпоширеніших методів цієї групи належать:

- визначення вмісту хлорофілу за допомогою контактних сенсорів, що дозволяє оцінити рівень фотосинтетичної активності та стан здоров'я рослин;
- аналіз рослинних соків, зокрема визначення концентрації цукрів, амінокислот, макро- і мікроелементів, що свідчить про поживний статус та наявність стресових факторів;
- лабораторні біохімічні дослідження, включаючи спектрофотометрію, хроматографію та визначення активності ферментів антиоксидантного захисту.

Переваги контактних методів полягають у високій точності, достовірності та можливості отримання кількісних показників, що дозволяє робити детальний аналіз фізіологічного та біохімічного стану рослин. Однак вони мають і недоліки: значні витрати часу, обмеженість у масштабуванні на великі площі, а також можливе пошкодження рослинних зразків під час відбору або вимірювань. Через це контактні методи найчастіше застосовують для дослідження окремих рослин або невеликих експериментальних ділянок.

Безконтактні методи дозволяють віддалено оцінювати стан рослинної маси, що особливо важливо для великих посівів і насаджень. В основі цих методів лежать різні фізичні принципи та технології. Найбільш поширені серед них наступні:

- мультиспектральні вимірювання, які фіксують інтенсивність відбиття світла поверхнями рослин у різних спектральних діапазонах (ультрафіолетовому, видимому та ближньому інфрачервоному). Це дає змогу оцінити рівень хлорофілу, водного стресу та виявляти пошкодження листя ще до появи видимих симптомів;
- тепловізійний моніторинг, який визначає коливання температури листя. Підвищення або зниження температури є показником водного стресу, порушень транспірації або активності фотосинтезу;
- флуориметричні вимірювання, що дозволяють оцінювати фотосинтетичну активність рослин шляхом аналізу флуоресценції хлорофілу. Цей метод є чутливим до змін у фізіологічному стані та дозволяє швидко виявляти стресові умови;
- комп'ютерний зір, який аналізує форму, колір, текстуру листя, дозволяє ідентифікувати окремі види рослин та виявляти симптоми хвороб або пошкодження шкідниками. Такі системи особливо ефективні у комбінації з алгоритмами машинного навчання та штучного інтелекту для автоматичної обробки зображень;
- гіперспектральний аналіз, що охоплює велику кількість спектральних діапазонів і дозволяє оцінити не лише зовнішній вигляд, а й хімічний склад тканин рослин, включаючи концентрацію пігментів, вологи та поживних речовин.

Головна перевага безконтактних методів полягає в можливості швидкого та масштабного аналізу: вони дозволяють оцінювати стан як окремих рослин, так і цілі насадження на великих площах. Це обумовило їх активне застосування у поєднанні з БПЛА, супутниковими системами дистанційного зондування та стаціонарними установками у теплицях. Безконтактні технології також забезпечують неперервний моніторинг, що дозволяє вчасно виявляти негативні фактори і коригувати агротехнічні заходи.

Роль вегетаційних індексів. Вегетаційні індекси відіграють ключову роль у сучасній агрономії та дистанційному зондуванні рослинності. Вони базуються на особливостях взаємодії рослинних тканин з електромагнітним випромінюванням і дозволяють кількісно оцінювати стан рослин, їхню життєздатність та ефективність фотосинтезу. Кожен індекс відображає певні аспекти фізіологічного стану рослин, що робить їх незамінним інструментом у моніторингу посівів, садів, лісових масивів та інших екосистем.

Найпоширенішим показником є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized difference vegetation index – NDVI), який використовується як узагальнений індикатор життєздатності та здоров'я рослин [4]. Високі значення NDVI характерні для щільної, здорової рослинності з активним фотосинтезом, тоді як низькі значення можуть свідчити про стресові умови, дефіцит води, нестачу поживних речовин або малу листову масу. Математична формула розрахунку NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

де NIR – коефіцієнт відбиття оптичного випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль; RED – коефіцієнт відбиття в червоному діапазоні видимого світла.

Слід враховувати, що значення NDVI залежать від зовнішніх умов, таких як зміна освітлення, наявність затінення, відкритого ґрунту або вологої поверхні.

Через це NDVI іноді не забезпечує достатньої точності для оцінки стану рослин у складних умовах або на ранніх етапах розвитку.

Для підвищення чутливості до змін у вмісті хлорофілу був розроблений зелений нормалізований різницевий індекс (Green normalized difference vegetation index – GNDVI). Він дозволяє виявляти початкові стадії деградації рослин ще до появи видимих симптомів, що робить його корисним у моніторингу стресових факторів, таких як нестача азоту. GNDVI розраховується наступним чином:

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (2)$$

де GREEN – коефіцієнт відбиття в зеленому діапазоні видимого світла.

Ще одним важливим індексом є ґрунтокоригований індекс рослинності (Soil-adjusted vegetation index – SAVI), який враховує вплив ґрунту. Він є ефективним для аналізу зріждених посівів або ранніх фаз розвитку, коли відкритий ґрунт істотно впливає на відбиття світла. Формула розрахунку SAVI:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)}(1 + L) \quad (3)$$

де L – коефіцієнт корекції ґрунту, що компенсує вплив його яскравості. Зазвичай приймає значення від 0 (для дуже щільної рослинності) до 1 (дуже рідка рослинність).

Для підвищення стабільності результатів за умов неоднорідного освітлення та атмосферних впливів застосовується підсилений вегетаційний індекс (Enhanced vegetation index – EVI). Він часто використовується у супутникових системах, де атмосфера може значно спотворювати сигнал. Цей індекс забезпечує кращу корекцію впливу аерозолів та тіней, підвищуючи точність оцінки стану рослин на великих територіях. Формула EVI:

$$EVI = G \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L)} \quad (4)$$

де G – коефіцієнт підсилення (масштабний коефіцієнт); C_1 , C_2 – коефіцієнти корекції впливу аерозолів через червоний та синій канали відповідно; BLUE – коефіцієнт відбиття випромінювання в синьому діапазоні видимого світла.

Стійкий до атмосферного впливу візуальний індекс (Visible atmospherically resistant index – VARI) застосовується для попередньої оцінки зеленості рослинного покриву у видимому спектрі. Він дозволяє швидко визначити зеленість листя та загальну вегетаційну активність, хоча не підходить для діагностики водного або температурного стресу. Розрахунок VARI:

$$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE} \quad (5)$$

Використання комбінації вегетаційних індексів дозволяє:

- раннє виявлення водного та поживного стресу;
- моніторинг росту і розвитку культур на великих площах;
- оптимізацію поливу та внесення добрив;
- прогнозування врожайності на основі динаміки вегетаційних індексів.

Наприклад, поєднання NDVI і GNDVI дозволяє вчасно виявити дефіцит азоту в кукурудзі ще до видимих симптомів пожовтіння листя.

Програмне забезпечення. На основі вегетаційних індексів в пакеті MATLAB розроблено програмне забезпечення, що дозволяє проводити автоматизований аналіз комбінованих вхідних зображень, що отримані у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах оптичного спектру (рис. 1).



Рис. 1. Вхідні RGB та NIR зображення

На початковому етапі роботи програмного алгоритму здійснено попередню обробку зображення з метою забезпечення коректності подальшого аналізу [5]. Далі виконано розрахунок вегетаційних індексів з побудовою просторових карт розподілу значень по всій сцені (рис. 2). Отримані результати дозволили виділити ділянки з різним ступенем розвитку рослинності та потенційними ознаками стресу.

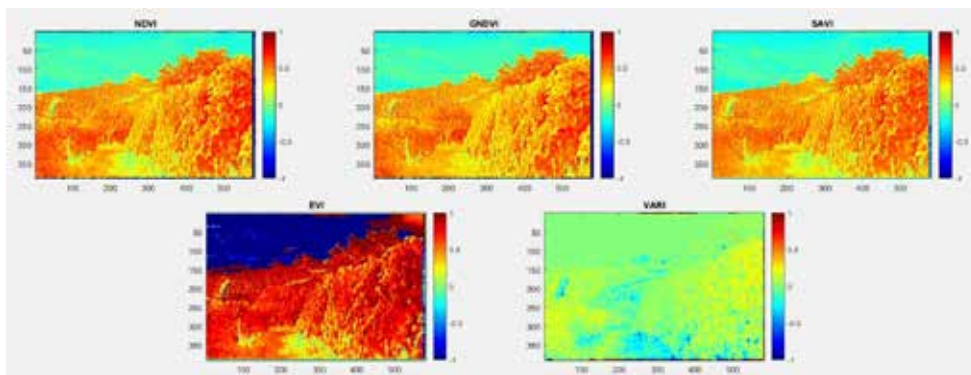


Рис. 2. Просторові картки розподілу значень вегетаційних індексів

Окрім графічної візуалізації результатів автоматично формуються табличні дані (рис. 3), що використовуються для комплексного аналізу та розшифрування числових значень вегетаційних індексів.

IndexName	ValueRanges	Interpretation	UseCases	Recommendations
NDVI	<0 0-0.1 0.1-0.3 0.3-0.6 >0.6	Грунт-густа рослинність	Моніторинг здоров'я	Полів / азот
GNDVI	<0.2 0.2-0.5 >0.5	Хлорофіл низький-високий	Оцінка хлорофілу	Азотні добрива
SAVI	<0.2 0.2-0.5 >0.5	Поверх слабкий-густий	Коефіцієнт грунту	Підвищити вологість
EVI	<0.1 0.1-0.3 >0.3	Біомаса слабка-велика	Густа рослинність	Перевірити хвороби
VARI	<0 0-0.1 0.1-0.2 >0.2	Зеленість слабка-висока	RGB-аналітика	Мікроелементи

Рис. 3. Таблиця інтерпретації результатів аналізу

Для ефективної ідентифікації рослинності на зображенні будується маска на основі порогового значення NDVI (рис. 4). Основна ідея полягає у виборі порогового рівня, перевищення якого вказує на наявність рослин. Для здорової рослинності характерні значення у діапазоні від 0.3 і вище, тоді як небо, ґрунт, суха трава, штучні об'єкти мають близькі до нуля або від'ємні значення NDVI.



Рис. 4. Результат застосування маски вегетативності

За значеннями NDVI додатково будується гістограма, наведена на рис. 5. На противагу простому перегляду карти вегетаційних індексів, гістограма дає змогу оцінити розподіл значень по всій сцені, окреслити домінуючі діапазони та виявити аномалії.

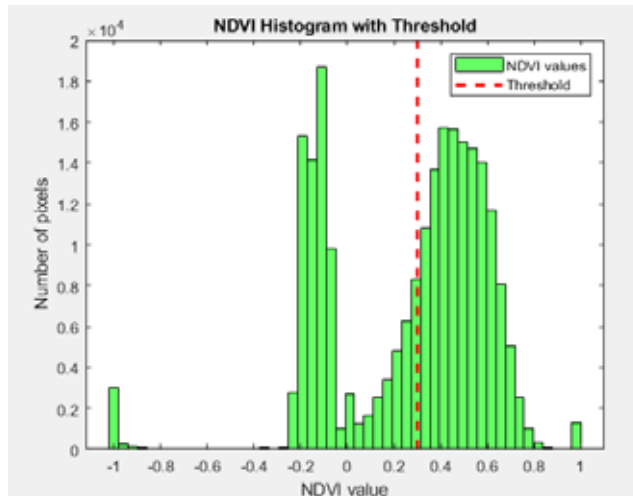


Рис. 5. Гістограма розподілу значень NDVI за пікселями зображення

Реалізована також можливість зосередження на певній ділянці зображення з метою більш детального аналізу шляхом вибору регіону інтересу (рис. 6), що дозволяє вивчати локальні характеристики, які можуть залишатися непоміченими в загальному розподілі індексів.

Комплексні результати аналізу візуалізуються з можливістю порівняння значень вегетаційних індексів для всього зображення (зліва) та локальних особливостей рослинності (справа), як показано на рис. 7.



Рис. 6. Локалізація області аналізу зображення

NDVI	0.266	0.548	Середня щільність
GNDVI	0.254	0.494	Нормальний рівень
SAVI	0.258	0.532	Гарний покрив
EVI	0.283	0.821	Густа біомаса
VARI	0.029	0.137	Середня зеленість

Рис. 7. Вегетаційні індекси для всього зображення та регіону інтересу

Комплексне використання вегетаційних індексів дозволяє проводити багаторівневий аналіз стану рослин, поєднуючи оцінку загальної зеленості, активності фотосинтезу та впливу зовнішніх факторів.

Висновки. В умовах зростаючих вимог до ефективності та сталості агрови-робництва саме безконтактні методи моніторингу є найбільш перспективними, оскільки вони дозволяють оперативно отримувати об'єктивну інформацію про фізіологічний стан рослин без пошкодження досліджуваних об'єктів і з мінімаль-ними витратами часу та ресурсів.

Комбіноване застосування вегетаційних індексів забезпечує більш точний та надійний моніторинг рослинності на різних стадіях розвитку та в різних умовах середовища, що особливо важливо для планування агротехнічних заходів, оцінки врожайності та раннього виявлення стресових ситуацій. Використання лише одного індексу не завжди забезпечує повну та достовірну оцінку стану рослин, тоді як їх поєднання підвищує інформативність і надійність результатів.

Запропонований підхід може бути використаний у системах точного землероб-ства, тепличних комплексах, фермерських господарствах та дослідницьких лабо-раторіях для моніторингу стану рослин у режимі, близькому до реального часу.

Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція методів машинного навчання для автоматичної класифікації станів рослин, адаптація алгоритмів до різних типів культур і умов освітлення. Це дозволить підвищити точність моніторингу та функціональні можливості автоматизованих систем контролю росту рослин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Fuzy A., Kovacs R., Cseresnyes I. et al. Selection of plant physiological parameters to detect stress effects in pot experiments using principal component analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2019. Vol. 41. 56. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2842-9>.
2. Jyoti P., Sourav S. et al. Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24. Issue 2. pp. 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.10.002>.
3. Chen A., Orlov-Levin V., Meron M. Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. *Agricultural Water Management*. 2019. Vol. 216. 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.017>.
4. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том. 34 (73). № 2. С. 199–205. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>.
5. Сторожик Д.В., Муравйов О.В., Протасов А.Г., Баженов В.Г., Богдан Г.А. Комплексування мультиспектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації. *KPI Science News*. 2020. № 2. С. 82–87. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.2.197955>.

REFERENCES:

1. Fuzy, A., & Kovacs R., & Cseresnyes I. et al. (2019). Selection of plant physiological parameters to detect stress effects in pot experiments using principal component analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 56. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2842-9>.
2. Jyoti P., & Sourav S. et al. (2021). Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24, 2, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.10.002>.
3. Chen A., & Orlov-Levin V., & Meron M. (2019). Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. *Agricultural Water Management*, 216, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.017>.
4. Muraviov O.V., & Dovbysh I.O., & Galagan R.M., & Bohdan H.A., & Momot A.S. (2023). Perspektyvy rozvytku tekhnolohii ta pidvyshchennia rivnia avtonomnosti BPLA. [Development prospects of technologies and increasing autonomy level of UAV] *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky*, 34 (73), 2, 199-205. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>. [in Ukrainian].
5. Storozhyk D.V., & Muraviov O.V., & Protasov A.G., & Bazhenov V.G., & Bohdan G.A. (2020). Kompleksuvannia multispektralnykh zobrazhen yak metod pidvyshchennia yikh informatyvnosti pry binarnii sehmentatsii. [Multispectral image combining as a method of information content increasing at binary segmentation] *KPI Science News*, 2, 82-87. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.2.197955>. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 30.12.2025