Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

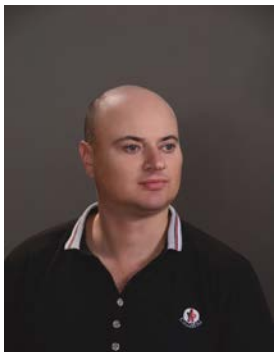
УДК 528.88: 633.358(477.72)
DOI https://doi.org/10.32782/3083-7464-2026-2-86-94



П. В. Лиховид
доктор сільськогосподарських наук, старший дослідник,
головний науковий співробітник відділу використання меліорованих земель,
Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України
(м. Київ, Україна)
E-mail: pavel.likhovid@gmail.com
orcid.org/0000-0002-0314-7644



Д. О. Максимов
кандидат сільськогосподарських наук,
науковий співробітник відділу зрошуваного землеробства
та декарбонізації агроекосистем,
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України
(смт. Хлібодарське, Одеський район, Одеська область, Україна)
E-mail: maksimovsinger@gmail.com
orcid.org/0009-0001-7461-6321



Г. В. Каращук
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри технологій виробництва
та переробки сільськогосподарської продукції
імені академіка В.Г. Пелиха,
Херсонський державний аграрно-економічний університет
(м. Кропивницький, Україна)
E-mail: karaschuk_gv@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4948-0952

МОДЕЛЮВАННЯ ФЕНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ ГОРОХУ ПОСІВНОГО ЯРОГО ЗА ЧАСОВОЮ ДИНАМІКОЮ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ SENTINEL-2

Залучення даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у практику фенологічного моніторингу сільськогосподарських культур є перспективним завданням сучасної аграрної науки. Беручи до уваги значну кількість наявних супутникових метрик, високу динамічність оптичних властивостей рослинного покриву та строкатість даних залежно від специфічних агроекологічних чинників, науковий і практичний інтерес становить вивчення регіональних особливостей адаптації вегетаційних індексів мультиспектрального та видимого діапазонів для потреб точного землеробства. Мета дослідження полягала у встановленні закономірностей часової динаміки мультиспектральних і RGB-індексів (за даними супутникової системи Sentinel-2) залежно від фенологічних фаз розвитку гороху посівного ярого (Pisum sativum L.) для розробки математичних моделей високоточного супутникового моніторингу посівів в умовах посушливого Степу України. Польові та камеральні дослідження проводили впродовж 2024–2025 рр. на базі дослідних масивів ФГ «Восток» (Херсонська область, Україна). Агротехнологія вирощування гороху ярого сорту Оплот відповідала загальноприйнятим зональним рекомендаціям для неполивних умов південного Степу. Наземні фенологічні спостереження здійснювали систематично за міжнародною шкалою BBCH, починаючи від фази повних сходів і до настання повної стиглості зерна та збирання врожаю. Первинні супутникові дані Sentinel-2 з просторовою роздільною здатністю 10 м отримували та обробляли із застосуванням платформи OneSoil. На основі часових серій спектральних знімків розраховували динаміку мультиспектральних та RGB-індексів, після чого проводили регресійний аналіз і математичне моделювання. Побудова фенологічних кривих та поліноміальних регресійних моделей дала змогу встановити, що специфіку переходу між фенологічними фазами гороху ярого найчіткіше відображають вегетаційні криві мультиспектральних індексів RECI, NDVI, NDWI, а також індексу видимого спектру RGRI. Встановлено, що прогнозування темпів росту та розвитку культури за поліноміальними моделями другого ступеня найвищу точність забезпечує при використанні часових серій NDVI та MSAVI: коефіцієнти детермінації склали 0,89 та 0,93 відповідно за середніх відносних похибок апроксимації, що не перевищували 15%. Індекси видимого спектру (RGB) продемонстрували нижчу чутливість до зміни біомаси та фізіологічного стану рослин протягом вегетації. Водночас серед них високу аналітичну цінність виявила модель на основі індексу RGRI, яка характеризувалася високим

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

коефіцієнтом детермінації 0,80 та відносно низькою відносною похибкою 12%. У результаті виконання роботи вперше для умов посушливого Степу України отримано математично обґрунтовані регресійні моделі зв'язку між фенофазами гороху ярого та часовими серіями супутникових індексів Sentinel-2. Практична цінність результатів полягає у можливості дистанційного прогнозування настання фенологічних фаз гороху посівного ярого у системі точного землеробства.
Ключові слова: *вегетаційний індекс, дистанційне зондування, математичне моделювання, супутниковий моніторинг, фенологія, шкала ВВСН.*

P. V. Lykhovyd
Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
Principal Researcher of the Department of Reclaimed Lands Use,
Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: pavel.likhovid@gmail.com
orcid.org/0000-0002-0314-7644

D. O. Maksymov
Candidate of Agricultural Sciences,
Researcher at the Department of Irrigated Agriculture and Decarbonization of Agroecosystems,
Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Khlibodarske, Odesa district, Odesa region, Ukraine)
E-mail: maksimovsinger@gmail.com
orcid.org/0009-0001-7461-6321

G. V. Karashchuk
Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Technologies of Production and Processing of Agricultural Products named after Academician V.G. Pelich,
Kherson State Agrarian and Economic University (Kropyvnytskyi, Ukraine)
E-mail: karaschuk_gv@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4948-0952

MODELING PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF SPRING PEAS USING TIME SERIES OF THE SENTINEL-2 VEGETATION INDICES

Integrating Earth observation (EO) data into crop phenological monitoring is a promising task in modern agricultural science. Given the wide range of available satellite metrics, the high dynamics of canopy optical properties, and data variability driven by specific agroecological factors, studying regional features of adapting multispectral and visible vegetation indices for precision agriculture is of substantial scientific and practical interest. The study aimed to determine the patterns of temporal dynamics in multispectral and RGB vegetation indices (derived from Sentinel-2 satellite data) across the phenological development stages of spring field pea (Pisum sativum L.) to develop mathematical models for high-precision satellite monitoring under the conditions of the arid Steppe of Ukraine. Field and laboratory studies were conducted during 2024–2025 at the experimental fields of the "Vostok" farm (Kherson region, Ukraine). Crop management practices for the spring pea cultivar Oplot adhered to standard zonal recommendations for rainfed conditions in the southern Steppe. Ground-based phenological observations were systematically performed according to the BBCH scale, ranging from full emergence to grain full maturity and harvesting. Primary Sentinel-2 satellite data with a spatial resolution of 10 m were retrieved and processed using the OneSoil platform. Time series of multispectral and RGB indices were calculated from spectral imagery, followed by regression analysis and mathematical modeling. Construction of phenological curves and polynomial regression models revealed that transitions between pea phenological stages were most distinctly captured by the vegetation curves of multispectral indices RECI, NDVI, NDWI, and the visible-spectrum index RGRI. Forecasting crop growth and development rates using second-order polynomial models achieved the highest accuracy with NDVI and MSAVI time series, yielding coefficients of determination of 0.89 and 0.93, respectively, with mean relative approximation errors within 15%. Visible-range (RGB) indices demonstrated lower sensitivity to changes in crop biomass and physiological state throughout the growing season. Nevertheless, the RGRI-based model showed high analytical value among RGB metrics, characterized by a coefficient of determination of 0.80 and a comparatively low relative error of 12%. Mathematically sound regression models linking spring pea phenological phases with Sentinel-2 satellite index time series were established for the first time under the conditions of the arid Steppe of Ukraine. The practical significance of the results lies in remote predicting upcoming phenological stages of spring peas within precision agriculture systems.
Key words: *vegetation index, remote sensing, mathematical modeling, satellite monitoring, phenology, BBCH scale.*

Постановка проблеми. Фенологічний моніторинг є важливою складовою агрономічних спостережень, запорукою своєчасного та ефективного реагування на зміну стану посівів шляхом оперативного коригування агротехнології. Традиційні динамічні спостереження вимагають значних витрат часу та матеріально-технічних ресурсів для візитів на поля та виконання окомірної оцінки росту і розвитку рослин. Залучення даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у практику спостережень за динамікою росту і розвитку сільськогосподарських культур і фенологічного моделювання є важливим і актуальним завданням сучасної аграрної науки, оскільки створює передумови автоматизації агромоніторингу, зниження його ресурсомісткості і трансформації на засадах цифровізації та уніфікації, що сприятиме трансферу агровиробничого процесу на засади точного землеробства [1]. На сьогоднішній день дані ДЗЗ стають все більш доступними широкому загалу. Втім, доступність даних не означає автоматичного підвищення ефективності прийняття управлінських рішень і оптимізації агротехнологій, оскільки існують суттєві прогалини в інтерпретації супутникових показників вегетації [2].

Аналіз останні досліджень та публікацій. Фенологія рослин являє собою динамічні зміни етапів їх фізіологічного розвитку, кожній із яких притаманні свої характерні особливості та вимоги до навколишнього середовища

і параметрів агротехнології. Фенологічний моніторинг є надзвичайно важливим для раціонального управління технологією вирощування культури [7]. Втім, донині здатність до високоточного універсального аналізу фенологічного розвитку сільськогосподарських культур на основі даних аерокосмічної зйомки залишається обмеженою, а наукова інтерпретація динаміки супутникових вегетаційних індексів – неоднорідною [6].

У сучасних моделях фенологічного моніторингу, що базуються на даних ДЗЗ, в основу частіше за все покладено так звану фенологічну криву (лінію апроксимації), що є відображенням величини певного вегетаційного індексу впродовж періоду росту і розвитку культури на полі [18]. Власне за кривизною цієї лінії можна робити висновок про перебіг та інтенсивність ростових процесів, а також відмічати критичні періоди і спостерігати за реакцією рослин на стресори. Інший підхід до залучення даних аерокосмічного моніторингу полягає в оцінці тренду (висхідного або низхідного) в історичній згладженій часовій серії величини обраних вегетаційних індексів для встановлення сили імпульсу ростових процесів і порогових значень по кожній із фенологічних фаз. Обидва підходи добре зарекомендували себе у картуванні фенологічного розвитку сільськогосподарських культур на різних за масштабами площах [7].

Емпіричні математичні моделі фенологічного розвитку сільськогосподарських культур також набули певного розвитку та мають високу науково-практичну цінність. Так, було розроблено модель росту і розвитку кукурудзи зернової та сої, вирощуваних в умовах штату Іллінойс, США, яка забезпечувала достатньо високу адекватність і точність прогнозування фенофаз досліджуваних культур на основі згладженої часової серії супутникових знімків Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) – коефіцієнт детермінації перевищив 0,6 за величини середньоквадратичної похибки менше ніж один тиждень [6].

Застосування супутникових знімків Sentinel-2 дозволило побудувати моделі фенологічного розвитку пшениці озимої, картоплі та кукурудзи на силос на основі розрахункових величин фракції фотосинтетично активної радіації (fAPAR) та фракції вегетаційного покриву (fCover), оцінених за даними аерокосмічного знімання. Статистична оцінка розроблених моделей засвідчила про їх високу апроксимаційну адекватність і точність (коефіцієнт детермінації, залежно від культури, коливався в межах 0,95–0,99; середньоквадратична похибка не перевищувала 0,040 діб), що дозволяє стверджувати про перспективність запропонованого підходу до моделювання фенологічного розвитку сільськогосподарських культур [9].

Науковці з Китаю розробили алгоритм глибокого машинного навчання PSeqNet, який поєднує супутникові та метеорологічні дані для виявлення й прогнозування фенологічних фаз росту і розвитку сільськогосподарських культур. Завдяки врахуванню складних взаємозв'язків між фазами розвитку рослин і пов'язаними ростовими процесами, модель перевершила класичні методи за точністю (середня абсолютна помилка прогнозу фенологічної фази склала 3,3–4,0 діб за коефіцієнту кореляції в межах 0,56–0,66) та продемонструвала високу ефективність упродовж вегетаційного періоду рису [20].

Окрім алгоритмів, на точність фенологічного моніторингу впливають і власне предиктори – вегетаційні індекси, обрані у якості вхідних параметрів фенологічних моделей. Найбільш часто до завдань фенологічного моніторингу залучають нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), який є найбільш широко доступним і одним із найбільш вивчених агрономічно значущих супутникових вегетаційних індексів [11]. Для полегшення та автоматизації процесу одержання інформації про фенологію зернових культур науковцями було розроблено програмний пакет CropPhenology для мови програмування R, який дозволяє розрахувати 15 ключових фенологічних індикаторів на основі величини NDVI впродовж вегетаційного періоду, а також виконувати візуалізацію та просторово-часовий аналіз результатів [3].

Втім, окремі дослідники вважають, що NDVI не завжди є оптимальним вибором. Так, наприклад, доведено високу точність оцінки настання фенологічних фаз кукурудзи зернової за динамікою величини атмосферно-стійкого індексу видимого спектрального діапазону (VARI) [21]. Встановлено, що для моніторингу за ростом і розвитком різних сільськогосподарських культур у відмінних агроекологічних умовах потрібно обирати вегетаційні індекси індивідуально, оскільки не існує універсального індикатору оцінки ростових процесів, який би забезпечував стабільну ефективність для різних за морфо-біологічними характеристиками рослин [10]. Розроблено і більш специфічні вегетаційні індекси, наприклад, індекс фенології рослин (PPI), який використовує схожі спектральні канали (червоний і ближній інфра-червоний), але має значно вищу чутливість до динаміки зеленого листкового покриву і меншу – до атмосферних і наземних спотворень [12]. Проте такі високоспецифічні індекси мають нижчу поширеність практичного використання, оскільки більшість платформ аерокосмічного моніторингу, доступні для агровиробників, не пропонують такі індикатори, а ручний розрахунок на основі сирих супутникових знімків є прерогативою науково-педагогічних працівників і спеціалістів, а не агрономів-практиків.

Мета статті. Враховуючи недостатній рівень вивченості питання фенологічного моніторингу сільськогосподарських культур за даними ДЗЗ, мета роботи полягає у встановленні закономірностей динаміки вегетаційних індексів видимого та мультиспектрального спектрів (на основі знімків Sentinel-2) залежно від фенологічних стадій гороху посівного ярого (*Pisum sativum* L.) для забезпечення можливості високоточного специфічного моделювання настання фенологічних фаз культури у зоні південного Степу України.

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

Матеріали та методи дослідження. Дослідження фенологічного розвитку гороху посівного ярого за даними ДЗЗ виконували впродовж 2024–2025 рр. на базі дослідних полів, розташованих у ФГ «Восток» Білозерського району Херсонської області. Координати дослідних полів у форматі WGS 84 (World Geodetic System) наступні: 46.713202, 32.227549; 46.735332, 32.327480; 46.735735, 32.335364; 46.718550, 32.301008.

У ґрунтово-кліматичному плані територія господарства належить до зони південного Степу України, характеризується посушливим кліматом (індекс аридності коливається в межах 0,3–0,4) і темно-каштановим середньосуглинковим залишково-солонцюватим ґрунтом, належить до зони ризикованого землеробства [Lykhovyd, 2021].

Польові дослідження проводили з використанням гороху посівного ярого (*Pisum sativum* L.) сорту Оплот, заснованого на загальноприйнятій для умов незрошуваного Степу елементній агротехнології. Попередником у сівозміні була пшениця озима. Основний обробіток ґрунту передбачав осіннє глибоке розпушування на 35–40 см. Передпосівну обробку насіння здійснювали комбінацією протруйника Максим XL 035 FS (д. р. флудіоксаніл, 25 г/л + металаксил-М, 10 г/л) та стимулятора росту Райкат Старт. Сівбу проводили сівалкою прямого висіву Great Plains Spartan із шириною міжрядь 19 см, нормою висіву 1,0–1,1 млн схожих насінин/га та глибиною загортання 4–5 см. Система захисту посівів включала: контроль бур'янів: внесення селективного гербіциду Норвел (д. р. хізалофоп-П-етил, 50 г/л); фунгіцидний захист: обробка рослин у період вегетації препаратом Дерозал 500, КС (д. р. карбендазим, 500 г/л); інсектицидний захист: дворазове внесення препарату Коннект 112.5 SC (д. р. імідаклоприд, 100 г/л + бета-цифлутрин, 12,5 г/л) у фази бутонізації (ВВСН 51–59) та закінчення цвітіння (ВВСН 69).

Збирання урожаю здійснювали методом прямого комбайнування з використанням зернозбирального комбайна Claas Tucano при досягненні повної стиглості зерна.

Фенологічні спостереження виконували як у безпосередніх візитах на дослідні поля, так і за даними ДЗЗ. За початок фенологічної фази вважали період її настання у 75% рослин на полі. Визначали наступні фенологічні фази культури: ВВСН 09–29 (сходи – галуження); ВВСН 30–49 (стеблування – бутонізація); ВВСН 50–69 (бутонізація – цвітіння); ВВСН 70–79 (формування бобів); ВВСН 80–89 (дозрівання). Супутникові дані отримано з платформи OneSoil, яка надає супутникові знімки Sentinel-2 із роздільною здатністю 10 м. Використовували тільки безхмарні знімки із повним покриттям площі дослідних полів без спотворень і білих плям. Розрахунок вегетаційних індексів виконували за загальновизнаною міжнародною методикою у Wolfram One із використанням вбудованого рушія обробки зображень. У дослідах використовували настіпні вегетаційні індекси: мультиспектральні – нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), нормалізований диференційний індекс зволоження (NDMI), нормалізований диференційний індекс червоного краю (NDRE), модифікований коригований на ґрунт вегетаційний індекс (MSAVI), індекс хлорофілу червоного краю (RECI), нормалізований диференційний водний індекс (NDWI), модифікований індекс адсорбції хлорофілу (MCARI); видимого спектру – надлишковий зелений (ExG), різниця надлишкового зеленого і червоного (ExGR), атмосферно-стійкий індекс видимого спектрального діапазону (VARI), індекс зеленої листкової поверхні (GLI), модифікований зелений-червоний вегетаційний індекс (MGRVI), зелений-червоний вегетаційний індекс (GRVI), індекс співвідношення червоного до зеленого (RGRI). У розрахунку вищевказаних індексів використовуються такі спектральні канали: видимий RGB-спектр (r – червоний, g – зелений, b – блакитний), NIR – близький інфрачервоний, SWIR – короткохвильовий інфрачервоний, RedEdge – крайній червоний. Характеристика вегетаційних індексів приведена у табл. 1.

За результатами польових і камеральних досліджень було виконано побудову фенологічних графіків вегетаційних індексів і визначено тісноту взаємозв'язку величини вегетаційних індексів із подобовою динамікою розвитку гороху посівного. Для усіх досліджуваних вегетаційних індексів розроблено поліноміальні регресійні моделі (поліном другого ступеня). Усі розрахунки та графічну роботу виконували за рівня надійності 95% у Microsoft Excel 365 використовуючи вбудований функціонал для аналізу даних [4].

Основні результати дослідження. У ході виконання досліджень відмічено високу репрезентативність величини мультиспектральних вегетаційних індексів щодо фенологічного розвитку гороху посівного ярого (рис. 1). Усі без винятку мультиспектральні індекси передають реальну динаміку фенологічного розвитку культури, а саме: поступове наростання надземної біомаси від початкового періоду росту і розвитку (ВВСН 09–29) до піку у фазу ВВСН 50–69 із поступовим спадом по мірі формування врожаю бобів і їх дозрівання. При цьому важливо вімітити обернено пропорційну криву для індексу водного стресу NDWI. Найбільш чітко відмінності між фенофазами гороху посівного, на наш погляд, передають вегетаційні криві індексів RECI, NDVI, та NDWI. Найбільш складним для інтерпретації фенологічної кривої виявився індекс зволоження NDMI.

Щодо вегетаційних індексів видимого спектру, то вони продемонстрували високу строкатість і нестабільність передачі динаміки росту і розвитку рослин гороху посівного. Максимально чітке уявлення надає індекс RGRI, але його обернено пропорційна дуга (мінімальні величини індексу за пікового розвитку надземної біомаси культури) вимагає додаткової уваги під час інтерпретації, оскільки у більшості випадків логічно очікувати максимальних величин вегетаційного індексу за максимального розвитку зеленого листкового покриву рослин. Вегетаційні індекси ExG та GLI

Таблиця 1

Рівняння для розрахунку і коротка характеристика вегетаційних індексів мультиспектрального і видимого спектру

Індекс	Назва і характеристика	Рівняння
Мультиспектральні індекси		
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index – основний і найбільш поширений вегетаційний індекс для оцінки загального стану рослин, прогнозу врожайності та різнопланового моніторингу [19]	$\frac{\overline{NIR-r}}{NIR+r}$
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index, нормалізований диференційний індекс крайнього червоного спектру – маркер азотного живлення рослин [19]	$\frac{NIR-RedEdge}{NIR+RedEdge}$
MSAVI	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index – використовується для моніторингу розрідженої рослинності та прогнозування продуктивності посівів [19]	$\frac{2NIR+1-\sqrt{(2NIR+1)^2-8(NIR-r)}}{2}$
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index – специфічний маркер вмісту хлорофілу в тканинах рослин, використовується для моніторингу і прогнозування продуктивності культур [19]	$\overline{[(RedEdge-r)-0.2(RedEdge-g)](\frac{RedEdge}{g})}$
NDMI	Normalized Difference Moisture Index – маркер водного стресу та рівня вологозабезпеченості посівів [13]	$\frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$
NDWI	Normalized Difference Water Index – індикатор водного стресу рослин [16]	$\frac{g-NIR}{g+NIR}$
RECI	Red Edge Chlorophyll Index – маркер вмісту хлорофілу в тканинах і забезпеченості рослин азотом [8]	$\overline{\left(\frac{NIR}{RedEdge}\right)-1}$
RGB-індекси (індекси видимого спектру)		
ExG	Excess Green Index – широко використовується для сегментування рослинності [17]	$2g-r-b$
ExGR	Excess Green minus Excess Red Index – використовується для чіткого виокремлення рослинного покриву та вільної від рослин території [17]	$3g-2.4r-b$
GLI	Green Leaf Index – оцінка загальної проєктної площі зеленого листкового покриву [17]	$\frac{\overline{2g-r-b}}{2g+r+b}$
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index – атмосферно-коригований індекс оцінки розвитку листкового апарату [17]	$\frac{g-r}{g+r-b}$
MGRVI	Modified Green Red Vegetation Index – індекс, створений для відстеження росту і розвитку рослин за змінами площі листкового покриву [14]	$\frac{g^2-r^2}{g^2+r^2}$
GRVI	Green-Red Vegetation Index – індекс для відстеження росту і розвитку рослин [14]	$\frac{\overline{g-r}}{g+r}$
RGRI	Red-Green Ratio Index – використовується для оцінки вмісту хлорофілу та відстеження динаміки наростання та відмирання зеленої біомаси [5]	$\frac{r}{g}$

мають дуже схожу динаміку, але межі між окремими фенофазами є розмитими, що ускладнює їх використання. Щодо інших вегетаційних індексів видимого спектру, розмах варіювання їх величини надзвичайно ускладнюють фенологічний моніторинг.

Поліноміальні регресійні моделі дозволяють визначити, скільки діб після сівби культури пройшло. Серед мультиспектральних індексів максимальну апроксимаційну точність забезпечили індекси NDMI та MSAVI (коефіцієнт детермінації 0,93), у той час як мінімально приданим для такого моделювання виявився індекс NDRE (коефіцієнт детермінації 0,76) та NDWI (відносна похибка понад 100%). Відносні похибки прогнозів за всіма розробленими моделми наведено в табл. 2. Враховуючи високу похибку для NDMI, і найнижчі величини для NDRE, NDVI та MSAVI, можна дійти висновку, що в посушливих умовах південного Степу України для фенологічного моніторингу і прогнозування розвитку гороху посівного ярого найбільш інформативними є коригований на ґрунтові умови (MSAVI) та стандартний NDVI вегетаційні індекси, оскільки вони забезпечують максимально вдале поєднання високої якості апроксимації фенологічної кривої та точності математичного прогнозування в межах 15% похибки (рис. 2).

Стосовно вегетаційних індексів видимого спектру, їх прогностична цінність суттєво поступається мультиспектральним. Так, максимальну якість апроксимації розвитку культури забезпечили такі індекси як RGRI та GLI (коефіцієнти детермінації 0,80 та 0,79 відповідно), але їх прогностична цінність поступається більшості мультиспектральних метрик (рис. 3). При цьому RGRI забезпечує доволі високу точність прогнозування за похибки в межах 12–13%. Найменшу придатність продемонстрували індекси ExG та ExGR (коефіцієнт детермінації 0,75 і похибка в межах 55–80%).

В цілому, прогнозувати розвиток рослин гороху посівного ярого за даними вегетаційних

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

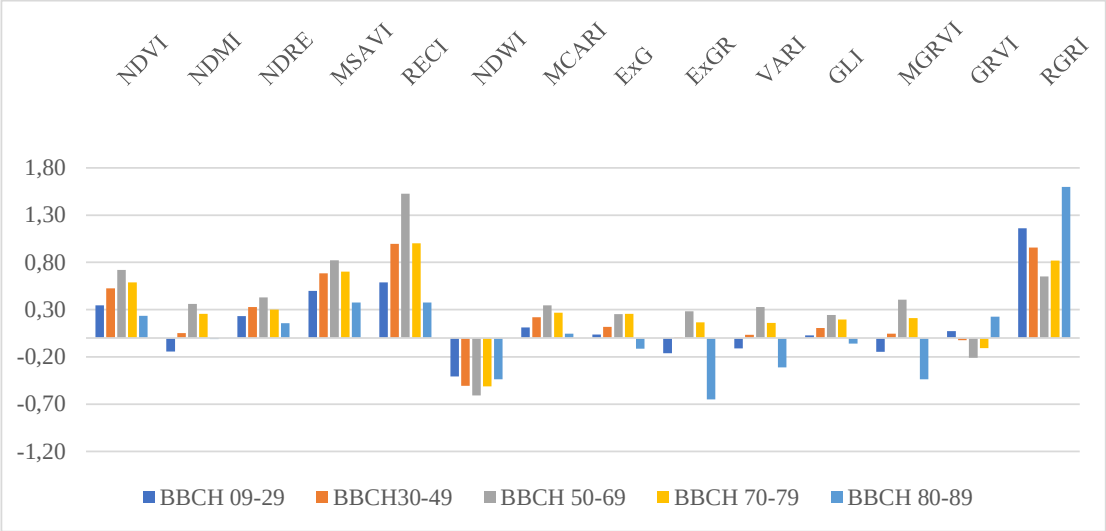


Рис. 1. Динаміка величини вегетаційних індексів за фенологічними фазами розвитку рослин гороху посівного ярого, 2024–2025

Таблиця 2

Відносні похибки поліноміальних моделей фенологічного розвитку гороху посівного ярого залежно від величини вегетаційного індексу*

Індекс	Відносна похибка, %	Індекс	Відносна похибка, %
NDVI	12,67	ExG	77,11
NDMI	49,36	ExGR	57,97
MSAVI	14,59	GLI	56,67
MCARI	46,45	VARI	62,89
RECI	16,99	MGRVI	67,40
NDRE	11,65	GRVI	58,19
NDWI	117,70	RGRI	12,08

**Примітка: 10% похибки – приблизно 8 діб вегетації культури.*

індексів видимого спектру є більш складним і менш точним завданням. Відсутність специфічних спектральних каналів дається взнаки, а стандартний RGB-спектр виявляється обмеженим у своїй здатності чітко передавати особливості процесів фенологічного розвитку культури. Таким чином, не дивлячись на потенційну економію коштів, оскільки вартість супутникових знімків видимого спектру є значно нижчою за мультиспектральні, не доцільно використовувати RGB-метрики для фенологічного моніторингу посівів гороху ярого.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що мультиспектральні вегетаційні індекси є джерелом цінної інформації про фенологію гороху посівного ярого. Максимально ефективне розмежування фенологічних фаз культури за вегетаційною кривою забезпечили індекси RECI, NDVI, та NDWI. Прогнозування строків росту і розвитку гороху посівного ярого в посушливих умовах південного Степу України за поліноміальною регресійною моделлю другого ступеня найбільш точно можна здійснити за часовою серією мультиспектральних індексів NDVI та MSAVI (коефіцієнт детермінації моделі становив 0,89 та 0,93 відповідно за похибок в межах 15%). Вегетаційні індекси видимого спектру продемонстрували істотно гіршу здатність передавати динаміку ростових процесів культури. Поліноміальні регресійні моделі продемонстрували загалом нижчу точність і якість апроксимації, втім, на увагу заслуговує модель на базі вегетаційного індексу RGRI (коефіцієнт детермінації 0,80 та похибка 12% відповідно).

Подяки. Автори висловлюють вдячність фермерському господарству «Восток» Білозерського району Херсонської області за надання бази та організаційну підтримку під час виконання дослідження.

Фінансування дослідження. Автори заявляють, що дослідження виконано без зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Авторський внесок.

Лиховид П. В.: визначення концепції дослідження; підбір методів дослідження; валідація відтворюваності результатів; аналіз даних; управління даними; підготовка рукопису – первинний текст; графічне представлення результатів; наукове керівництво; адміністрування процесу.

Максимов Д. О.: визначення концепції дослідження; проведення експерименту; забезпечення ресурсами та обладнанням; управління даними.

Каращук Г. В.: валідація відтворюваності результатів; підготовка рукопису – перегляд і редагування; залучення фінансування.

Декларація використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки рукопису генеративні інструменти штучного інтелекту / ШІ-асистовані технології не використовувалися.

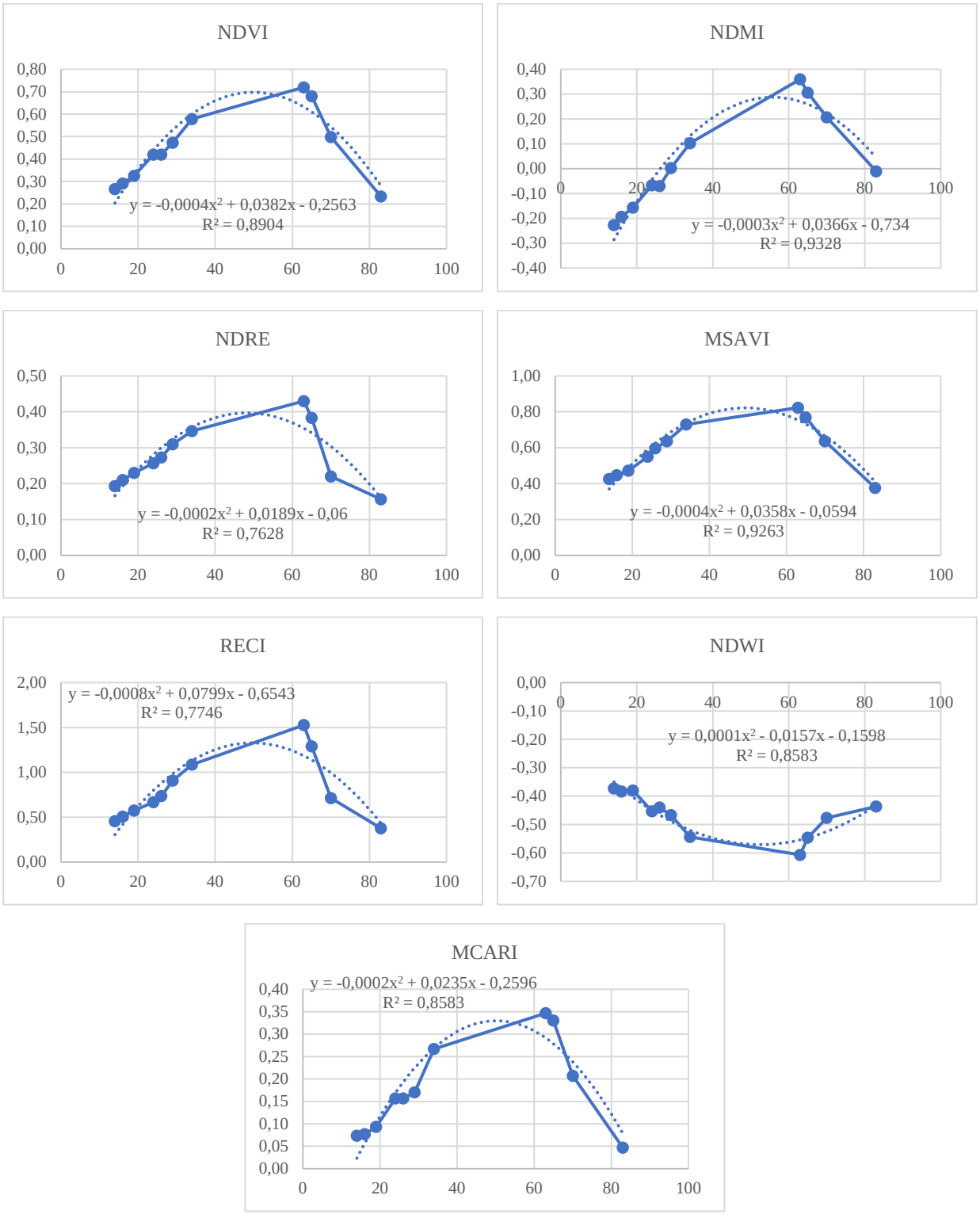


Рис. 2. Поліноміальні регресійні моделі розвитку гороху посівного ярого залежно від величини мультиспектрального вегетаційного індексу

ISSN 3083-7448 (PRINT)
ISSN 3083-7464 ONLINE)

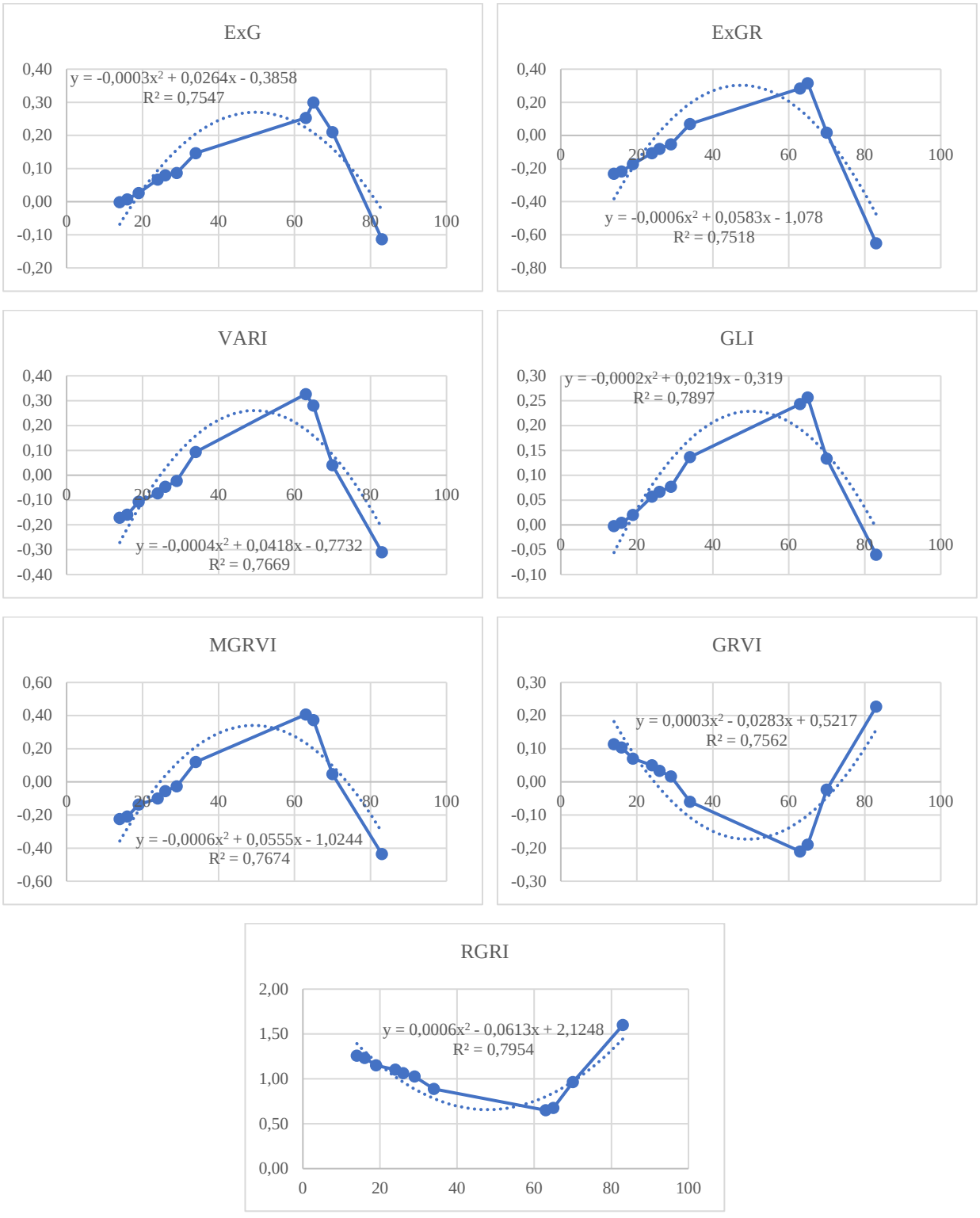


Рис. 3. Поліноміальні регресійні моделі розвитку гороху посівного ярого залежно від величини вегетаційного індексу видимого спектру

References

1. Lykhovyd, P. V., Vozhehova, R. A., Averchev, O. V. (2025). Ahroekolohichnyj i fenolohichnyj monitorynh posiviv burkunu biloho z vykorystannyam normalizovanoho dyferencijnoho vehetacijnoho indeksu [Agroecological and phenological monitoring of white melilot crops using normalized difference vegetation index]. *Tavriiskyi Naukovyi Visnyk*, 145(1), 190–196. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.1.22 [In Ukrainian].

2. Shulha, S. S., Vasylkovska, K. V., Moroz, S. M., Vasylkovska, M. O. (2026). Analiz zminy indeksiv vehetaciyi pry vyroshhuvanni silskohospodarskykh kultur [Analysis of changes in vegetation indices during the cultivation of agricultural crops]. *Ahrarni Innovatsii*, 35, 381–388. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.35.54 [In Ukrainian].

3. Araya, S., Ostendorf, B., Lyle, G., Lewis, M. (2018). CropPhenology: An R package for extracting crop phenology from time series remotely sensed vegetation index imagery. *Ecological Informatics*, 46, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.05.006

4. Burzul, S. (2024). On the pros and cons of using Excel for regression analysis. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 12(s2), 2234–2241. https://doi.org/10.24925/turjaf.v12s2.2234-2241.6931

5. Chen, C., Yuan, X., Gan, S., Luo, W., Bi, R., Li, R., Gao, S. (2024). A new vegetation index based on UAV for extracting plateau vegetation information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128, 103668. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103668

6. Diao, C. (2020). Remote sensing phenological monitoring framework to characterize corn and soybean physiological growing stages. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111960. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111960

7. Gao, F., Zhang, X. (2021). Mapping crop phenology in near real-time using satellite remote sensing: Challenges and opportunities. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 8379391. https://doi.org/10.34133/2021/8379391

8. Gitelson, A. A., Vinaa, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, L08403. https://doi.org/10.1029/2005GL022688

9. Gobin, A., Sallah, A. H. M., Curnel, Y., Delvoye, C., Weiss, M., Wellens, J., Piccard, I., Planchon, V., Tychon, B., Goffart, J.-P., Defourny, P. (2023). Crop phenology modelling using proximal and satellite sensor data. *Remote Sensing*, 15(8), 2090. https://doi.org/10.3390/rs15082090

10. Hatfield, J. L., Prueger, J. H. (2010). Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote Sensing*, 2(2), 562–578. https://doi.org/10.3390/rs2020562

11. Ji, Z., Pan, Y., Zhu, X., Wang, J., & Li, Q. (2021). Prediction of crop yield using phenological information extracted from remote sensing vegetation index. *Sensors*, 21(4), 1406. https://doi.org/10.3390/s21041406

12. Jin, H., Eklundh, L. (2014). A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment*, 152, 512–525. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010

13. Lastovicka, J., Svec, P., Paluba, D., Kobliuk, N., Svoboda, J., Hladky, R., Stych, P. (2020). Sentinel-2 data in an evaluation of the impact of the disturbances on forest vegetation. *Remote Sensing*, 12, 1914. https://doi.org/10.3390/rs12121914

14. Lima, C. S., Soares, A. J. T., Nogueira, B. S., Vian, A. L., Carvalho, I. R., Bredemeier, C. (2026). Methodology for selecting stable UAV-based vegetation indices for prediction of agronomic variables in maize using a multispectral sensor. *Plants*, 15(12), 1782. https://doi.org/10.3390/plants15121782

15. Lykhovyd, P. (2021). Irrigation needs in Ukraine according to current aridity level. *Journal of Ecological Engineering*, 22(8), 11–18. https://doi.org/10.12911/22998993/140478

16. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

17. Rosen, L., Ewing, P. M., Runck, B. C. (2024). RGB-based indices for estimating cover crop biomass, nitrogen content, and carbon:nitrogen ratio. *Agronomy Journal*, 116(6), 3070–3080. https://doi.org/10.1002/agj2.21657

18. Seo, B., Lee, J., Lee, K. D., Hong, S., Kang, S. (2019). Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field Crops Research*, 238, 113–128. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.015

19. Sishodia, R. P., Ray, R. L., Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12, 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

20. Tian, Q., Jiang, H., Zhong, R., Xiong, X., Wang, X., Huang, J., Du, Z., Lin, T. (2025). PSeqNet: A crop phenology monitoring model accounting for phenological associations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 225, 257–274. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.04.039

21. Vina, A., Gitelson, A. A., Rundquist, D. C., Keydan, G., Leavitt, B., Schepers, J. (2004). Monitoring maize (Zea mays L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal*, 96(4), 1139–1147. https://doi.org/10.2134/agronj2004.1139

Дата першого надходження статті до видання: 05.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 24.11.2026