

МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ЗАНЕДБАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ У ПЕРЕДГІРСЬКІЙ ГРОМАДІ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ SENTINEL-2

Мета статті - виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь у межах Вигодської територіальної громади Івано-Франківської області шляхом багатокритеріального аналізу на основі космічних знімків Sentinel-2, вегетаційних індексів, топографічних та інфраструктурних параметрів. **Методика.** Запропоновано адаптований підхід багатокритеріального просторового моделювання для виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь. Для проведення дослідження використано багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 за серпень 2024 року. З метою виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь у межах досліджуваної території розраховано сім вегетаційних індексів, з яких до фінальної моделі включено NDVI, MSAVI2 та RECI, що найкраще відображають стан, щільність та тип рослинного покриву. Додатково враховано три неспектральні змінні: ухил поверхні, відстань до доріг та відстань до житлової забудови. Усі просторові шари зведено до однакової просторової розрізненості, нормалізовано та перекласифіковано за п'ятибальною шкалою придатності. Для інтеграції даних застосовано метод зваженого накладання у середовищі ArcGIS Pro, що забезпечив побудову інтегрального шару ймовірності занедбаності, де вагові коефіцієнти кожного шару були визначені за результатами тестування та експертної оцінки. **Результати.** Побудована карта ризику занедбаності демонструє просторову неоднорідність сільськогосподарських угідь громади. Ділянки з найвищими класами ризику (4–5) зосереджені переважно у південній та північно-східній частинах території, що пов'язано з гірським рельєфом, обмеженою доступністю та мозаїчністю землекористування. У центральній частині переважають ділянки з низьким ризиком занедбаності (класи 1–2), характерні для активного обробітку. Узгодженість між отриманим результатом і багатоспектральними знімками свідчить про ефективність підходу у виявленні занедбаних угідь у структурно складному передгірному середовищі. **Практична значущість.** Запропонований підхід дає змогу ефективно ідентифікувати просторові осередки деградації землекористування для потреб місцевого планування, агроекологічного моніторингу та розробки стратегій підтримки сталого землекористування в гірських громадах.

Ключові слова: занедбані землі, просторове моделювання, космічні знімки, Sentinel-2, багатокритеріальний аналіз, вегетаційні індекси, передгір'я Карпат.

Вступ

Проблема занепаду сільськогосподарських угідь набуває дедалі більшої актуальності на фоні структурної трансформації аграрного сектора, депопуляції сільських територій, скорочення трудових ресурсів та зниження рентабельності агровиробництва. У глобальному та європейському вимірах це явище розглядається як один із ключових викликів для сталого землекористування, продовольчої безпеки та збереження агробіорізноманіття (Ustaoglu, Collier, 2018; Prishchepov et al., 2021). Під терміном “занедбані землі” зазвичай розуміють довготривале припинення сільськогосподарського використання без подальшої трансформації функціонального призначення (наприклад, урбанізація чи заліснення), що супроводжується поступовим відновленням природної рослинності (Cramer et al., 2008; FAO, 2023). За оцінками

Європейської комісії, до 2030 року в ЄС понад 5,6 млн га сільськогосподарських угідь можуть бути класифіковані як занедбані (Castillo et al., 2018).

Попри високу увагу до цієї проблематики в Західній Європі, у постсоціалістичних країнах, зокрема в Україні, масштаби, чинники та наслідки аграрного занепаду залишаються недостатньо вивченими. Наслідки колективізації, затяжна реформа ринку земель, фрагментоване землеволодіння, неформальні моделі користування та інституційна невизначеність сформували складну мозаїку земель, що частково використовують, перебувають у стадії природної сукцесії або взагалі втратили функцію господарського призначення (Kuemmerle et al., 2008; World Bank, 2024). Понад 4 млн га сільськогосподарських земель в Україні залишаються незадіяними (UABIO, 2019).

Особливо вразливими є західні регіони України, зокрема території передгір'я Карпат, де природні чинники (складний рельєф, фрагментованість земельних ділянок, деградація ґрунтів) поєднуються із соціально-економічними викликами (старінням населення, відтоком трудових ресурсів, обмеженим доступом до фінансування та низьким рівнем інвестицій) (Baumann et al., 2011; Keenleyside et al., 2010). Відсутність в Україні нормативно закріпленого визначення або механізму обліку занедбаних земель, на відміну від країн ЄС, значно ускладнює їх ідентифікацію, моніторинг і просторове планування.

У таких умовах дистанційне зондування Землі постає як перспективний та економічно ефективний інструмент для просторової діагностики змін землекористування. Аналіз вегетаційних індексів дає змогу виявити стійке зниження біомаси, згладжування сезонної динаміки або ознаки вторинної сукцесії, що є ключовими спектральними маркерами потенційного занепаду (Estel et al., 2015). Багаторічні супутникові спостереження дають змогу диференціювати довготривале припинення обробітку від сезонного перелогу. Методологічний акцент робиться на попереднє опрацювання даних, побудову часових рядів і створення індексних карт (Куліковська et al., 2024).

На основі європейських досліджень (Ustaoglu, Collier, 2018; Castillo et al., 2018) доведено ефективність комплексного підходу, що поєднує спектральні характеристики з просторово-структурними чинниками – крутизною схилів, висотою, віддаленістю від інфраструктури та типом землекористування. Дослідження у Карпатському регіоні (Польща, Румунія, Україна) підтверджують високу ймовірність занепаду в зонах складного рельєфу, демографічного тиску та низької аграрної привабливості (Baumann et al., 2011; Kolecka, Kozak, 2019).

Водночас великомасштабне моделювання, наприклад, гібридної карти землекористування країн пострадянського простору (Lesiv et al., 2018) демонструє обмежену ефективність на територіях із фрагментованою структурою. У таких умовах спостерігається спектральна неоднозначність, пов'язана з мозаїчним характером землекористування, дрібноконтурністю полів і поширеними неформальними практиками. Це зумовлює необхідність переходу до методів, орієнтованих на багаторічний аналіз землекористування (Ye et al., 2024), що дає змогу простежити поступовий спад господарської активності.

Попри розвиток відповідних підходів, у національному контексті спостерігається дефіцит досліджень локального рівня, зокрема в межах територіальних громад, які безпосередньо відповідають за просторове планування, землекористування та реалізацію програм місцевого розвитку. Відсутність детального просторового моніторингу стану земель ускладнює прийняття

обґрунтованих рішень щодо повторного залучення угідь до обігу, екологічної реконверсії, попередження пожеж та розвитку ландшафтного менеджменту. Особливо це актуально для гірських і передгірних територій, де складний рельєф і дрібномасштабне землекористування потребують адаптивних, інтерпретованих та економічно (Ustaoglu, Collier, 2018; Castillo et al., 2018) доступних методів аналізу.

Мета статті

Метою статті є виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь у межах Вигодської територіальної громади Івано-Франківської області шляхом багатокритеріального аналізу на основі космічних знімків Sentinel-2, вегетаційних індексів, топографічних та інфраструктурних параметрів.

Методика

Територією дослідження обрано Вигодську селищну територіальну громаду Калуського району Івано-Франківської області (рис. 1) з огляду на її типову розташованість в межах передгірської зони Українських Карпат, складні фізико-географічні умови та наявність низки чинників, що зумовлюють підвищену ймовірність занепаду сільськогосподарських угідь.

Рельєф території представлений хвилястими та глибоко розчленованими височинами з абсолютними висотами від 400 до 900 м над рівнем моря. Поширеними є увалисто-грядові форми, численні схили середньої крутизни (10–25°), ерозійні балки та терасовані схили. Таке геоморфологічне різноманіття зумовлює неоднорідність природних умов ведення сільського господарства та істотно впливає на просторову структуру землекористування.

Ґрунтовий покрив громади сформований переважно на неогенових відкладах, алювіальних і лесовидних суглинках. У межах досліджуваної території поширені буроземи, буро-підзолисті та дерново-підзолисті оглеєні ґрунти, які характеризуються слабокислою або кислою реакцією середовища, зниженим вмістом гумусу та поживних речовин. Ґрунти часто мають ознаки ерозії, ущільнення й періодичного перезволоження. Такі умови ускладнюють механізований обробіток, знижують агровиробничу цінність земель і можуть сприяти залишенню або переведенню в інші форми використання (Hryhoriv et al., 2024).

Клімат території – помірно континентальний, із середньорічною кількістю опадів 700–1000 мм і тривалістю вегетаційного періоду до 210–215 днів. Висока зволоженість у поєднанні зі складним мікрорельєфом сприяє формуванню дрібноконтурної сітки землекористування, у якій сільськогосподарські угіддя чергуються з лісами, чагарниками, заплавами, луками й вторинними заростями.



Рис. 1. Географічне положення території дослідження

Структура землекористування громади є фрагментованою та включає ріллю, сіножаті, пасовища і значні площі, що потенційно вийшли з активного обробітку. Особливістю території є також низька щільність транспортної інфраструктури, наявність важкодоступних ділянок, обмежена кількість доріг з твердим покриттям. Ці чинники впливають на доступність землекористування і, отже, на ризик занепаду територій, віддалених від основних комунікацій і населених пунктів.

Отож фізико-географічні умови Вигодської громади створюють природні передумови для виведення частини сільськогосподарських угідь з активного використання. Це обґрунтовує вибір території як зони дослідження для виявлення потенційно занедбаних земель за допомогою інструментів просторового аналізу.

Для дослідження відібрано зображення із знімальної системи супутника Sentinel-2 рівня опрацювання Level-2A (Copernicus Data Space Ecosystem) за 15 серпня 2024 року. Це забезпечує атмосферно скориговані значення поверхневого відбиття і дає змогу виконувати спектральний аналіз без додаткового опрацювання. Вибір знімка зумовлений фазою вегетаційної активності та низьким рівнем хмарності (менше 10 %). Просторове охоплення Вигодської

територіальної громади забезпечене комбінацією двох суміжних сцен Sentinel-2.

Для врахування топографічних особливостей та просторової доступності земель у дослідженні використано цифрову модель рельєфу місцевості – модель SRTM 1 Arc-Second (USGS EarthExplorer) та шари дорожньої мережі та забудови (OpenStreetMap).

Попереднє опрацювання даних було спрямоване на забезпечення просторової та спектральної узгодженості даних для подальшого аналізу. Межі досліджуваної території визначено за поєднанням адміністративного охоплення Вигодської громади та просторової конфігурації сцен Sentinel-2. Усі обрані спектральні канали зведено до однакової просторової розрізненості (10 м) шляхом кубічної інтерполяції (European Space Agency, 2015). Такий підхід забезпечив просторову цілісність, дав змогу зменшити обсяг даних і підвищити ефективність подальшого опрацювання.

Для оцінки стану сільськогосподарських угідь у межах Вигодської громади застосовано спектральні вегетаційні індекси, що є ключовим аналітичним інструментом дистанційного зондування Землі. Вегетаційний індекс – це спектральний показник, розрахований на основі співвідношення відбитого електромагнітного випромінювання у різних спектральних діапазонах, зокрема ближнього інфра-

червоного (NIR) та видимого спектра. Значення таких індексів корелюють із біофізичними параметрами рослинного покриву, включно з його щільністю, біомасою, фотосинтетичною активністю та станом листкового апарату (Xue, Su, 2017).

Використання вегетаційних індексів дає змогу виявляти просторову гетерогенність продуктивності

рослинності та оцінювати її зміни у часі. У випадках недостатнього обробітку чи деградації сільськогосподарських земель спектральний сигнал зазвичай характеризується стабільно низькими або знижуваними значеннями індексів, що може бути непрямим індикатором занепаду угідь (Estel et al., 2015; Prishchepov et al., 2021).

Таблиця

Характеристики індексів рослинності, що використовують для виявлення потенційно занедбаних земель

Індекс	Формула	Опис
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$	Значення від -1 до +1. Оцінює щільність зеленої рослинності. У виявленні занедбаних земель NDVI широко використовується для фіксації зниження або відсутності сезонної вегетації, що характерно для необроблюваних ділянок (Estel et al., 2015; USGS)
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$(\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$	Значення від -1 до +1. Відображає вміст вологи у рослинах та ґрунті. Низькі значення вказують на сухі ділянки та деградовані умови, притаманні необробленим землям (USGS)
BSI (Bare Soil Index)	$((\text{SWIR1} + \text{RED}) - (\text{NIR} + \text{BLUE})) / ((\text{SWIR1} + \text{RED}) + (\text{NIR} + \text{BLUE}))$	Значення від -1 до +1. Високі значення вказують на відкритий ґрунт, низькі - на рослинність. Індекс дає змогу виявляти ділянки без зеленого покриву, що свідчить про ерозію чи занедбаність, особливо в умовах відсутності сільськогосподарської діяльності (Rouibah, Belabbas, 2020)
MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index v2)	$0.5 \times [2 \times \text{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \times \text{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\text{NIR} - \text{RED})}]$	Значення від -1 до +1. Низькі значення вказують на відкритий ґрунт або розріджену рослинність, високі - на щільну рослинність. Ефективний для аналізу територій зі змішаним покривом. Дає змогу виявити ранню сукцесію і початкові стадії природного відновлення, що властиво недавно покинутим землям (Qi et al., 1994)
GNDVI (Green NDVI)	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN})$	Значення від -1 до +1. Використовується для моніторингу ранніх фаз росту культур. У дослідженнях занедбаності може слугувати додатковим показником низької біологічної активності або сповільненого росту (Wang et al, 2024; EOS Data Analytics)
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2})$	Значення від -1 до +1. Низькі значення характеризують слабкий рослинний покрив. Може використовуватись для виявлення зменшеної біомаси й тривалого невикористання, навіть за відсутності ознак пожеж (Key, Benson, 2006; USGS)
ReCI (Red Edge Chlorophyll Index)	$(\text{NIR} / \text{RedEdge}) - 1$	Значення варіюються від ~0 до понад 10. Відображає вміст хлорофілу в рослинності. Особливо чутливий до змін у середньо-щільній та чагарниковій рослинності, типовий для природного відновлення. Дає змогу виявляти ділянки, де відбувається вторинне заростання - ознака тривалого покинення або сукцесії (Xiong et al., 2013; EOS Data Analytics)

З метою виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь у межах досліджуваної території було розраховано сім вегетаційних індексів на основі супутникових знімків Sentinel-2: NDVI, MSAVI2, RECI, BSI, NDMI, NBR та GNDVI (табл.). Кожен індекс оцінено за його теоретичною чутливістю до змін рослинності, вологості ґрунту, рівня фотосинтетичної активності, здатністю відображати спектральні ознаки, пов'язані з процесами занедбання

земель, зокрема накопичення біомаси, зменшення експозиції ґрунту та природної сукцесії рослинного покриву в умовах гірського рельєфу.

Для всебічного аналізу розрахованих вегетаційних індексів застосовано кілька підходів: візуальне картографування, аналіз гістограм розподілу значень, просторове порівняння з відомими ознаками занедбаності, а також нормалізація індексів для подальшої уніфікації у моделі. За результатами цього аналізу три індекси –

NDVI, MSAVI2 та RECI – виявилися найбільш релевантними для інтеграції у зважену модель. Їх комбінація забезпечувала високу чутливість до стану, структури й зрілості рослинного покриву, дозволяючи диференціювати активно оброблювані площі від покинутих чи маргінальних.

Зокрема, NDVI забезпечив надійний показник загальної щільності рослинності, дав змогу відрізнити оброблювані сільськогосподарські угіддя (із сезонною мінливістю) від більш послідовного зеленого відновлення, типового для занедбаних територій. MSAVI2 продемонстрував покращені показники в районах із розрідженим покривом або змішаною структурою, що характерно для деградованих або частково занедбаних ділянок, і краще компенсує фоновий вплив ґрунту. RECI завдяки чутливості до концентрації хлорофілу дав змогу фіксувати ознаки вторинної сукцесії, зокрема заростання чагарниками, розвиток природного відновлення територій або ранню лісову сукцесію, які не завжди враховувалися NDVI або MSAVI2.

Решта індексів, хоча й мали теоретичне обґрунтування, були надлишковими, менш специфічними, нестабільними в умовах горбистої місцевості або не давали змоги розрізняти різні типи землекористування досліджуваної території. Зокрема, BSI продемонстрував високу варіативність у ділянках із частковим рослинним покривом, де спектральні сигнали відкритого ґрунту перекривалися із сухою рослинністю. NDMI та NBR зазнавали спотворень, спричинених топографічною складністю, що ускладнювало інтерпретацію результатів. GNDVI, попри свою чутливість до вмісту хлорофілу, фактично повторював поведінку NDVI без суттєвого покращення розподільчої здатності. Усі індекси використано на етапі візуального аналізу для перевірки просторових закономірностей та перевірки результатів.

Оскільки спектральні індекси відображають переважно біофізичні властивості рослинного покриву, для підвищення точності моделювання включено структурні та контекстуальні чинники, що враховують фізичні та логістичні обмеження для землекористу-

вання. До них належать ухил поверхні, відстань до доріг та будівель населених пунктів. Стрімкі схили ускладнюють механізовану обробку, а віддаленість від інфраструктури обмежує економічну доцільність ведення господарства, що часто зумовлює припинення його використання.

Отже, фінальна аналітична модель охоплювала шість просторових шарів: NDVI, MSAVI2, RECI, ухил поверхні, відстань до доріг та відстань до житлової забудови.

Враховуючи складну просторову природу занедбаності сільськогосподарських земель, яка формується під впливом взаємодії біофізичних, топографічних та інфраструктурних факторів, виникла потреба у використанні методу, здатного поєднати різномірні джерела інформації в єдину модель. У цьому контексті доцільним є застосування багатокритеріального аналізу, який забезпечує комплексну оцінку ризику занедбаності шляхом поєднання кількох просторових шарів з урахуванням їх відносної вагомості.

Для реалізації такого підходу використано інструмент зваженого накладання (Weighted Overlay) у середовищі ArcGIS Pro, що дає змогу об'єднати нормалізовані растрові дані різної природи в єдину модель оцінки придатності з врахуванням вагових коефіцієнтів. Для моделювання використано шари, попередньо відібрані на основі аналізу вегетаційних індексів і просторових обмежень. Підготовка даних до зваженого накладання полягала у перетворенні векторних даних на растри за допомогою інструмента Euclidean Distance, уніфікацію всіх растрових шарів за просторовою розрізненістю, межами та типом даних.

Значення кожного шару були перекласифіковані на основі аналізу гістограм (рис. 2) та експертної інтерпретації до спільної шкали значень (від 1 до 5), де 1 відповідає сприятливим умовам для активного землекористування, а 5 – типовим ознакам занедбаності. Лісові ділянки було попередньо вилучено з моделювання за допомогою маски, а згодом повернуто до результуючої карти як окрему категорію.

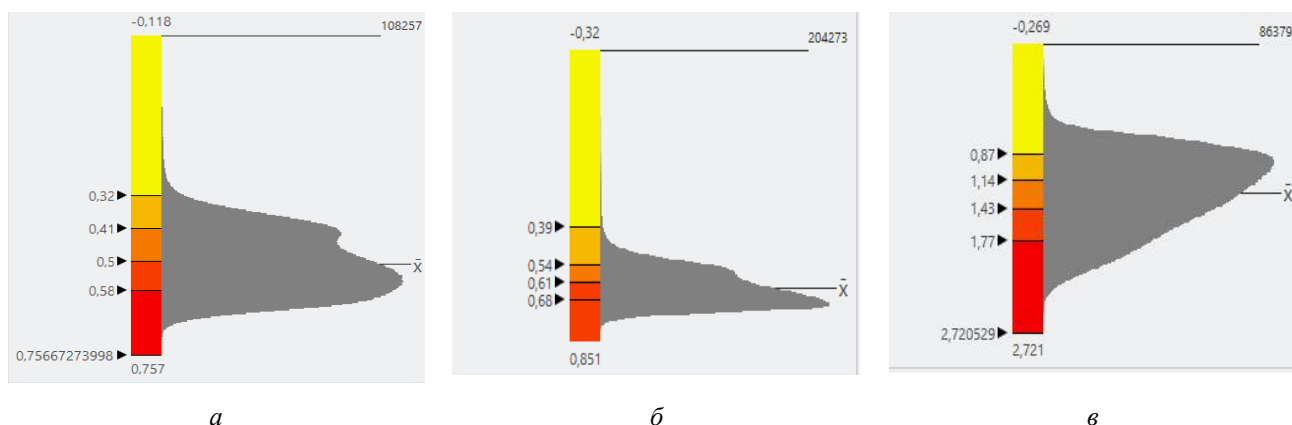


Рис. 2. Гістограми розподілу значень вегетаційних індексів: а - NDVI; б - MSAVI; в - ReCI

Вагові коефіцієнти встановлено на основі ітеративного тестування альтернативних конфігурацій з урахуванням специфіки регіону, літературного огляду, а також емпіричної перевірки ефективності кожного критерію в межах досліджуваної території для виявлення потенційно занедбаних земель.

Найвищу вагу отримали NDVI і MSAVI2 (по 20 %), що відображають ключові ознаки відновлення чи деградації рослинного покриву. Значну роль також відіграли відстань до доріг (20 %), ухил місцевості (15 %) та RECI (15 %) як маркер ранньої сукцесії. Меншу вагу присвоєно відстані до забудови (10 %). Лісові площі попередньо замасковано та згодом інтегровано в кінцевий результат як окрему категорію для аналітичної відмінності від потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь.

У підсумку отримано інтегральний растр (рис. 3), що відображає просторову ймовірність занедбаності, де вищі значення відповідають умовам, типово пов'язаним з деградацією, заростанням або зменшенням господарської активності.

Отож на основі обраних біофізичних, топографічних та інфраструктурних критеріїв отримано інтегральну модель просторового розподілу потенційно занедбаних сільськогосподарських земель.

Результати

Інтегральна карта ймовірності занедбаності демонструє просторову диференціацію сільськогосподарських угідь Вигодської громади за п'ятибальною шкалою ризику. Територія охоплює як активно використовувані площі (класи 1-2), так і зони з підвищеним ризиком занедбаності (класи 4-5) з ознаками тривалого припинення обробітку.

Потенційно занедбані ділянки (зелені відтінки) зосереджені переважно в південній та північно-східній частинах громади. Для цих зон характерний складний

рельєф, підвищена віддаленість від дорожньої інфраструктури та мозаїчне землекористування. Натомість у центральному секторі моделі переважають ділянки з низькою ймовірністю занедбаності, що корелює з більшою щільністю забудови, наявністю транспортної мережі та активним використанням земель. Загальна картина підтверджує просторову обґрунтованість моделі та релевантність обраних критеріїв.

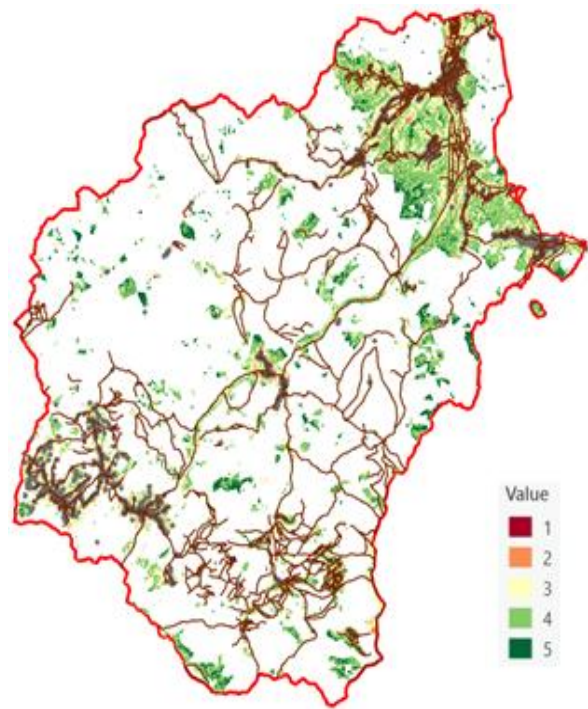


Рис. 3. Результат просторової класифікації території Вигодської громади за ступенем занедбаності: від 1 (мінімальна ймовірність) до 5 (висока ймовірність)

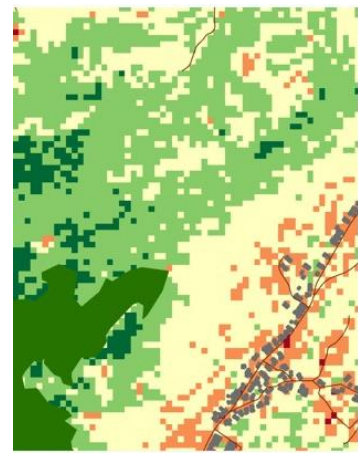
Для перевірки точності та інтерпретації результатів детальніше проаналізовано вибрану ділянку в межах північно-західної частини громади (рис. 4).



а



б



в

Рис. 4. Порівняння змін покриву на обраній ділянці: а - знімок Sentinel-2 за 2017 р.; б - знімок Sentinel-2 за 2024 р.; в - результат зваженого накладання за 2024 р.

Порівняння супутникових знімків Sentinel-2 у природних кольорах за 2017 та 2024 роки та результатів моделі показує помітний перехід у структурі земного покриття. У 2017 році сільськогосподарський ландшафт візуально представлений вузькими, геометрично регулярними ділянками, типовими для активного землекористування, особливо поблизу забудованих територій. Межі полів чітко окреслені, а вегетація рівномірна, що є типовими ознаками інтенсивного землекористування.

До 2024 року ці ознаки значною мірою втрачені, особливо в західній та північно-західній частинах досліджуваної території. З'являються розмиті межі, неоднорідні текстури, темніші тони рослинного покриття, що свідчить про некерований трав'янистий покрив, чагарники або ранню лісову сукцесію.

Карта зваженого накладання за 2024 рік відображає ці зміни просторово узгодженим чином. Зони навколо населених пунктів та доріг мають найнижчі показники (класи 1–2), що вказує на збереження активного землеробства. Водночас центральна, північна та північно-західна частини класифіковані як зони з підвищеною ймовірністю занедбаності (класи 4–5), що збігається з ознаками вторинного заростання, встановленими за польовими спостереженнями та візуальною інтерпретацією.

Використання вегетаційних індексів дало змогу ефективно розмежувати сільськогосподарські угіддя з активним обробітком від зарослих луків. NDVI та MSAVI2 виділили зони густої, але несільськогосподарської рослинності (природного відновлення), а RECI сприяв виявленню відновлення багатого на хлорофіл, зокрема ранньої лісової сукцесії. Просторовий перехід від низьких до високих значень накладання добре узгоджується з градієнтами доступності та схилів, підкреслюючи актуальність обраних параметрів.

Загалом модель продемонструвала високий ступінь внутрішньої узгодженості та тематичної валідності. Хоча оцінка точності залишається предметом майбутніх польових досліджень, візуальне та просторове узгодження між результатами зваженого накладання та змінами земного покриття, що спостерігаються на багаторазових знімках, свідчить про ефективність обраного підходу для виявлення закономірностей занедбаності у складних передгірних умовах.

Наукова новизна та практична значущість

У дослідженні реалізовано адаптований підхід багатокритеріального просторового моделювання для виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь у передгірних умовах заходу України. Запропоновано обґрунтований набір критеріїв і вагових коефіцієнтів, що враховують поєднання спектральних, топографічних та інфраструктурних

чинників. Така комбінація даних дала змогу побудувати чутливу до просторової гетерогенності модель, яка враховує біофізичні і соціально-економічні чинники. Результати можуть використати місцеві органи самоврядування для просторової ідентифікації занедбаних угідь, планування використання земель і формування стратегій підтримки сталого землекористування в гірських громадах.

Висновки

У дослідженні запропоновано методику виявлення потенційно занедбаних сільськогосподарських угідь на основі багатокритеріального аналізу, що поєднує вегетаційні індекси за знімками з Sentinel-2, топографічні характеристики та інфраструктурні чинники.

З-поміж семи обчислених вегетаційних індексів найбільш інформативними виявилися NDVI, MSAVI2 та RECI, які забезпечили високу чутливість до змін у структурі рослинного покриття, характерних для процесів занедбаності.

Інтеграція обраних критеріїв у межах моделі зваженого накладання дала змогу отримати тематично узгоджену карту просторового розподілу ймовірності занедбання земель. Результати свідчать про чіткі закономірності: підвищений ризик занедбання спостерігається в ізольованих, малодоступних та топографічно ускладнених частинах громади, що узгоджується з польовими спостереженнями та візуальним аналізом багаторазових супутникових знімків.

Запропонований підхід демонструє ефективність для регіонального моніторингу змін землекористування, особливо у передгірських районах із мозаїчними структурами ландшафту, і може бути практично застосований для підтримки локального планування, землеустрою та стратегій відновлення сільських територій.

Список використаної літератури

- Куліковська О., Павло К., Ступень Р. (2024). Розкриття можливостей використання мультиспектральних знімків для точної оцінки посівів. *Містобудування та територіальне планування*, (87), 368–387.
- Baumann M. et al. (2011). Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy*, 28(3), 552–562. DOI: //doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.11.003.
- Castillo C. P., Kavalov B., Diogo V., Jacobs-Crisioni C., e Silva F. B., Lavalle C. (2018). Agricultural land abandonment in the EU within 2015–2030 (No. JRC113718). Joint Research Centre.
- Cramer V. A., Hobbs R. J., Standish R. J. (2008). What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 104–112. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005.

- EOS Data Analytics. (2022). Вегетаційні індекси як розумні рішення для агробізнесу. URL: <https://eos.com/uk/blog/vehetatsiini-indeksy/>.
- Estel S., Kuemmerle T., Alcantara C., Levers C., Prishchepov A. V., Hostert P. (2015). Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 163, 312–325.
- European Space Agency. (2015). Sentinel-2 user handbook (ESA Standard Document GMES-S2OP-EOPG-TN-13-0001). European Space Agency. URL: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.
- FAO. (2023). Analysis of land abandonment and development of agricultural land markets in the Republic of North Macedonia – Conclusions and policy recommendations. URL: <https://www.fao.org/3/cc4778en/cc4778en.pdf>.
- Hryhoriv Y., Degtyarjov V., Marenych M., Hanhur V., Karbivska U., Gamajunova V., ... Konshin R. (2024). Qualitative assessment of soils in Dolyna District of Ivano-Frankivsk region. *Journal of Ecological Engineering*, 25(9). DOI: 10.12911/22998993/191370.
- Keenleyside C., Tucker G., McConville A. (2010). Farmland Abandonment in the EU: an Assessment of Trends and Prospects. Institute for European Environmental Policy, London.
- Key C. H., Benson N. C. (2006). Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index; and Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep.
- Kolecka N., Kozak J. (2019). Wall-to-Wall Parcel-Level Mapping of Agricultural Land Abandonment in the Polish Carpathians. *Land*, 8(9), 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/land8090129>.
- Kuemmerle T., Hostert P., Radeloff V. C., van der Linden S., Perzanowski K., Kruhlov I. (2008). Cross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians. *Ecosystems*, 11, 614–628. DOI: 10.1007/s10021-008-9146-z.
- Lesiv M. et al. (2018). Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*, 5, 180056. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.
- Prishchepov A. V., Schierhorn F., Löw F. (2021). Unraveling the Diversity of Trajectories and Drivers of Global Agricultural Land Abandonment. *Land*, 2021, 10, 97. DOI: 10.3390/land10020097.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119–126.
- Rouibah K., Belabbas M. (2020). Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land). *Revista de Teledetección*, 20, Article 13787.
- UABIO. (2019). Маргінальні землі: особливості термінології та визначення. URL: <https://uabio.org/materials/100/>.
- USGS. Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance-derived-spectral-indices>.
- Ustaoglu E., Collier M. J. (2018). Farmland abandonment in Europe: An overview of drivers, consequences, and assessment of the sustainability implications. *Environmental reviews*, 26(4), 396–416. DOI: 10.1139/er-2018-0001.
- Wang L., Li Q., Wang Y., Zeng K., Wang H. (2024). An OVR-FWP-RF Machine Learning Algorithm for Identification of Abandoned Farmland in Hilly Areas Using Multispectral Remote Sensing Data. *Sustainability*, 16(15), 6443. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16156443>.
- World Bank. Priorities for Agricultural Support in Ukraine (English). Washington, D.C.: World Bank Group. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099062524074615884>.
- Xiong Y., Li R., Yue Y. (2013). Quantitative estimation of photosynthetic pigments using new spectral indices. *Journal of Forestry Research*, 24, 477–483.
- Xue J., Su B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017(1). DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
- Ye J., Hu Y., Feng Z., Zhen L., Shi Y., Tian Q., Zhang Y. (2024). Monitoring of Cropland Abandonment and Land Reclamation in the Farming–Pastoral Zone of Northern China. *Remote Sensing*, 16(6), 1089.

Kh. MARUSAZH*, Yu. PETRYK

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine,
Email: khrystyna.i.marusazh@lpnu.ua

SPATIAL MODELLING OF AGRICULTURAL LAND ABANDONMENT PROBABILITY IN A FOOTHILL HROMADA USING SENTINEL-2 SATELLITE DATA

Objective. The aim of this study is to identify potentially abandoned agricultural lands within the Vyhoda territorial community of Ivano-Frankivsk region through multi-criteria analysis based on Sentinel-2 satellite imagery, vegetation indices, and topographic and infrastructural parameters. **Methodology.** An adapted multi-criteria spatial modeling approach was proposed to detect potentially abandoned agricultural lands. The study employed multispectral Sentinel-2 satellite images acquired in August 2024. Based on the pre-processed imagery, seven vegetation indices were calculated, of which NDVI, MSAVI2, and RECI were included in the final model as the most effective for reflecting vegetation condition, density, and type. Additionally, three non-spectral variables were considered: surface slope, distance to roads, and distance to residential areas. All spatial layers were harmonized to a common spatial resolution, normalized, and reclassified using a five-point suitability scale. Data integration was performed using the Weighted Overlay method in the ArcGIS Pro environment, which enabled the construction of an integrated probability layer of land abandonment. The weight coefficients of each layer were determined based on testing and expert evaluation. **Results.** The resulting abandonment risk map demonstrates spatial heterogeneity of agricultural land within the community. Areas with the highest risk classes (4–5) are predominantly located in the southern and northeastern parts of the territory, which is associated with mountainous terrain, limited accessibility, and fragmented land use patterns. The central part is dominated by areas with low abandonment risk (classes 1–2), typical of actively cultivated lands. The consistency between the results and the multispectral imagery confirms the effectiveness of the proposed approach in identifying abandoned lands in structurally complex foothill environments. **Practical significance.** The proposed approach allows for effective identification of spatial hotspots of land-use degradation to support local planning, agro-ecological monitoring, and the development of strategies for sustainable land use in mountainous communities.

Keywords: abandoned lands, spatial modeling, satellite imagery, Sentinel-2, multi-criteria analysis, vegetation indices, Carpathian foothills.

References

- Kulikivska, O., Pavlo, K., & Stupen, R. (2024). Rozkryttia mozhlyvostei vykorystannia multispektralnykh znimkiv dlia tochnoi otsinky posiviv. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, (87), 368–387.
- Baumann, M. et al. (2011). Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy*, 28(3), 552–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.11.003>.
- Castillo, C. P., Kavalov, B., Diogo, V., Jacobs-Crisioni, C., e Silva, F. B., & Laval, C. (2018). Agricultural land abandonment in the EU within 2015–2030 (No. JRC113718). Joint Research Centre.
- Cramer, V. A., Hobbs, R. J., & Standish, R. J. (2008). What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(2), 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.005>.
- EOS Data Analytics. (2022). Vehetatsiini indeksy yak rozumni rishennia dlia ahrobiznesu. Retrieved from <https://eos.com/uk/blog/vehetatsiini-indeksy/>.
- Estel, S., Kuemmerle, T., Alcantara, C., Levers, C., Prishchepov, A. V., & Hostert, P. (2015). Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 163, 312–325.
- European Space Agency. (2015). Sentinel-2 user handbook (ESA Standard Document GMES-S2OP-EOPG-TN-13-0001). European Space Agency. Retrieved from https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.
- FAO. (2023). Analysis of land abandonment and development of agricultural land markets in the Republic of North Macedonia – Conclusions and policy recommendations. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cc4778en/cc4778en.pdf>.
- Hryhoriv, Y., Degtyarjov, V., Marenich, M., Hanhur, V., Karbivska, U., Gamajunova, V., ... & Konshin, R. (2024). Qualitative assessment of soils in Dolyna District of Ivano-Frankivsk region. *Journal of Ecological Engineering*, 25(9). DOI: 10.12911/22998993/191370.
- Keenleyside, C., Tucker, G., & McConville, A. (2010). Farmland Abandonment in the EU: an Assessment of Trends and Prospects. Institute for European Environmental Policy, London.

- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index; and Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, & L. J. Gangi (Eds.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep.
- Kolecka, N., & Kozak, J. (2019). Wall-to-Wall Parcel-Level Mapping of Agricultural Land Abandonment in the Polish Carpathians. *Land*, 8(9), 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/land8090129>.
- Kuemerle, T., Hostert, P., Radeloff, V. C., van der Linden, S., Perzanowski, K., & Kruhlov, I. (2008). Cross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians. *Ecosystems*, 11, 614–628. DOI: 10.1007/s10021-008-9146-z.
- Lesiv, M. et al. (2018). Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*, 5, 180056. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>.
- Prishchepov, A. V., Schierhorn, F., & Löw, F. (2021). Unraveling the Diversity of Trajectories and Drivers of Global Agricultural Land Abandonment. *Land* 2021, 10, 97. DOI: 10.3390/land10020097.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119–126.
- Rouibah, K., & Belabbas, M. (2020). Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land). *Revista de Teledetección*, 20, Article 13787.
- UABIO. (2019). *Marhinalni zemli: osoblyvosti terminolohii ta vyznachennia*. Retrieved from <https://uabio.org/materials/100/>.
- USGS. Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices. Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance-derived-spectral-indices>.
- Ustaoglu, E., & Collier, M. J. (2018). Farmland abandonment in Europe: An overview of drivers, consequences, and assessment of the sustainability implications. *Environmental reviews*, 26(4), 396–416. DOI: 10.1139/er-2018-0001.
- Wang, L., Li, Q., Wang, Y., Zeng, K., & Wang, H. (2024). An OVR-FWP-RF Machine Learning Algorithm for Identification of Abandoned Farmland in Hilly Areas Using Multispectral Remote Sensing Data. *Sustainability*, 16(15), 6443. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16156443>.
- World Bank. *Priorities for Agricultural Support in Ukraine* (English). Washington, D.C.: World Bank Group. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/099062524074615884>.
- Xiong, Y., Li, R., & Yue, Y. (2013). Quantitative estimation of photosynthetic pigments using new spectral indices. *Journal of Forestry Research*, 24, 477–483.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*, 2017(1), DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
- Ye, J., Hu, Y., Feng, Z., Zhen, L., Shi, Y., Tian, Q., & Zhang, Y. (2024). Monitoring of Cropland Abandonment and Land Reclamation in the Farming–Pastoral Zone of Northern China. *Remote Sensing*, 16(6), 1089.