

Ольга ГЕЛЕВЕРА, доцент кафедри загального землеробства, кандидат географічних наук, доцент, heleveraof@kntu.kr.ua, Центральнотраїнський національний технічний університет;
Сергій ТОПОЛЬНИЙ, менеджер з регіонального розвитку, кандидат біологічних наук, ТОВ “Яра Україна”

ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Вступ. Цифровізація аграрного сектору є одним із ключових напрямів розвитку сучасного сільського господарства. Використання інформаційних технологій, геоінформаційних систем та супутникових даних дозволяє отримувати детальну інформацію про стан природних ресурсів, динаміку розвитку рослин і вплив кліматичних факторів на агроєкосистеми.

Одним із найбільш ефективних інструментів дослідження таких процесів є дистанційне зондування Землі. Супутникові системи спостереження забезпечують регулярне отримання даних про стан рослинності, структуру землекористування та зміну агроєкологічних умов. Аналіз спектральних характеристик рослинного покриву дозволяє визначати рівень біомаси, фотосинтетичну активність рослин та інтенсивність їх розвитку.

Супутниковий моніторинг базується на аналізі спектральних характеристик рослинності, отриманих з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Вегетаційні індекси, зокрема NDVI та EVI, широко використовуються для оцінювання стану рослинного покриву, вмісту хлорофілу, біомаси та фотосинтетичної активності рослин. Застосування супутникових даних у точному землеробстві відкриває нові можливості для оптимізації агротехнологій, зменшення витрат на агрохімікати та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

Метою дослідження є аналіз можливостей застосування супутникових геоінформаційних технологій у системі моніторингу агроєкосистем і оптимізації агротехнологічних заходів.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття спостерігається стрімке зростання кількості досліджень, присвячених використанню супутникових даних у сільському господарстві. Основна увага приділяється класифікації землекористування, моніторингу стану рослинності, прогнозуванню врожайності та оцінюванню впливу кліматичних змін на агроєкосистеми [2, 3].

Важливим напрямом є використання алгоритмів машинного навчання для класифікації культур на основі мультиспектральних зображень. Методи Random Forest, Support Vector Machine та нейронні мережі демонструють високу точність і дозволяють автоматизувати обробку великих масивів супутникових даних [1, 4].

Значна кількість досліджень присвячена використанню вегетаційних індексів для оцінювання стану рослин. Найбільш поширеними є нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) та розширений індекс рослинності (EVI). Ці показники характеризують густоту рослинного покриву, фотосинтетичну активність і загальний стан посівів [5, 6].

Останні дослідження також спрямовані на інтеграцію супутникових даних із безпілотними літальними апаратами, сенсорними системами та Інтернетом речей. Такий підхід дозволяє підвищити точність просторового аналізу та отримувати детальні дані про стан рослин у межах окремих полів.

Попри значний прогрес у розвитку геоінформаційних технологій, їх широке впровадження в аграрному секторі стримується рядом факторів. До них належать недостатня технічна інфраструктура, висока вартість деяких комерційних супутникових даних та обмежена кількість наземних спостережень для валідації моделей.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні використано дані супутникового дистанційного зондування Землі та геоінформаційні технології для аналізу стану сільськогосподарських культур. Основними джерелами супутникових даних є місії Sentinel-2 Європейського космічного агентства, Landsat-8/9 та MODIS.

Супутник Sentinel-2 забезпечує отримання мультиспектральних зображень з просторовою роздільною здатністю 10–20 м і періодом повторного знімання близько п'яти днів. Це дозволяє проводити регулярний моніторинг стану посівів протягом усього вегетаційного періоду.

Для обробки та аналізу супутникових даних використовувалися геоінформаційні платформи Google Earth Engine, QGIS та ArcGIS. Застосування цих систем дозволяє здійснювати інтеграцію

різних типів просторових даних, виконувати спектральний аналіз та будувати тематичні карти. Основним методом оцінювання стану рослинності є розрахунок вегетаційних індексів.

Нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Розширений індекс рослинності (EVI):

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1}$$

Ці індекси відображають співвідношення відбиття світла в червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах і дозволяють оцінити інтенсивність фотосинтезу та густоту рослинного покриву.

Для аналізу просторової неоднорідності посівів використовувалися кластеризаційні алгоритми (k-means та ISODATA), що дозволяють виділяти зони з різною інтенсивністю розвитку рослин. На основі отриманих зон формувалися карти завдань для диференційованого внесення добрив.

Виклад основних матеріалів досліджень. Геоінформаційні системи мають широкий спектр застосування в сільському господарстві. Вони дозволяють зберігати та аналізувати великі обсяги даних, зокрема інформацію про ґрунтові властивості, агрохімічний стан ґрунтів, структуру посівних площ, погодні умови та результати врожайності.

Однією з ключових переваг GIS є можливість просторового аналізу агроєкологічних умов. Це дозволяє оптимізувати використання природних ресурсів, планувати структуру посівів та оцінювати ризики, пов'язані з кліматичними змінами.

Важливим напрямом використання GIS є точне землеробство. Воно базується на принципі просторової неоднорідності ґрунтів і передбачає диференційоване управління агротехнологічними операціями. Основними етапами точного землеробства є створення електронної карти поля, аналіз просторової неоднорідності, прийняття управлінських рішень та їх практична реалізація.

Супутникові технології дозволяють оперативно отримувати інформацію про стан рослинності, вологість ґрунту, температурний режим та інші параметри. Отримані дані використовуються для прогнозування врожайності, оптимізації системи удобрення та планування агротехнологічних операцій.

Важливим інструментом аналізу є вегетаційні індекси, які дозволяють оцінювати динаміку розвитку рослин протягом вегетаційного періоду. Аналіз часових рядів NDVI дає можливість виявляти проблемні ділянки поля, визначати дефіцит елементів живлення або води та своєчасно проводити коригувальні заходи.

Застосування супутникових даних також дозволяє здійснювати контроль роботи сільськогосподарської техніки за допомогою систем GPS-моніторингу. Це сприяє підвищенню ефективності використання техніки, зменшенню витрат пального та покращенню організації виробничих процесів.

Практичні приклади використання супутникових даних демонструють високу ефективність цієї технології. Моніторинг полів озимої пшениці за допомогою супутника Sentinel-2 дозволив оцінити динаміку розвитку рослин у різні фази вегетації. Аналіз показав, що протягом десятиденного періоду ранньовесняної вегетації значення NDVI збільшилося приблизно на 0,10 одиниць, що свідчить про активне наростання біомаси та інтенсивний розвиток рослин.

Подальший моніторинг у фазі виходу в трубку показав збільшення NDVI до значень 0,65–0,85, що відповідає максимальному розвитку листкового апарату та формуванню густого рослинного покриву.

На основі аналізу NDVI було виділено декілька зон продуктивності в межах поля. Для кожної з них сформовано рекомендації щодо диференційованого внесення азотних добрив. Наприклад, у зонах з низькими значеннями NDVI рекомендовано підвищені норми азоту, тоді як у зонах з високою біомасою норми добрив зменшувалися для запобігання вилягання рослин.

Застосування технології диференційованого внесення добрив дозволяє підвищити ефективність використання азоту, зменшити витрати добрив та знизити негативний вплив на навколишнє середовище.

Супутникові системи дистанційного зондування Землі забезпечують регулярне отримання мультиспектральних зображень земної поверхні. Такі дані використовуються для аналізу стану рослинності, визначення структури землекористування та оцінювання змін природного середовища.

У сільському господарстві найбільш поширеними є дані супутників Sentinel, Landsat та MODIS. Вони дозволяють отримувати зображення з різною просторовою та часовою роздільною

здатністю, що робить можливим проведення регулярного моніторингу стану посівів протягом вегетаційного періоду.

Аналіз супутникових знімків ґрунтується на дослідженні спектральних характеристик рослинності. Зелені рослини активно поглинають світло в червоному спектрі та відбивають його в ближньому інфрачервоному діапазоні. Ця особливість використовується для розрахунку вегетаційних індексів, які характеризують стан рослинного покриву. Аналіз змін вегетаційних індексів у часі дозволяє оцінювати динаміку розвитку культур і виявляти ділянки з пригніченим ростом рослин.

Використання супутникових даних у системі точного землеробства. Точне землеробство ґрунтується на принципі просторової неоднорідності агроєкосистем. У межах одного поля можуть існувати суттєві відмінності у властивостях ґрунту, рівні забезпечення вологою та поживними речовинами. Це призводить до нерівномірного розвитку рослин і формування різної врожайності.

Супутниковий моніторинг дозволяє виявляти такі неоднорідності та враховувати їх під час планування агротехнологічних заходів. На основі аналізу вегетаційних індексів поля можуть бути поділені на зони з різним рівнем продуктивності.

У межах цих зон розробляються карти диференційованого внесення добрив. Ділянки з низькими значеннями індексів рослинності отримують підвищені норми мінерального живлення, тоді як у зонах із високою біомасою норми добрив можуть бути зменшені.

Такий підхід дозволяє значно підвищити ефективність використання добрив і зменшити їх негативний вплив на довкілля. Крім того, оптимізація системи живлення рослин сприяє підвищенню врожайності та вирівнюванню розвитку посівів.

Супутникові дані також використовуються для контролю виконання технологічних операцій. Системи GPS-моніторингу дозволяють відстежувати переміщення сільськогосподарської техніки, аналізувати витрати пального та оцінювати ефективність роботи машинно-тракторного парку.

Схематично процес застосування геоінформаційних і супутникових технологій у землеробстві складається з кількох послідовних етапів. На першому етапі здійснюється **збір даних** із різних джерел: супутникових знімків, безпілотних літальних апаратів, метеорологічних станцій та ґрунтових сенсорів. Отримана інформація надходить до геоінформаційної системи, де відбувається її обробка, геоприв'язка та інтеграція з іншими просторовими даними.

Другим етапом є **просторовий аналіз агроєкосистем**, який включає розрахунок вегетаційних індексів, оцінювання неоднорідності посівів і визначення зон продуктивності. На основі результатів аналізу формуються **карти управління**, що використовуються для диференційованого внесення добрив, регулювання норм висіву та оптимізації інших агротехнологічних операцій.



Рис. 1 – Карта індексу рослинності NDVI та зонування продуктивності поля

Карти індексу рослинності NDVI (рис. 1) використовуються для оцінювання просторової неоднорідності розвитку рослинного покриву. Значення індексу змінюються в діапазоні від -1 до $+1$. Для сільськогосподарських культур характерні значення від $0,2$ до $0,9$.

Низькі значення індексу можуть свідчити про недостатній розвиток рослин, дефіцит вологи, низький вміст поживних речовин у ґрунті або ураження посівів шкідниками та хворобами. Високі значення NDVI характерні для ділянок із добре розвиненим рослинним покривом і високою фотосинтетичною активністю.

Аналіз таких карт дозволяє виділяти **зони продуктивності поля**, які використовуються при створенні карт-завдань для систем точного землеробства (табл. 1).

Таблиця 1 – Поділ поля на зони продуктивності для диференційованого внесення добрив

Зона поля	Середнє значення NDVI	Характеристика посівів	Рекомендована норма азотних добрив
Низької продуктивності	0,35	пригнічений розвиток рослин	підвищена
Середньої продуктивності	0,55	середній розвиток посівів	стандартна
Високої продуктивності	0,70	інтенсивний ріст рослин	знижена

Застосування диференційованого внесення добрив дозволяє підвищити ефективність використання агрохімікатів і зменшити виробничі витрати.

Карти зон продуктивності формуються на основі багаторічних супутникових спостережень, даних врожайності та агрохімічних аналізів ґрунту. Такі карти дозволяють визначити ділянки поля з різною продуктивністю та адаптувати систему удобрення до просторової неоднорідності агроєкосистем.

Часові ряди значень NDVI (рис. 2) дозволяють аналізувати розвиток рослинності протягом усього вегетаційного періоду. На початкових стадіях росту значення індексу є низькими, оскільки рослинний покрив ще недостатньо сформований. У фазі інтенсивного росту відбувається різке збільшення NDVI, що відображає активний розвиток листової поверхні та зростання біомаси.

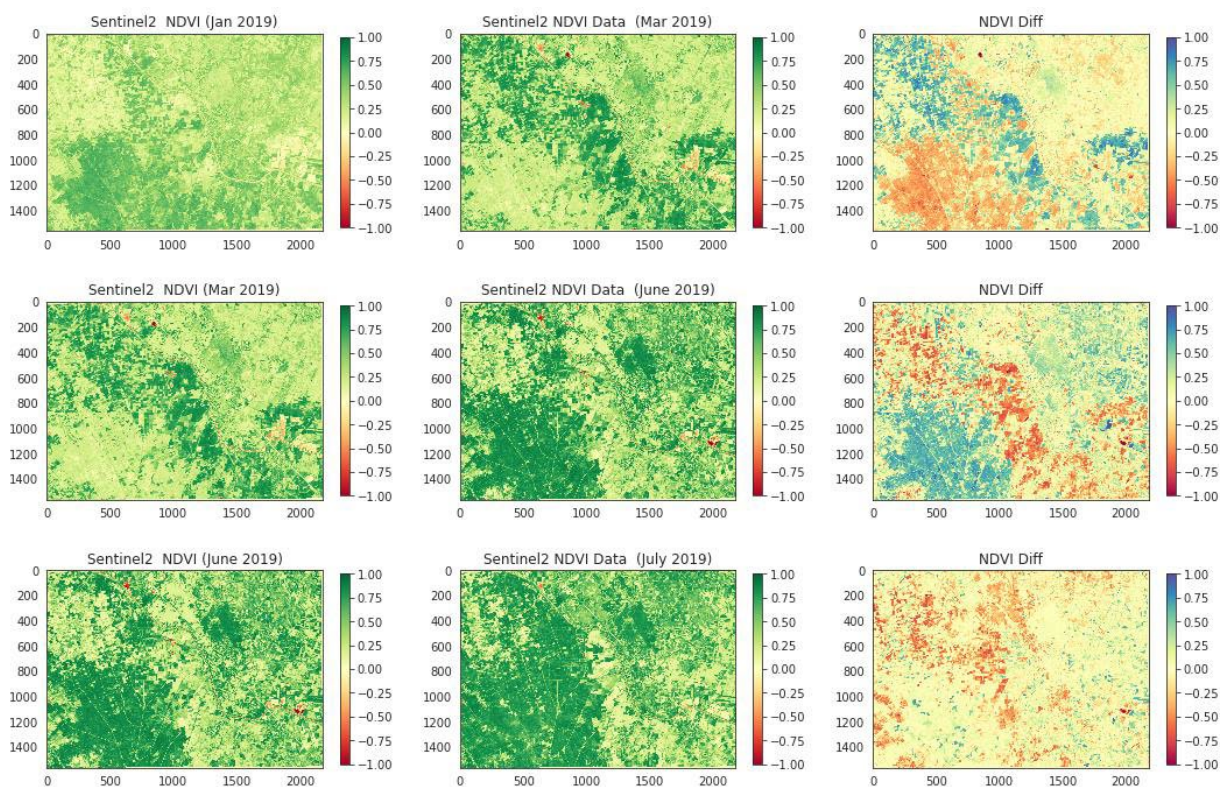


Рис. 2 – Динаміка індексу NDVI протягом вегетаційного періоду сільськогосподарських культур

Максимальні значення індексу характерні для періоду повного розвитку рослинного покриття. Надалі, у фазі дозрівання культур, показники NDVI поступово зменшуються внаслідок зниження фотосинтетичної активності та старіння рослин.

Аналіз динаміки NDVI широко використовується для визначення фенологічних фаз розвитку культур, оцінювання стану посівів і прогнозування врожайності.

Подальший розвиток супутникових технологій відкриває нові можливості для дослідження агроєкосистем. Збільшення просторової роздільної здатності супутникових знімків, розвиток методів штучного інтелекту та використання хмарних платформ для обробки даних значно розширюють можливості аналізу.

Перспективним напрямом є інтеграція супутникових даних із безпілотними літальними апаратами та наземними сенсорними системами. Такий підхід дозволяє отримувати більш детальну інформацію про стан рослин, вологість ґрунту та рівень забезпечення поживними речовинами.

Важливу роль відіграє і розвиток платформ обробки великих даних, зокрема Google Earth Engine. Вони забезпечують швидку обробку великих масивів супутникових знімків та дозволяють виконувати складні аналітичні операції.

У перспективі використання таких технологій сприятиме формуванню цифрових моделей агроєкосистем і створенню систем підтримки прийняття рішень у сільському господарстві.

Висновки. Застосування супутникових геоінформаційних технологій є важливим напрямом розвитку сучасного сільського господарства. Використання дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем дозволяє здійснювати оперативний моніторинг стану посівів, аналізувати просторову неоднорідність агроєкосистем і оптимізувати агротехнологічні заходи.

Аналіз вегетаційних індексів на основі супутникових знімків забезпечує можливість оцінювання динаміки розвитку рослин, прогнозування врожайності та виявлення проблемних ділянок полів.

Інтеграція супутникових даних у систему точного землеробства сприяє підвищенню ефективності використання природних ресурсів, зменшенню витрат на агрохімікати та зниженню негативного впливу сільськогосподарської діяльності на довкілля.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення комплексних цифрових моделей агроєкосистем, інтеграцію супутникових даних із наземними вимірюваннями та використання методів штучного інтелекту для прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.

Бібліографічний список

1. Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review. *Sensors*, 21(11), 3758. (2021). <https://doi.org/10.3390/s21113758>
2. Ghassemi, B., Dujakovic, A., Żółtak, M., Immitzer, M., Atzberger, C., & Vuolo, F. Designing a European-Wide Crop Type Mapping Approach Based on Machine Learning Algorithms Using LUCAS Field Survey and Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 14(3), 541 (2022). <https://doi.org/10.3390/rs14030541>.
3. Karra, K.; Kontgis, C.; Statman-Weil, Z.; Mazzariello, J.C.; Mathis, M.; Brumby, S.P. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. IGARSS 2021, Brussels, Belgium, pp. 4704–4707 (2021).
4. Mahya G.Z. Hashemi a, Pang Ning Tan b, Ehsan Jalilvand, Brook Wilke, Hamed Alemohammad, & Narendra N. Das Yield estimation from SAR data using patch-based deep learning and machine learning technique. *Citation DataComputers and Electronics in Agriculture*, ISSN: 0168-1699, Vol: 226, Page: 109340 (2024).
5. Panek-Chwastyk, E., Dąbrowska-Zielińska, K., Kluczek, M., Markowska, A., Woźniak, E., Bartold, M., Ruciński, M., Wojtkowski, C., Aleksandrowicz, S., Gromny, E., Lewiński, S., Łaczyński, A., Masiuk, S., Zhurbenko, O., Trofimchuk, T., & Burzykowska, A. Estimates of Crop Yield Anomalies for 2022 in Ukraine Based on Copernicus Sentinel-1, Sentinel-3 Satellite Data, and ERA-5 Agrometeorological Indicators. *Sensors*, 24(7), 2257. (2024). <https://doi.org/10.3390/s24072257>.
6. Topolnyi, S., Helevera, O. Processing of SAT-Based GIS Data for the Agricultural Industry in Ukraine. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Gütter, D. (eds) *Networks and Sustainability*. TCSET 2024. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1473. Springer, Cham. (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-032-02272-1_29.