

УДК 004.9: 528.88: 633

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.1.21>

UKRAINE CROP PRODUCTION MAP – ІНТЕРАКТИВНА КАРТА ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ТА АНАЛІТИЧНОЇ ОЦІНКИ АГРОЕКОЛОГІЧНИХ УМОВ УКРАЇНИ

Лиховид П.В. – д.с.-г.н., п.н.с.,

відділ зрошуваного землеробства та декарбонізації агроєкосистем,

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства землеробства

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0002-0314-7644

Вожегова Р.А. – д.с.-г.н., професор,

академік Національної академії аграрних наук України,

директор,

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0002-3895-5633

Грановська Л.М. – д.е.н., професор, член-кореспондент

Національної академії аграрних наук України,

завідувач відділу зрошуваного землеробства та декарбонізації агроєкосистем,

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0001-7021-3093

Чабан В.О. – д.с.-г.н.,

професор кафедри безпеки життєдіяльності та професійно-прикладної

фізичної підготовки,

Херсонська державна морська академія

orcid.org/0000-0003-0900-2128

Біднина І.О. – к.с.-г.н., с.н.с.,

вчений секретар,

Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0001-8351-2519

Ukraine Crop Production Map – інтерактивна електронна карта, що поєднує в собі функціонал бази даних дистанційного зондування (а саме вегетаційні індекси), відомостей про врожайність основних сільськогосподарських культур в Україні, а також можливості різнобічного аналізу наявних у базі даних для побудови моделей, оцінки взаємозв'язків, прогнозування продуктивності агроєкосистем і агроєкологічних умов за даними аерокосмічного моніторингу, тощо. Інтерактивна електронна карта розроблена із використанням наборів даних дистанційного зондування Землі, одержаних і картованих за допомогою авторського JavaScript запиту в системі Google Earth Engine. Дані щодо відповідних індексів розраховано на платформі Google Earth Engine за супутниковими знімками із наступних джерел: NDMI – MODIS/006/MOD09A1; NDVI, NDWI, EVI and NRI – MODIS/061/MOD09GA. Супутникові зображення мали роздільну здатність 500 м. Індекс агроєкологічного районування AEZI було розраховано за авторською методикою із залученням індексів NDVI, NDWI та NRI. Дані щодо врожайності основних сільськогосподарських культур отримано з офіційних статистичних джерел. Карту розроблено із використанням стандартних технологій веб-розробки, а саме HTML5, CSS3, JavaScript із залученням відповідних бібліотек і модулів. Крім власне представлення даних, карта має функціонал статистичної оцінки даних за такими алгоритмами як кореляційна матриця,

тренд тест за Манн-Кендалом, регресійне моделювання, прогнозування часових рядів за методами ковзного середнього та експоненційного згладжування, тощо. Розроблена інтерактивна електронна карта не має аналогів в Україні, надає потужний інструментарій для виконання аналітико-синтетичної роботи в галузі оцінки продуктивності сільськогосподарських культур залежно від величини різних вегетаційних індексів, створює платформу для тісної інтеграції статистичних відомостей, дистанційного зондування, програмування та геоінформаційних технологій в агроєкології. До переваг Ukraine Crop production Map варто віднести не тільки унікальний функціонал, але й інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, адаптивний до різних операційних систем, веб-браузерів та розмірів дисплеїв, інтеграцію багатомовного перекладу на платформі Google та наявність деталізованого глосарію, що містить теоретичний мінімум для ефективного використання карти та розуміння її функціональних можливостей.

Ключові слова: вегетаційні індекси, екологічні умови, інформатизація, математична статистика, прогнозування, супутниковий моніторинг.

Lykhovyd P.V., Vozhehova R.A., Hranovska L.M., Chaban V.O., Bidnyna I.O. Ukraine Crop Production Map – an interactive map of crop productivity and analytical evaluation of agroecological conditions of Ukraine

The Ukraine Crop Production Map is an interactive electronic map that integrates the functionality of a remote sensing database, specifically vegetation indices, with information on the yield of major agricultural crops in Ukraine. It also enables multifaceted analysis of the available data for constructing models, evaluating relationships, forecasting agroecosystem productivity and agroecological conditions based on aerospace monitoring data, and more. The interactive electronic map was developed using Earth remote sensing datasets, obtained and mapped through a custom JavaScript query in the Google Earth Engine system. The data for the respective indices were calculated on the Google Earth Engine platform using satellite images from the following sources: NDMI from MODIS/006/MOD09A1; NDVI, NDWI, EVI, and NRI from MODIS/061/MOD09GA. The satellite images have a resolution of 500 meters. The agroecological zoning index (AEZI) was calculated using an original method involving the NDVI, NDWI, and NRI indices. Data on the yield of major agricultural crops were obtained from official statistical sources. The map was developed using standard web development technologies, namely HTML5, CSS3, and JavaScript, with the inclusion of relevant libraries and modules. In addition to presenting the data, the map offers functionalities for statistical evaluation of data using algorithms such as correlation matrix, Mann-Kendall trend test, regression modeling, time series forecasting using moving average and exponential smoothing methods, and more. The developed interactive electronic map has no analogs in Ukraine and provides a powerful toolkit for performing analytical and synthetic work in the field of assessing agricultural crop productivity based on various vegetation indices. It creates a platform for the close integration of statistical data, remote sensing, programming, and geoinformation technologies in agroecology. The advantages of the Ukraine Crop Production Map include not only its unique functionality but also an intuitive interface adaptable to different operating systems, web browsers, and screen sizes, integration of multilingual translation via the Google platform, and the presence of a detailed glossary that provides the theoretical minimum for effective use of the map and understanding its functional capabilities.

Key words: vegetation indices, ecological conditions, informatization, mathematical statistics, forecasting, satellite monitoring.

Постановка проблеми. В період бурхливого розвитку геоінформаційних технологій і систем, розробка комплексних інтерактивних карт продуктивності сільськогосподарських культур з використанням даних дистанційного зондування є актуальним завданням сучасної аграрної науки. Такі карти надають науково цінну, оперативну, динамічну і просторово деталізовану інформацію для моніторингу посівів, прогнозування врожайності та управління земельними ресурсами, підтримуючи продовольчу безпеку і розвиток сільського господарства на принципах сталого розвитку.

Інтеграція реальних даних, зібраних у польових умовах, із даними супутникового моніторингу є основою вирішення проблеми розробки сучасних інтерактивних

електронних карт. Карти продуктивності сільськогосподарських культур на основі даних дистанційного зондування Землі широко використовуються для моніторингу росту і розвитку сільськогосподарських культур, прогнозування їх врожайності та прийняття оперативних і стратегічних управлінських рішень у сферах управління агроєкосистемами та продовольчою політикою. Вони допомагають вирішувати такі проблеми, як динамічний моніторинг змін клімату та їх вплив на агрофітоценози, наявність та використання земельних і водних ресурсів, уможлиблюючи ефективне сільськогосподарське планування та оцінку ризиків у агросфері [4, 5].

Останні науково-технічні розробки поєднують супутникові дані з різних джерел (наприклад, сенсорів та сателітів MODIS, Landsat, Sentinel) з методами машинного та глибокого навчання для підвищення точності та масштабованості картографування посівів та оцінки врожайності. Ці методи можуть забезпечити надійні оцінки з високою роздільною здатністю і майже в реальному часі на великих територіях [9]. Хмарні платформи, такі як Google Earth Engine, полегшують великомасштабне інтерактивне картографування посівів, зменшуючи обчислювальне навантаження та дозволяючи інтегрувати різні джерела даних [8].

В сучасних умовах розробка інтерактивної карти продуктивності сільськогосподарських культур із інтеграцією даних аерокосмічного моніторингу є надзвичайно актуальним напрямом аграрної науки. Така карта дозволить оперативно отримувати просторово деталізовану інформацію про стан посівів, що сприяє ефективному моніторингу, прогнозуванню врожайності та прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Таким чином, актуальність розробки зумовлена необхідністю забезпечення продовольчої безпеки та раціонального управління агроресурсами в умовах кліматичних змін; поєднання супутникових вегетаційних індексів (NDVI, EVI, NDMI тощо) із фактичними даними про врожайність для підвищення точності оцінок і прогнозів; створення інструменту для сталого сільськогосподарського планування на регіональному та національному рівнях [1, 7].

Таким чином, розробка інтерактивної карти продуктивності сільськогосподарських культур в Україні є важливим кроком до підвищення ефективності агро-виробництва, адаптації до змін клімату та впровадження принципів сталого розвитку у сфері агрополітики.

Постановка завдання. Завданням даного дослідження було розробити інтерактивну електронну карту продуктивності основних сільськогосподарських культур в Україні за інтеграції даних щодо супутникових вегетаційних індексів та методів математичної статистики та машинного навчання для поглибленого аналізу продуктивності агроєкосистем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Реалізація поставленого завдання була здійснена шляхом створення комплексного інтерактивного веб-додатку – карти Ukraine Crop Production Map – який поєднує картографічні елементи із широким функціоналом для аналітичної обробки даних. Розроблений ресурс забезпечує не лише візуалізацію продуктивності сільськогосподарських культур, а й інтегрує інструментарій для отримання довідкової інформації, виконання математико-статистичних розрахунків, побудови регресійних моделей та здійснення коротко- і довгострокових прогнозів із залученням даних дистанційного зондування Землі.

Інтерактивну карту створено з використанням супутникових даних, оброблених за допомогою авторського запиту на платформі Google Earth Engine. Зокрема, розрахунок індексів проводиться на основі зображень з таких джерел: NDMI – MODIS/006/MOD09A1; NDVI, NDWI, EVI, NRI – MODIS/061/

MOD09GA. Просторова роздільна здатність знімків становила 500 м. Вегетаційні індекси розраховували всередині скрипту за міжнародно визнаними методиками [13]. Індекс AEZI (Agro-Ecological Zoning Index) розраховано за авторською методикою із застосуванням індексів NDVI, NDWI та NRI [14]. Дані щодо врожайності основних сільськогосподарських культур було отримано з офіційних статистичних джерел – статистичних щорічників України.

Технічна реалізація веб-додатку здійснена з використанням стандартного стеку веб-технологій: HTML5, CSS3, JavaScript, а також бібліотек для обробки даних і візуалізації, зокрема D3.js, Leaflet.js, Chart.js, math.js та PapaParse.js.

Функціональні можливості карти включають інструменти математико-статистичного аналізу, зокрема:

- 1) Побудову кореляційної матриці, що дозволяє оцінити ступінь взаємозв'язку між вегетаційними індексами та продуктивністю культур на основі коефіцієнта кореляції Пірсона [12].

- 2) Трендовий аналіз із використанням непараметричного критерію Манна-Кендалла для виявлення наявності статистично значущих тенденцій у часових рядах [6, 10].

- 3) Побудову регресійних моделей, зокрема методів лінійної регресії для оцінки детермінованості змінних [11].

- 4) Прогнозування часових рядів за допомогою методів ковзного середнього [3] та експоненційного згладжування у формі лінійної моделі Холта [2].

Загалом інтерфейс веб-додатку прддеменовано на Рис. 1. Стартова сторінка веб-додатку пропонує користувачеві базовий функціонал, зокрема відображення інтерактивної карти України, на якій візуалізовано просторово-часові дані щодо продуктивності основних сільськогосподарських культур за період 2005–2023 рр., а також супутникові вегетаційні та агроекологічні індекси, зокрема NDVI, EVI, NDMI, NRI та AEZI.

Вибір відповідного індикатора здійснюється через інтерактивне меню «Select Data», під яким розміщено слайдер для вибору цільового року аналізу. Натисканням на регіон карти користувач отримує деталізовану статистичну інформацію для обраного показника, включаючи: значення у вибраному році, середнє значення за весь часовий діапазон, мінімальні та максимальні значення, стандартне відхилення тощо. Для забезпечення багатомовного доступу до інформації в правому верхньому куті екрану інтегровано віджет перекладу, який дозволяє змінити мову інтерфейсу, включаючи англійську та інші мови.

Секція «About» містить загальну інформацію про проєкт, поточну версію програмного забезпечення, дані про розробника, а також посилання на відповідні інтернет-ресурси й контактну електронну адресу.

Секція «Glossary» є інтерактивним термінологічним словником, що сприяє кращому розумінню функціоналу додатку та використаної в ньому наукової термінології.

Секція «Correlation Matrix» надає можливість розрахунку кореляційної матриці для вибраного регіону або для всієї країни з метою оцінки зв'язків між урожайністю сільськогосподарських культур та супутниковими індексами. Результатом обчислень є значення коефіцієнта кореляції Пірсона та коефіцієнта детермінації.

Секція «Mann-Kendall Trend Test» дозволяє здійснити статистичну перевірку наявності тенденцій у часових рядах шляхом застосування непараметричного критерію Манна-Кендалла, що є широко визнаним методом аналізу монотонних трендів у даних.

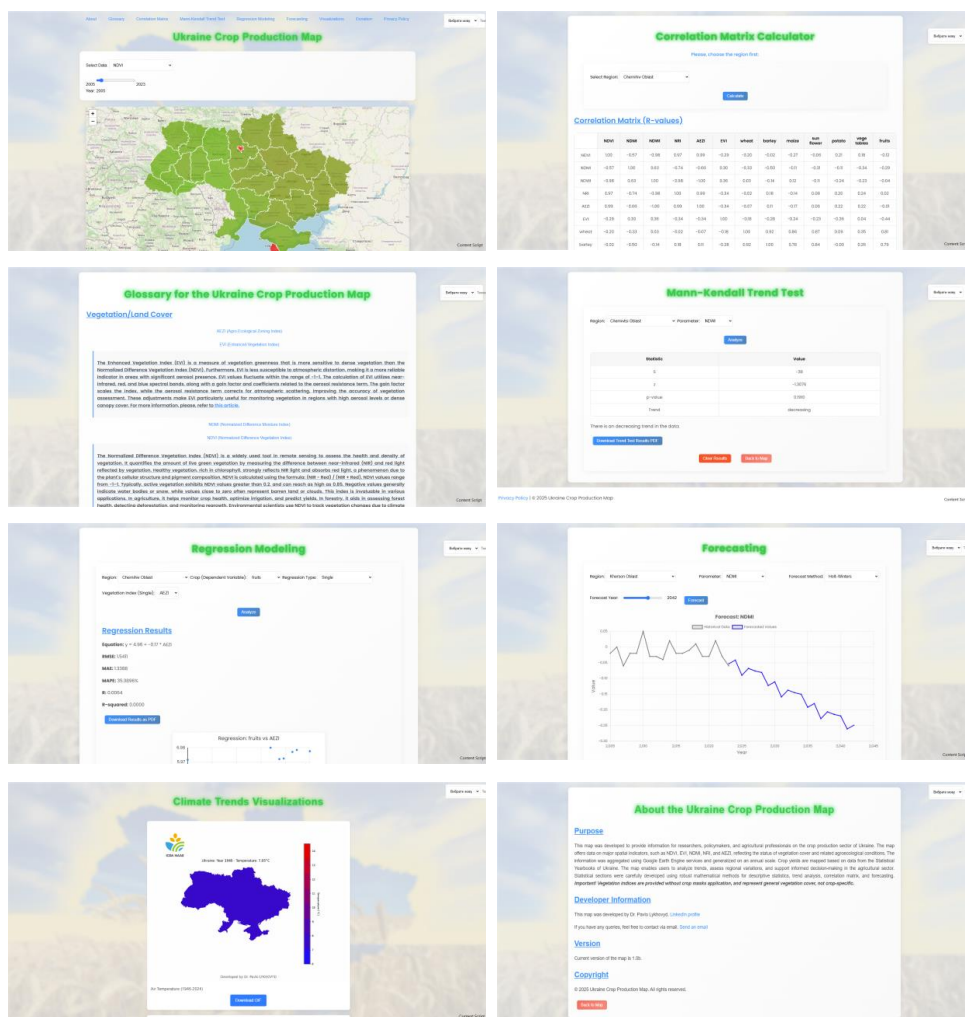


Рис. 1. Інтерфейс основних функціональних сторінок інтерактивної електронної карти Ukraine Crop Production Map

Секція «Regression Modeling» передбачає побудову моделей лінійної регресії – як простої, так і множинної – з метою моделювання та прогнозування продуктивності культур на основі обраних індексів. Оцінка якості моделей здійснюється за допомогою відповідних статистичних метрик, таких як середньоквадратична похибка (RMSE), середня абсолютна похибка (MAE), середня відносна похибка (MAPE), а також коефіцієнти кореляції та детермінації Пірсона. Автоматично генерується графічна інтерпретація моделі у вигляді апроксимаційної кривої.

Секція «Forecasting» забезпечує реалізацію прогнозування часових рядів для вибраних параметрів із використанням методу ковзного середнього або методу експоненційного згладжування Холта-Вінтерса. Користувач отримує як числові значення прогнозу у вигляді таблиці, так і графічне представлення прогнозної моделі.

Розділ «Visualizations» містить результати візуалізації багаторічної динаміки агрокліматичних показників, таких як температура повітря, кількість атмосферних опадів, потенційна евапотранспірація та індекс аридності за період 1946–2024 рр. Ці візуалізації формують основу для ретроспективного аналізу кліматичних змін в аграрному секторі.

Усі результати статистичної обробки та візуалізації, отримані за допомогою веб-додатку, можуть бути завантажені у форматі PDF для подальшого використання в аналітичних або звітних матеріалах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблений веб-додаток не має аналогів в Україні та являє собою інноваційну інтерактивну платформу, яка поєднує супутникові, статистичні та агрокліматичні дані з сучасними методами математико-статистичного аналізу та машинного навчання для оцінки та прогнозування стану і продуктивності агроєкосистем. Завдяки широкому функціоналу – від візуалізації просторово-часових трендів до побудови регресійних моделей і прогнозування показників – веб-додаток виконує функції повноцінного науково-аналітичного інструмента нового покоління. Його практична цінність полягає в інтеграції великого масиву аграрних та екологічних даних із доступним інтерфейсом для аналізу, що дозволяє ефективно підтримувати прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері агрономії, землеробства, агроєкології, аграрної політики, сприяє розробці плану ресурсоефективного агровиробництва. Таким чином, створена інтерактивна електронна карта Ukraine Crop Production Map виступає не лише візуалізаційним інструментом, а й багатофункціональною платформою для аналізу даних, що забезпечує міждисциплінарну взаємодію між наукою, практикою та управлінською діяльністю. Вона відкриває нові можливості для наукових досліджень, освітніх потреб, підготовки політик у сфері продовольчої безпеки, а також для використання аграріями в умовах змін клімату та зростаючої потреби в розвитку національного сільського господарства на принципах сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Bouman B. A. M. Crop modelling and remote sensing for yield prediction. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 1995. Vol. 43. P. 143–161.
2. Holt C. C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*. 2004. Vol. 20(1). P. 5–10. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2003.09.015
3. Johnston F. R., Boyland J. E., Meadows M., Shale E. Some properties of a simple moving average when applied to forecasting a time series. *Journal of the Operational Research Society*. 1999. Vol. 50(12). P. 1267–1271. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600823
4. Joshi A., Pradhan B., Gite S., Chakraborty S. Remote-sensing data and deep-learning techniques in crop mapping and yield prediction: A systematic review. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 2014. DOI: 10.3390/rs15082014
5. Karthikeyan L., Chawla I., Mishra A. A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 586. P. 124905. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124905
6. Kendall M. G. Rank correlation methods. Griffin, 1948.
7. Kumar N., Yamaç S. S., Velmurugan A. Applications of remote sensing and GIS in natural resource management. *Journal of the Andaman Science Association*. 2015. Vol. 20(1). P. 1–6.
8. Liu X., Zhai H., Shen Y., Lou B., Jiang C., Li T., Hussain S., Shen G. Large-scale crop mapping from multisource remote sensing images in Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. P. 414–427. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2963539

9. Machichi M., Mansouri L., Imani Y., Bourja O., Lahlou O., Zennayi Y., Bourzeix F., Houmma I., Hadria R. Crop mapping using supervised machine learning and deep learning: A systematic literature review. *International Journal of Remote Sensing*. 2023. Vol. 44. P. 2717–2753. DOI: 10.1080/01431161.2023.2205984
 10. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945. P. 245–259.
 11. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons, 2021.
 12. Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the royal society of London*. 1895. Vol. 58(347-352). P. 240–242. DOI: 10.1098/rspl.1895.0041
 13. Білинський Й. Й., Книш Б. П. Аналіз характеристик та обґрунтування індексів рослинності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. Вип. 2. С. 7–14. DOI: 10.31649/1997-9266-2021-155-2-7-14
 14. Лиховид П. В. Агроекологічна оцінка сільськогосподарських земель за даними дистанційного зондування Землі. *Зрошуване землеробство*. 2024. Вип. 81. С. 24–31. DOI: 10.32848/0135-2369.2024.81.4
-