

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ СІЛЬСЬКИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ

С. Ю. Дрозд^{1,3,a}, Н. М. Куcssуль^{1,2}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² University of Maryland

³ Anhalt University of Applied Sciences

Анотація

Війна спричинила глибоку кризу сільських територій України, і за обмежених державних ресурсів їх відновлення залежить від зовнішніх інвестицій. Проте високі ризики та нестача об'єктивної інформації стримують інвесторів. Це дослідження має на меті комплексно оцінити інвестиційну привабливість сіл за допомогою багатокритеріального геопросторового аналізу.

Розглядалися три основні критерії: природний потенціал, інфраструктурна доступність і воєнна безпека. Серед напрямів інвестування – аграрний сектор, відновлювана енергетика та туризм. Ваги критеріїв визначалися методом попарних порівнянь із залученням п'яти великих мовних моделей (GPT-4, Claude, Gemini, Deepseek, Grok 3) як віртуальних експертів.

Отримані результати порівнювались з оцінками дев'яти фахівців. Мовні моделі показали вищу узгодженість і подібність до людських оцінок за ключовими критеріями. Безпека визначена як головний чинник, а землеробство – як найперспективніший напрям інвестування.

У підсумку створено серію тематичних карт, що візуалізують інвестиційний потенціал українських сіл. Найпривабливішими виявились західні регіони, найменш – східні та південні.

Ключові слова: інвестиційна привабливість територій, багатокритеріальний аналіз, ГІС, супутникові дані, штучний інтелект, великі мовні моделі

Вступ

Сільські території України, колись основа аграрного виробництва, нині перебувають у глибокій кризі. Війна зруйнувала інфраструктуру, обмежила доступ до послуг і погіршила якість життя, що посилює відтік населення та економічний спад.

В умовах браку державних ресурсів ключовим чинником відновлення стають зовнішні інвестиції. Вони можуть стимулювати розвиток інфраструктури, створити робочі місця та відновити агросектор. Однак інвестиційну активність стримують безпекові ризики й нестача об'єктивної інформації про потенціал регіонів.

Для комплексної оцінки доцільно використовувати багатокритеріальний аналіз у поєднанні з ГІС [1] та супутниковими даними [2, 3, 4, 5]. Це дає змогу об'єктивно оцінити території за різними напрямками – від енергетики [6, 7] до сільського господарства [8, 9, 10].

Визначення ваг критеріїв зазвичай потребує залучення експертів, що є затратним і може призводити до неузгоджених результатів. Альтернативою стали

великі мовні моделі (ВММ), здатні ефективно виконувати цю функцію. Їхні оцінки часто збігаються з експертними [11, 12, 13].

Таким чином, метою цього дослідження є комплексна оцінка інвестиційної привабливості сільських територій України на основі багатокритеріального аналізу з використанням ГІС та супутникових даних, а також залученням ВММ як віртуальних експертів. Ми прагнемо візуалізувати інвестиційний потенціал сіл за окремими напрямками та загальним рівнем, та перевірити ефективність ВММ у процесі попарного порівняння критеріїв інвестиційної привабливості сіл.

1. Дані та матеріали

Для оцінки інвестиційної привабливості сіл ми будемо багаторівневу структуру (рис. 1). Як критерії інвестиційної привабливості сіл, ми розглядаємо три ключові фактори:

1. Природний потенціал територій, який включає як підкритерії 4 напрямки інвестування:
 - (а) Придатність територій для ведення землеробства;
 - (б) Придатність територій для виробництва со-

^asofi.drozd.13@gmail.com

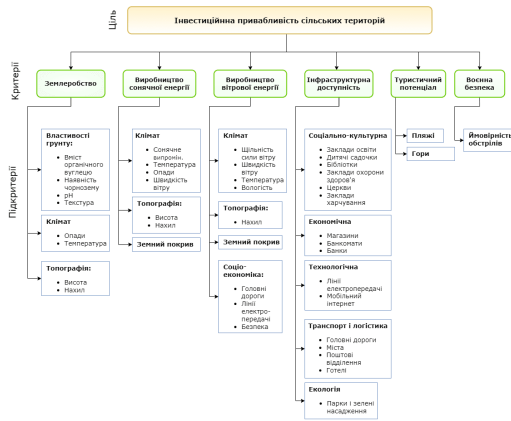


Рис. 1. Використані дані

- нячної енергії;
 (в) Придатність територій для виробництва вітрової енергії;
 (г) Придатність територій для розвитку туризму.

2. Інфраструктурна доступність;
3. Воєнна безпека (ймовірність обстрілів).

Для оцінки аграрного потенціалу були використані дані про фізико-хімічні властивості ґрунтів [14, 15, 16, 17], топографію [18] та кліматичні умови [19]. Потенціал сонячної енергетики оцінювався за показниками глобального випромінювання [19], температури [19], вітрової активності [19], опадів [19], висоти місцевості [18] та землекористування [20]. Для вітрової енергетики додатково враховувалась щільність вітрової потужності [21], кількість днів із непридатною швидкістю вітру [19] та близькість до інфраструктури [22].

Туристичний потенціал аналізувався на основі просторових даних про пляжі та гірські вершини (вище 600 м), отриманих з OpenStreetMap.

Інфраструктурну доступність ми визначали за розподілом соціальних, економічних і логістичних об'єктів (освіта, медицина, дороги, магазини, банкомати, готелі тощо) [22], а також наявністю мобільного інтернету за даними MobUA.net.

Оцінка рівня воєнної безпеки ґрунтувалась на даних про збройні зіткнення з бази ACLED [23] за період із лютого 2022 до грудня 2024 року.

Для аналізу відповідних критеріїв в межах сільських територій України ми використовуємо векторну карту адміністративних одиниць України 4-го рівня [24], відібравши з цього набору даних за допомогою аналізу поштових індексів 28 361 сільські населені пункти.

2. Методологія

Для дослідження застосовано багатокритеріальний аналіз із використанням методу аналізу ієрархії Т. Сааті [25].

Спершу ми будемо геопросторові карти, що оцінюють кожен критерій інвестиційної привабливості сіл та напрямків інвестування. Алгоритм передбачає:

1. Перекласифікацію вхідних даних;

2. Визначення вагових коефіцієнтів;
3. Обчислення зваженої лінійної комбінації.

Винятком є критерій воєнної безпеки. За даними ACLED ми побудували карту щільності збройних зіткнень методом KDE у QGIS – аналогічно до аналізу інфраструктурної щільності. Карта перекласифікована до шкали 0–1, де 0 – безпечно, а 1 – найбільша небезпека.

Далі, використовуючи отримані карти-критерії, ми створюємо карту загальної інвестиційної привабливості сіл, повторюючи кроки 2 і 3.

2.1. Перекласифікація вхідних даних

Оскільки початкові дані різномірні (температура, висота, тип землекористування тощо), їх перекласифікують у шкалу 0–1, яка відображає придатність значень для певної мети. Вищі значення відповідають більш сприятливим умовам.

Перекласифікація здійснюється у QGIS окремо для кожного шару – з урахуванням специфіки критерію. Наприклад, висота 400–1640 м оптимальна для сонячної енергетики, а 0–100 м – для землеробства.

Перекласифікація виконувалася на основі наукових публікацій та власних суджень.

2.2. Визначення вагових коефіцієнтів

Оскільки кожен критерій має різну важливість, їхні ваги обчислюються методом парних порівнянь за шкалою Сааті (1–9 балів). Група експертів оцінює попарну важливість критеріїв, результати вносяться до матриці попарних порівнянь.

Матриці перевіряються на узгодженість. Якщо $CR < 0.1$, матриця приймається для обчислення ваг за формулами, описаними у [25].

2.2.1. Залучення ВММ як віртуальних експертів

Для оцінки важливості підкритеріїв (температура, опади, тощо) критеріїв інвестиційної привабливості сіл та напрямків інвестування ми використовували матриці попарних порівнянь, віднайдені у літературі.

Тому, для оцінки важливості критеріїв інвестиційної привабливості сіл та напрямків інвестування на загальну інвестиційну привабливість сільських територій України ми залучили 5 ВММ як віртуальних експертів:

1. ChatGPT-4o від OpenAI;
2. Gemini 2 Flash від Google;
3. Claude 3.5 Sonnet від Anthropic;
4. DeepSeek-R1;
5. Grok 3 від xAI.

Усі моделі отримали однакові промти, сформовані за методикою CO-STAR [26], і згенерували дві матриці: для критеріїв привабливості та напрямків інвестування, на основі яких розраховуються ваги.

2.2.2. Залучення експертів-людей

Для перевірки достовірності оцінок віртуальних експертів ми провели опитування серед 9 фахівців (економісти, підприємці, науковці, аспіранти), що попарно порівнювали критерії за тією ж шкалою Сааті у Google-формі.

Щоб оцінити узгодженість між експертами-людьми та ВММ, використано індекс консенсусу на базі альфа- та бета-ентропії Шеннона [27].

2.3. Обчислення зваженої лінійної комбінації

Після перекласифікації вхідних даних та визначення вагових коефіцієнтів для створення карт-критеріїв інвестиційної привабливості ми застосуємо зважену лінійну комбінацію:

$$S_i = \sum_{i=1}^n C_i \cdot W_i. \quad (1)$$

Наступним кроком є оцінка загальної інвестиційної привабливості сіл. Однак перед цим необхідно векторизувати наявні растрові карти, що відображають складові інвестиційної привабливості, обчислюючи середні значення відповідних показників для кожного села. Далі застосовуються наступні формули 2-3:

$$NP = Agro_{ls} \cdot W_{agro} + Solar_{ls} \cdot W_{solar} + Wind_{ls} \cdot W_{wind} + TP \cdot W_{tp}, \quad (2)$$

$$RIAI = NP \cdot W_{nature} + IA_{index} \cdot W_{ia} + Safety_{index} \cdot W_{safety}, \quad (3)$$

де NP – природний потенціал; $Agro_{ls}$, $Solar_{ls}$, $Wind_{ls}$, TP – індекси придатності територій для землеробства, сонячної, вітрової енергії та туризму; W_{agro} , W_{solar} , W_{wind} , W_{tp} – їхні вагові коефіцієнти відповідно; $RIAI$ – загальний індекс інвестиційної привабливості; W_{nature} , W_{ia} , W_{safety} – ваги природного потенціалу, інфраструктурної доступності та безпеки; IA_{index} , $Safety_{index}$ – індекси доступності та безпеки.

3. Результати

3.1. Аналіз складових інвестиційної привабливості сіл України

На рис. 2 наведено побудовані карти, що відображають складові інвестиційної привабливості сіл.

Загалом, побудовані карти ілюструють, що жодна територія не є універсально одночасно придатною для всіх видів діяльності – кожна має свою спеціалізацію і набір переваг та обмежень.

3.2. Аналіз відповідей віртуальних експертів та експертів-людей щодо важливості критеріїв інвестиційної привабливості

Аналіз відповідей ВММ показав високу узгодженість між віртуальними експертами: консенсус склав 0.62 для ключових критеріїв та 0.86 для напрямків інвестування. Експерти-люди продемонстрували

нижчу узгодженість – хоча для критеріїв вона досягла 0.81, для напрямків інвестування лише 0.49, а значна частина їхніх матриць виявилась неконсистентною.

Порівняння обох груп показало помірну схожість у баченнях (0.58 для критеріїв, 0.72 для напрямків), однак ВММ забезпечують вищу стабільність оцінок.

Обидві групи визнали безпеку найважливішим критерієм, інфраструктуру – другою, а природний потенціал – найменш важливим. Серед напрямків інвестування перше місце посіло землеробство, далі – сонячна та вітрова енергетика, останнім – туризм (для ВММ) і вітрова енергетика (для людей).

Загалом, результати свідчать про релевантність використання віртуальних експертів у подібних аналітичних оцінках. На рис. 3 подано підсумкові вагові коефіцієнти для побудови інтегральної карти інвестиційної привабливості.

3.3. Аналіз загальної інвестиційної привабливості сіл

На основі середніх значень критеріїв та ваг, визначених віртуальними експертами, була побудована інтегральна карта інвестиційної привабливості сіл України (рис. 4).

Найпривабливішими для інвестування є села західних областей – Чернівецької, Івано-Франківської, Тернопільської, Львівської, а також півдня Рівненщини та Волині. Високий потенціал мають окремі території центральної України – Полтавської, Черкаської, Вінницької та півдня Київщини.

Натомість прифронтові райони сходу та півночі (особливо Чернігівська, Сумська області) мають низьку привабливість через ризики та слабку інфраструктуру. Села навколо Києва також втратили привабливість через безпекові загрози. Території північної Волині, Житомирщини, Одещини та Криму переважно мають середній рівень.

Загалом більшість сіл (10 429) мають середній рівень привабливості, а території з дуже високим (2 552), високим (6 245), низьким (6 490) і дуже низьким (2 645) рівнем розподілені відносно рівномірно.

4. Висновки

У роботі здійснено комплексну оцінку інвестиційної привабливості сільських територій України на основі супутникових даних, ГІС-аналізу та експертних оцінок, згенерованих великими мовними моделями (ВММ). Індекс привабливості розраховано за трьома критеріями: природний потенціал, інфраструктура та безпека, а також чотирма напрямками інвестування: землеробство, сонячна і вітрова енергетика, туризм. Ваги критеріїв визначалися через попарні порівняння, проведені п'ятьма ВММ, які продемонстрували високу узгодженість у відповідях. Найважливішим критерієм визначено безпеку, а землеробство – найпривабливішим напрямком інвестування.

Порівняння з оцінками дев'яти експертів-людей підтвердило загальну відповідність пріоритетів, що

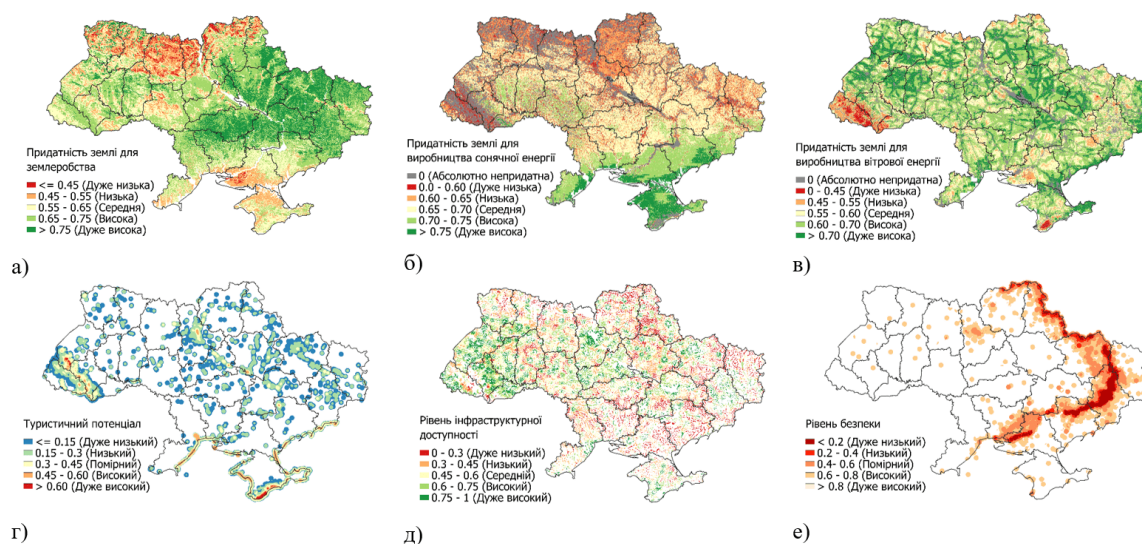


Рис. 2. Карти складових інвестиційної привабливості сіл України: а) придатність для землеробства, б) придатність для виробництва сонячної енергії, в) придатність для виробництва вітрової енергії, г) туристичний потенціал, д) інфраструктурна доступність, е) рівень воєнної безпеки

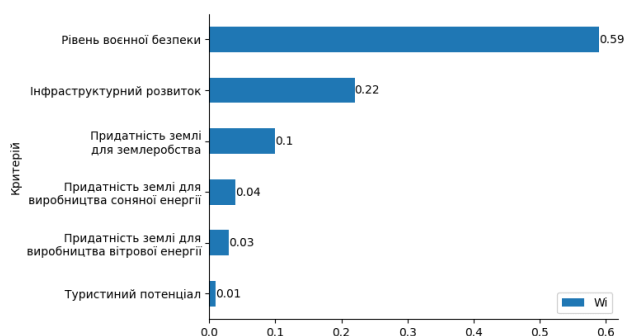


Рис. 3. Остаточні вагові коефіцієнти, обчислені на основі усереднення відповідей віртуальних експертів

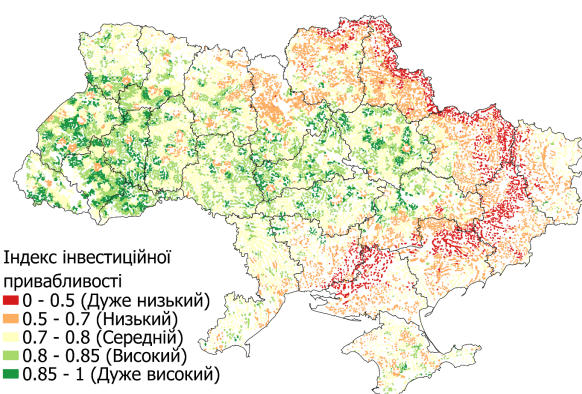


Рис. 4. Карта загальної інвестиційної привабливості сіл України

свідчить про надійність застосування ВММ як альтернативного інструмента у багатокритеріальному аналізі. На основі обчислених ваг створено карту інвестиційної привабливості, згідно з якою найперспективніші села розташовані в західних і центральних

областях, а найменш привабливі – поблизу фронту та в прикордонних північних і південних регіонах.

Перелік використаних джерел

1. GIS-based multiple-criteria decision analysis / R. Greene, R. Devillers, J. E. Luther, B. G. Eddy // *Geography compass*. — 2011. — Т. 5, № 6. — С. 412—432.
2. Agriculture Land Appraisal with Use of Remote Sensing and Infrastructure Data / N. Kussul, A. Shelestov, H. Yailymova, L. Shumilo, S. Drozd // *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. — IEEE. 2022. — С. 2785—2788.
3. Infrastructure quality assessment in africa using satellite imagery and deep learning / B. Oshri, A. Hu, P. Adelson, X. Chen, P. Dupas, J. Weinstein, M. Burke, D. Lobell, S. Ermon // *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining*. — 2018. — С. 616—625.
4. Şahin G., Koç A., Sark W. van. Multi-criteria decision making for solar power-Wind power plant site selection using a GIS-intuitionistic fuzzy-based approach with an application in the Netherlands // *Energy Strategy Reviews*. — 2024. — Т. 51. — С. 101307.
5. Evaluating urban environmental quality using multi criteria decision making / H. Mahmoudzadeh, A. Abedini, F. Aram, A. Mosavi // *Heliyon*. — 2024. — Т. 10, № 3.
6. Kussul N., Drozd S. Y. Geospatial analysis of the potential of the territories of Ukraine for the placement of solar power plants based on satellite data // *Space Science and Technology*. — 2024. — Т. 30, № 1.

7. Drozd S., Kussul N. Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic // *European Journal of Remote Sensing*. — 2024. — T. 57, № 1. — C. 2362390.
8. Innovative models and applications of satellite intelligence / N. Kussul, A. Shelestov, S. Drozd, B. Yailymov, H. Yailymova, M. Lavreniuk, L. Shumilo, S. Skakun. — 2024.
9. Soil property maps with satellite images at multiple scales and its impact on management and classification / N. E. Silvero, J. A. Demattê, J. de Souza Vieira, F. A. de Oliveira Mello, M. T. A. Amorim, R. R. Poppiel, W. de Sousa Mendes, B. R. Bonfatti // *Geoderma*. — 2021. — T. 397. — C. 115089.
10. Agricultural land suitability analysis of Southern Punjab, Pakistan using analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) techniques / S. Hussain, W. Nasim, M. Mubeen, S. Fahad, A. Tariq, S. Karuppannan, S. Alqadhi, J. Mallick, H. Almohamad, H. Ghassan Abdo // *Cogent Food & Agriculture*. — 2024. — T. 10, № 1. — C. 2294540.
11. Svoboda I., Lande D. Enhancing multi-criteria decision analysis with AI: Integrating analytic hierarchy process and GPT-4 for automated decision support // *arXiv preprint arXiv:2402.07404*. — 2024.
12. Wang X., Wu X. Can ChatGPT serve as a multi-criteria decision maker? A novel approach to supplier evaluation // *ICASSP 2024-2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. — IEEE. 2024. — C. 10281—10285.
13. Wang H., Zhang F., Mu C. One for All: A General Framework of LLMs-based Multi-Criteria Decision Making on Human Expert Level // *arXiv preprint arXiv:2502.15778*. — 2025.
14. Hengl T. Soil pH in H₂O at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. — 2018. — DOI: [10.5281/zenodo.2525664](https://doi.org/10.5281/zenodo.2525664).
15. Hengl T., Wheeler I. Soil organic carbon content in x 5 g / kg at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (v0.2). — 2018. — DOI: [10.5281/zenodo.2525553](https://doi.org/10.5281/zenodo.2525553).
16. Hengl T. Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m. — 2018. — DOI: [10.5281/zenodo.2525817](https://doi.org/10.5281/zenodo.2525817).
17. *FAO Catalog*. Global Black Soil Distribution Map (v1.0). — 2022. — URL: <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/global-black-soil-distribution-map/resource/62ebdeda-4f4a-4019-a8a3-5e4533945903%7D>.
18. NASA. SRTM. — 2024. — URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm> ; Accessed April 8, 2025.
19. *Copernicus Climate Data Store*. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. — 2025. — URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview>.
20. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data / N. Kussul, M. Lavreniuk, S. Skakun, A. Shelestov // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. — 2017. — T. 14, № 5. — C. 778—782.
21. Global Wind Atlas. — URL: <https://globalwindatlas.info/en/>.
22. OpenStreetMap. — URL: <https://www.openstreetmap.org/about>.
23. *ACLED*. About ACLED - ACLED. — 2025. — URL: <https://acleddata.com/about-acled/>.
24. *State Scientific Production Enterprise "Kartographia"*. Ukraine - Subnational Administrative Boundaries. — 2024. — URL: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-ukr>.
25. Saaty T. L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP) // *Journal of systems science and systems engineering*. — 2004. — T. 13. — C. 1—35.
26. Czerny T. CO-STAR Framework for Prompt Structuring - Thomas Czerny - Medium // Medium. — 2024. — URL: <https://medium.com/@thomasczerny/co-star-framework-for-prompt-structuring-7f9a8c221224>.
27. Goepel K. D. Implementing the analytic hierarchy process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises—a new AHP excel template with multiple inputs // *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*. T. 2. — Creative Decisions Foundation Kuala Lumpur, 2013. — C. 1—10. — DOI: [10.13033/isahp.y2013.047](https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047). — URL: <https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>.