



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.4.276>

УДК (528.8+004.94):332.3

Моделювання придатності територій для розміщення критичної інфраструктури України в умовах військових загроз

К. В. Боровик, С. В. Гапон, І. О. Пишнограєв*, А. І. Хашевацька

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

У дослідженні оцінюється придатність територій України для розміщення промислових об’єктів та релокації енергетичної інфраструктури у прикордонних областях в умовах військових дій. За допомогою комплексної ГІС-моделі аналізується територія за низкою факторів, які впливають на вибір місця для розміщення важливої інфраструктури. Основними факторами, які було враховано, є особливості рельєфу (ухил, перепади висоти), наземний покрив, доступність транспорту, відстань до населених пунктів, віддаленість від місць надзвичайних ситуацій, спричинених воєнними діями. Моделювання включає аналіз відстаней та доступність, що дає змогу оцінити близькість кожного об’єкта до визначених інфраструктурних елементів. Результатом є створення загальної карти придатності, де найбільш перспективними визначено території в областях, що знаходяться віддалено від зони бойових дій, мають розвинену інфраструктуру та належні умови для розміщення потрібних центрів промисловості чи енергетичних підстанцій. Такий підхід сприяє економічній доцільності, мінімізації логістичних витрат, а також гарантує стабільне електропостачання. Одним із факторів, який враховувався під час моделювання пріоритетних місць, було використання кадастрових ділянок. Це є важливим елементом, що слугує правильному розташуванню на конкретних придатних земельних ділянках, визначених за їх цільовим призначенням, а не абстрактно. Також дає змогу уникнути розробки проектів поза контекстом цільового призначення та врахувати реальні можливості територій для ефективного планування промислової інфраструктури. Запропонована модель дає змогу побачити неочевидні закономірності та ідентифікувати такі ділянки, які б не розглядалися як пріоритетні під час використання класичних методів оцінювання. На основі моделі визначено 50 пріоритетних ділянок для промислових об’єктів та 60 – для електropідстанцій, що відповідають вимогам безпеки та економічної доцільності.

Ключові слова: ГІС, ДЗЗ, критична інфраструктура, воєнні дії, моделювання придатності територій, релокація, економічна стійкість.

© К. В. Боровик, С. В. Гапон, І. О. Пишнограєв, А. І. Хашевацька. 2024.

*E-mail: pyshnograiev@wdc.org.ua

1. Вступ

Аналіз останніх досліджень у сфері моделювання пріоритетних ділянок для розміщення промислових об’єктів та релокації енергетичної інфраструктури свідчить про значний науковий і практичний інтерес до теми. Багато дослідників зосереджуються на розробці комплексних моделей, що враховують як економічні, так і безпекові фактори при виборі територій для розміщення інфраструктурних об’єктів. Більшість даних, які використовуються, під час вибору ділянки під промисловість чи енергетичну інфраструктуру, є географічними, і це означає, що процес вибору є просторовою проблемою прийняття рішення. Такі дослідження стають все більш поширеними завдяки наявності геоінформаційних систем, про що писали (Рікалович А. та ін., 2013). Методологія ГІС-моделювання описана в дослідженні (Jiuping X. et al., 2015), її можна адаптувати до різних

країн з мінімальними змінами параметрів. Автори (Rustemli S. et al., 2024) за допомогою ГІС та аналізу в Matlab виявили сприятливі місця для розміщення вітрової електростанції, враховуючи екологічні та кліматичні фактори. Важливим є дослідження, в якому оцінено просторовий розподіл інфраструктури на північному сході Ірану за допомогою підходу пасивної оборони та методів ГІС, виділяючи зони різної вразливості й визначаючи ключові фактори для покращення безпеки інфраструктури (Rabiei-Dastjerdia H. et al., 2021; Кузніченко С. та ін., 2019). Про проблеми захисту енергетичної інфраструктури в умовах гібридної війни та про організацію захисту, забезпечення безпеки функціонування об’єктів критичної інфраструктури та енергетики України в умовах ведення воєнних дій написано в дослідженнях (Про організацію захисту та забезпечення безпеки функціонування об’єктів критичної інфраструктури та енергетики України в умовах ведення воєнних дій, 2023; Суходоля О. М., 2015). Про важливість захисту

критичної інфраструктури у нестабільних умовах та під час ведення бойових дій описано закордонними авторами у працях (Gerhard J. et al., 2022; Majumdar S. et al., 2021; Sowers J. L. et al., 2017; Srail, J. S. et al., 2023). У більшості досліджень основна увага приділяється економічним і базовим безпековим факторам, однак не враховуються специфічні ризики геополітичної нестабільності, що дуже важливо для України. У цьому дослідженні велика увага приділена аналізу території, яка постійно потерпає від обстрілів та перебуває у постійному ризику бути захопленою ворожою стороною. Автори актуалізували територіальну придатність під розміщення критичних об'єктів інфраструктури в умовах конфлікту, що передбачає оцінювання потенційної загрози руйнування та оперативності відновлення об'єктів, у роботі додатково враховано аналіз військових ризиків. Оцінено логістичну доступність і максимальну економічну вигідність. Таке моделювання враховує динаміку змін у військовій та політичній обстановці, даючи змогу адаптувати вибір ділянок під критичну інфраструктуру в разі ескалації. Цей підхід підвищить стійкість та ефективність функціонування критичної інфраструктури України в умовах воєнної нестабільності та забезпечить кращий рівень підготовки до виникнення можливих надзвичайних ситуацій. Отже, актуальність теми зумовлена воєнними діями на території України, що призвели до масових руйнувань інфраструктурних та промислових об'єктів, а також до загальної економічної нестабільності. Відновлення економіки та забезпечення стабільного електропостачання потребують ефективних рішень з розміщення критичних об'єктів на відносно безпечних територіях. Переміщення промислових потужностей та енергетичних об'єктів у регіони з нижчим рівнем ризиків обстрілів та бойових дій є важливим елементом стратегії національної безпеки. Це дасть змогу не лише відновити економічний потенціал країни, а й створити нові робочі місця для внутрішньо переміщених осіб, що сприятиме соціальній стабільності та економічному розвитку. Об'єктом дослідження є територія України, що розглядається з точки зору придатності для розміщення об'єктів промисловості та енергетичної інфраструктури в умовах військових загроз. Такий підхід враховує як фізико-географічні характеристики, соціально-економічний потенціал, так і ризики, пов'язані з воєнними діями. Предметом дослідження є фактори, які впливають на придатність територій для розміщення промислових і енергетичних об'єктів, зокрема інфраструктурна доступність, близькість до населених пунктів, рельєф, природні умови, ризики воєнних дій, а також методи, що дають змогу їх інтегрувати для комплексного оцінювання. Метою дослідження є розробка моделі придатності, що дасть змогу визначити оптимальні території для розміщення промислових об'єктів та релокації об'єктів енергетичної інфраструктури. Це дослідження спрямоване на підвищення рівня безпеки та ступеня ефективного використання інфраструктури, зниження

логістичних витрат, підтримку економічної стабільності в умовах тривалих військових загроз. Результати моделювання та отримані за допомогою геоінформаційних систем дані сприятимуть ухваленню правильних управлінських рішень щодо розміщення стратегічних об'єктів, мінімізуючи ризики військових збитків, й ефективному відновленню національної економіки та інфраструктури.

2. Оцінювання придатності територій для розміщення об'єктів промисловості

В умовах воєнного конфлікту Україна зазнала значних руйнувань інфраструктури та виробничих потужностей, насамперед в областях, де активно ведуться бойові дії – Чернігівська, Сумська, Харківська, Донецька, Луганська, Запорізька, Херсонська, Миколаївська та Одеська області, які мають вихід до Чорного моря та є постійною ціллю для обстрілів, передусім портові центри. Втрата промислових об'єктів і знищення енергетичної інфраструктури призводять до погіршення економічних показників, зниження рівня життя та вимушеного переміщення населення. Це створює нагальну потребу в перенесенні промислових та енергетичних об'єктів у безпечніші регіони тим самим стимулюється розвиток цих територій, забезпечуються робочими місцями внутрішньо переміщені особи та відновлюється економічна стійкість. Локації підприємства визначають органи місцевого самоврядування сторони, яка приймає, проте інструменту для визначення найкращих ділянок під розміщення нових об'єктів промисловості немає, рішення приймаються на основі наявної документації про земельні ресурси громади, часто вона є неактуальною, більшість населених пунктів не мають розроблених просторових комплексних планів, що дасть змогу ефективно використовувати земельний потенціал території. Для вдалого вибору місця під релокацію промисловості й енергетичних об'єктів доцільно використовувати сучасні методи моделювання в геоінформаційних системах. Це дає змогу системно оцінити потенціал регіонів з урахуванням безпекових ризиків, доступності інфраструктури, логістичних можливостей, наявних природних ресурсів та особливостей рельєфу кожного регіону. Такий підхід включає використання дистанційного зондування, штучного інтелекту та аналізу великих даних для врахування актуальних змін у безпековій ситуації.

2.1. Побудова моделі придатності

Комплексне оцінювання території під розміщення об'єктів промисловості складається з низки факторів та їх бальної оцінки впливу (Табл. 1). Інтеграція даних про густоту населення, доступ до ресурсів, рельєф та транспортні шляхи сприяє оптимальному розподілу об'єктів критичної інфраструктури, знижуючи

вразливість до атак та забезпечуючи стійкість енергосистеми країни.

Таблиця 1. Фактори впливу на розміщення об’єктів критичної інфраструктури

№	Назва фактору	Джерела даних	Бали
Інфраструктура			
1	Доступність до автодоріг	OpenStreetMap (OSM, 2023)	8
2	Доступність до залізниці	OpenStreetMap (OSM, 2023)	8
3	Вишки стільникового зв’язку	OpenCelliD (OpenCelliD, n.d)	6
4	Доступність до електростанцій	Global Energy Observatory (Global Energy Observatory, 2024)	10
5	Близькість до населених пунктів	Global human settlement layer (GHS built-up surface) (GHSL, 2020)	9
6	Віддаленість від місць надзвичайних ситуацій, спричинених воєнними діями	Armed conflict location event data (ACLED, 2023)	8
7	Кадастрові ділянки промислового призначення	Державний земельний кадастр (Державний земельний кадастр, 2022)	10
Природні			
8	Рельєф	Цифрова модель рельєфу, з 30-м роздільною здатністю із програми Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, n.d)	7
9	Ухил	Цифрова модель рельєфу, з 30-м роздільною здатністю із програми Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, n.d)	6
10	Наземний покрив	Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover (Sentinel-2, 2023)	9
11	Доступність до водних об’єктів	OpenStreetMap (OSM, 2023)	6
12	Віддаленість від заповідних територій	Єдиний державний вебпортал відкритих даних, природно-заповідний фонд (Портал відкритих даних, 2022)	1
13	Населення	GHS population grid (GHSL, 2020)	9

Щоб отримати оцінку території, за низкою цих факторів (Табл. 1) для найвигіднішого розміщення об’єктів промисловості, потрібно опрацювати кожний фактор окремо. Для цього була застосована методика розрахунку загального індексу придатності. Для кожної ділянки території розраховується загальний індекс придатності (ЗІП) шляхом зваженого сумування балів факторів:

$$ЗІП = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

де W_i – вага, пріоритетність i -го фактора, S_i – бал i -го фактора для конкретної ділянки, n – кількість факторів.

Для забезпечення коректності розрахунків ваги факторів нормалізуються так, щоб їх сума дорівнювала 1:

$$\omega_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

де ω_i – нормалізована вага i -го фактора.

Приведення балів факторів до єдиної шкали розраховується за формулою:

$$S'_i = \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}},$$

де S'_i – нормалізований бал i -го фактора, S_{\min} , S_{\max} – мінімальне та максимальне значення балів для фактора i .

Інтегральний бал придатності (ІБП) розраховується за формулою:

$$ІБП = \sum_{i=1}^n \omega_i \times S'_i,$$

де ІБП – інтегральний бал придатності для ділянки.

Нижче наведено опис кожного фактора з розрахованим індексом доступності (віддаленості) до необхідних об’єктів. Опис факторів впливу подано у вигляді геопросторових растрових шарів з результатами їхнього оцінювання (Рис. 1, 2, 3).

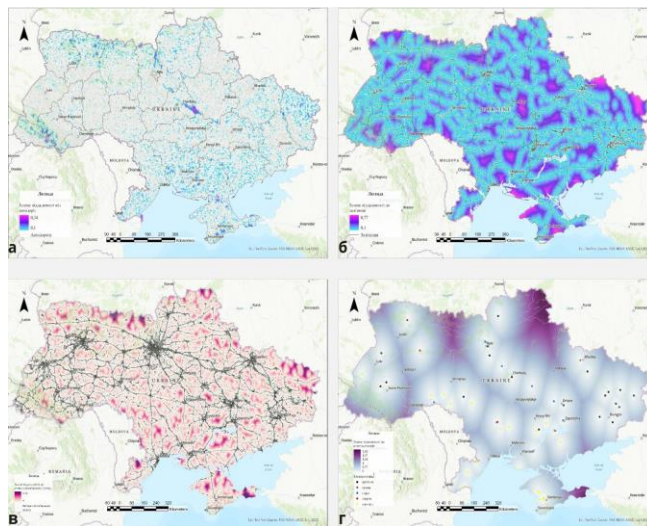


Рис. 1. Індеси факторів впливу на моделювання оптимальних ділянок під розміщення об’єктів промисловості:

індекс віддаленості від автодоріг (а), індекс віддаленості від залізниці (б), індекс віддаленості від вишок стільникового зв’язку (в), індекс віддаленості від електростанцій (г)

Індекс доступності до автодоріг (Рис. 1, а) суттєво залежить від розвитку дорожньої мережі. Регіони з високою економічною активністю та густонаселеними районами біля великих міст є найбільш придатними для промислового розміщення, тоді як північ та регіон Карпат мають менш розвинену транспортну мережу через малоефективний економічний потенціал у зв’язку зі сформованими тут природними умовами, які

ускладнюють ведення різного роду діяльності, і, як наслідок, низькою густотою населення.

Доступність до залізниці (Рис. 1, б) є стратегічним фактором для важкої промисловості, індекс показує, що більшість регіонів однаково забезпечені залізничними шляхами, що дає змогу планувати перевезення товарів великими обсягами на довгі відстані.

Наявність комунікаційної інфраструктури, зокрема вишок стільникового зв'язку (Рис. 1, в), важлива для забезпечення стабільного зв'язку та безперебійної роботи підприємств. Вишки нерівномірно поширені на території України, найбільша концентрація вишок біля великих міст (Київ, Дніпро, Рівне, Луцьк, Полтава і т. д). Найнижчий індекс поширення стільникового зв'язку – північні (через складну географію регіону) та південно-східні області (внаслідок активного ведення бойових дій).

Електропостачання є критичним для більшості видів промислового виробництва. Близькість до електростанцій (Рис. 1, г) знижує витрати на проведення енергетичних ліній та забезпечує надійність енергозабезпечення. В умовах війни безпосередня близькість до великих електростанцій може стати вразливим місцем для підприємств, оскільки такі об'єкти часто є мішенню для атак. Тому при моделюванні зон під промисловість було враховано показник віддаленості від самої станції для того, щоб уникнути розташування об'єктів у безпосередній близькості до критичної інфраструктури.

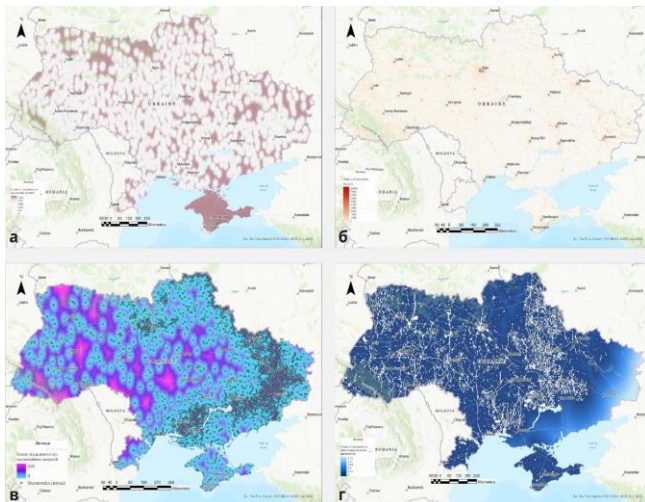


Рис. 2. Індекси факторів впливу на моделювання оптимальних ділянок під розміщення об'єктів промисловості: індекс віддаленості від населених пунктів (а), індекс густоти населення (б), індекс віддаленості від місць надзвичайних ситуацій, спричинених воєнними діями (в), індекс поширення ділянок промислового призначення (г)

Доступність до населених пунктів (Рис. 2, а) – важливий фактор, його варто враховувати, тому що розташування промислових об'єктів поблизу населених пунктів забезпечує доступ до ринку праці та потенційних споживачів продукції. Однак, надмірна

близькість може бути небажаною через екологічне навантаження на життя місцевих жителів. З огляду на умови воєнного стану, стратегічні об'єкти промисловості несуть загрозу для близько розташованих населених пунктів, тому в індексі враховано радіус віддаленості до населених пунктів.

Залучення фактора густоти населення (Рис. 2, б) під час моделювання зон промислових об'єктів забезпечує легший доступ до робочої сили. Це знижує витрати на залучення персоналу й транспорт для працівників. Найвищі показники густоти спостерігаються у великих містах, таких як Київ, Харків, Одеса, Львів, Дніпро. Середня густина населення характерна для середніх і малих міст. Такі території є вигідними для розміщення промисловості через меншу конкуренцію і нижчі витрати на оренду землі. Низька густина населення спостерігається в сільських районах та деяких віддалених областях, як-от у Поліссі та Карпатському регіоні, що значно знижує загальну оцінку цих територій при моделюванні.

Безпечовий рівень підприємств має велике значення для його стабільної роботи. Промислові об'єкти повинні бути розташовані на достатній відстані від зон ризику, щоб мінімізувати можливі збитки від воєнних дій або інших надзвичайних ситуацій. Найбільше ризиків через обстріли сконцентровано вздовж лінії фронту, прифронтових населених пунктах та навколо великих міст, це й показує індекс віддаленості від місць надзвичайних ситуацій (Рис. 2, в).

Кадастрові ділянки промислового призначення (Рис. 2, г) мають високий рівень пріоритетності. Ці ділянки вже виділені для промислового використання, що звужує правові та адміністративні перепони для будівництва. Вони є найбільш придатними для інвестицій.

Рельєф (Рис. 3, а) є важливим фактором для визначення пріоритетності ділянок під розміщення промислових об'єктів, оскільки гірські або сильно розчленовані ділянки можуть ускладнювати логістику до підприємства. Багато інженерних систем, таких як водопостачання, електропостачання та дренаж, важче і дорожче прокласти на ділянках зі складним рельєфом, що надалі впливає на ціноутворення продукції.

Рівнинна місцевість, зазвичай, є економічно доцільною для розміщення промислових об'єктів. Ухил впливає на стабільність ґрунтів, наприклад, будівництво на схилах або в зонах з підвищеним ризиком зсувів є небезпечним і потребує додаткових заходів для стабілізації території. Оптимальні ділянки мають невеликий ухил для зменшення витрат на будівництво (Рис. 3, б). Найбільші перепади ухилу в гірських регіонах та в регіонах, які розчленовані долинами річок, ярами, балками (Харківська, Донецька, Одеська області, південь Вінницької області).

Враховання наземного покриття (Рис. 3, в), як фактора для моделювання ділянок під промислові

об'єкти, впливає на прийняття рішень щодо розбудови навколишньої інфраструктури, ефективного використання наявних ресурсів. Наземний покрив під забудовою та голою (незайнятою) землею є пріоритетними типами наземного покриву під розгортання промислових потужностей, адже ці ділянки вважаються найбільш оптимальними, оскільки вже мають розвинену інфраструктуру або не потребують значних підготовчих робіт. Це знижує витрати на підготовчі роботи. Крім того, такі території мінімізують екологічні збитки, оскільки не руйнують природні екосистеми.

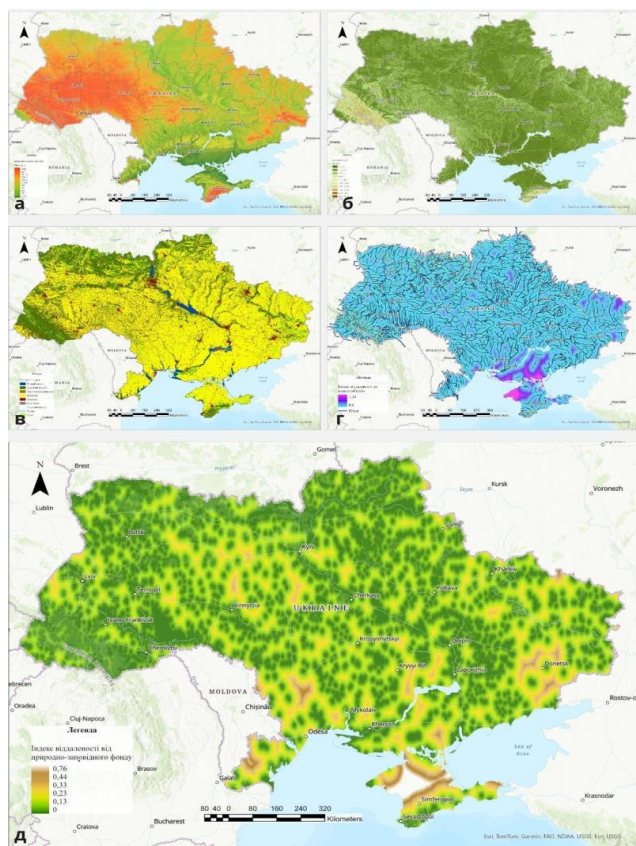


Рис. 3. Індекси факторів впливу на моделювання оптимальних ділянок під розміщення об'єктів промисловості: цифрова модель рельєфу (а), показник крутизни ухилу (б), наземний покрив (в), індекс віддаленості від водних об'єктів (г), індекс віддаленості від природно-заповідного фонду (д)

Промислові підприємства часто потребують великих об'ємів води для технологічних процесів. Наявність водних ресурсів (Рис. 3, г) забезпечує стабільне водопостачання та можливість ефективного виробництва. Найвищий показник віддаленості від водних об'єктів на півдні (цей регіон найменше забезпечений прісною водою) та на сході Харківської і Луганської областей. Фактор заповідних територій (Рис. 3, д) важливо враховувати як територію з найменшим пріоритетом, щоб промислові зони були якнайдалше розташовані від екологічних зон, для

уникнення негативного впливу на природні екосистеми.

2.2. Результат оцінювання придатності території щодо розміщення промислових потужностей

На основі 13 основних факторів, які впливають на вибір території при розміщенні промислових потужностей і певної пріоритизації кожного фактору, було змодельовано загальну карту з індексом придатності території по Україні (Рис. 4). Найбільший індекс придатності мають регіони: південь Київської, Житомирської, Рівненської областей, північ Одеської, Кіровоградської, Черкаської областей та Львівська, Хмельницька, Вінницька області. Індекс придатності підсвічує території з найоптимальнішими загальними показниками, які потрібно враховувати при розміщенні промислових об'єктів, кожна галузь промисловості потребує детальнішого аналізу, проте розуміння того, що потенційно, кожна громада має територію, яка буде придатною для інвестування коштів, сприяє привабливості регіону для інвесторів, а також підсвічує зони, які категорично не підлягають промислового використанню, і ці території раціонально використовувати в інших сферах, наприклад, такі території мають природно-охоронний режим, де варто розвивати рекреаційну діяльність.

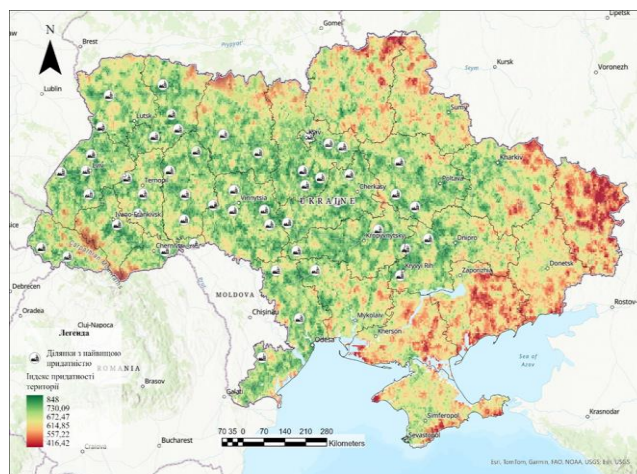


Рис. 4. Модель придатності території під розміщення промислових об'єктів

На підставі моделі придатності території під розміщення промислових об'єктів, у межах 17 областей було ідентифіковано 50 ділянок з найвищим індексом придатності. Найбільше ділянок визначено в Київській (Броварський р-н., Баришівська, Березанська територіальні громади; Обухівський р-н., Миронівська громада; Білоцерківський р-н., Узинська, Таращанська громади), Вінницькій (Гайсинський р-н., Гайсинська територіальна громада; Вінницький р-н., Іллінецька, Гніванська громади, Хмельницький р-н., Іванівська громада), Хмельницькій (Шепетівський р-н., Хмельницький р-н., Судилківська, Теофіпольська, Хмельницька, Вовковинецька, Дунаєвецька

територіальні громади, Кам'янець-Подільський р-н.), Львівській (Львівський р-н., Львівська, Жовківська громади, Стрийський р-н., Розвадівська громада, Яворівський р-н., Мостиська громада) областях. Змодельована мапа показує не лише пріоритизацію земель під промисловість, а загалом раціональне використання ресурсів і потенціалу кожного регіону.

3. Оцінювання придатності територій для розміщення об'єктів енергетики

У другій частині дослідження увагу зосереджено на моделюванні пріоритетних місцеположень для релокації об'єктів енергетичної інфраструктури, зокрема електропідстанцій, у прикордонних областях України. Це є логічним продовженням попереднього аналізу, в якому розглядалися оптимальні території для розміщення промислових об'єктів у межах України в умовах воєнних дій і загроз. Зважаючи на те, що стабільне функціонування промисловості залежить від безперервного постачання енергоресурсів, особливого значення набуває забезпечення нових локацій необхідними енергетичними ресурсами. Саме тому доцільно дослідити можливі місця для релокації електропідстанцій, що сприятиме підвищенню стійкості промислової діяльності в умовах потенційних ризиків на прикордонних територіях.

Одними з пріоритетних цілей для ворога під час війни є об'єкти енергетичної інфраструктури. Постійні загрози з боку противника, обстріли та деструктивні дії можуть призвести до значних втрат в енергетичному секторі, що, своєю чергою, негативно вплине на забезпечення електропостачання всієї країни. Найбільшого ураження зазнають області України, що межують з Російською Федерацією та Республікою Білорусь, а також ті області, які потерпають від постійних обстрілів, такі як Одеська, на території якої розташований важливий портовий вузол, та Миколаївська, яка зазнала часткової окупації й знаходиться на відстані 20 км від лінії фронту. Переміщення енергетичних потужностей на більш безпечні території буде гарантувати стабільність електропостачання та знизить ризики руйнування критично важливої інфраструктури. Водночас важливо здійснювати релокацію об'єктів критичної інфраструктури в такий спосіб, щоб забезпечити рівномірне розподілення по регіонах і уникнути концентрації в одному місці. Це допоможе запобігти ситуації, коли одні регіони мають надлишок енергетичних ресурсів, а інші залишаються без них, що може призвести до економічних дисбалансів і соціальної напруги.

Незважаючи на систематичні обстріли зазначених областей, агресія противника зосереджується на конкретних об'єктах та зонах, що мають стратегічну важливість. Водночас, значна частина територій прикордонних областей зазнає менших обстрілів або взагалі не піддається атакам. Переміщення об'єктів енергетичної інфраструктури на ці території знижує

ризик їх ураження, тому що збільшується відстань від лінії фронту.

Фактор рельєфу також відіграє важливу роль у створенні безпечних умов, оскільки природні перепони / бар'єри можуть істотно ускладнювати виявлення об'єктів та прицілювання ворожих засобів вогню. Крім того, нові об'єкти мають бути спроектовані з урахуванням сучасних стандартів безпеки, які передбачають їх оснащення укриттями, що додатково підвищує їх захищеність. Таким чином, релокація об'єктів у безпечні зони з урахуванням вищезазначених факторів суттєво зменшує вразливість інфраструктури.

У сучасних умовах традиційні методи вибору місцеположення для будівництва нових та переміщення наявних електропідстанцій є недосконалими, насамперед під час війни, оскільки вони не враховують зміни безпекової ситуації та ризики воєнних дій. Для врахування цих факторів необхідно застосовувати комплекс сучасних методів, що базуються на використанні даних дистанційного зондування Землі, методів штучного інтелекту та аналізу великого обсягу даних (Про затвердження Правил улаштування електроустановок, 2017). Такий підхід дає змогу системно оцінити потенційні місця розташування, з огляду на безпекові аспекти, логістику, інфраструктуру та інші фактори, що забезпечують стійкість та надійність енергетичної системи країни. Застосування такого підходу передбачає визначення критично важливих факторів, таких як наземний покрив, пріоритетні регіони, густота населення, надзвичайні ситуації, спричинені воєнними діями та щільність доріг з їх подальшим оціненням, враховуючи особливості розміщення конкретних об'єктів.

Бальна оцінка дає змогу структурувати та встановити пріоритетність чинників, що впливають на вибір місцеположення. Зокрема, фактор густоти населення з високим балом вказує на те, що на цій території проживає значна кількість людей, отже, розміщення підстанції поблизу є економічно вигідним, оскільки зменшує втрати при транспортуванні електроенергії.

Перевагою методу є можливість використовувати відкриті дані для оцінювання факторів, що забезпечує оперативність та економічну ефективність процесу. Кількість факторів, їх пріоритетність та оцінка можуть змінюватися залежно від типу об'єктів. Наприклад, для знижувальних електропідстанцій важливішими можуть бути фактори густоти населення та щільності доріг, тоді як для генераційних станцій пріоритетними можуть стати рельєф та наявність водних ресурсів. Визначення ключових критеріїв та їх бальна оцінка дає змогу створити детальну карту потенційних локацій, де кожна ділянка має свій інтегральний бал придатності.

Оскільки до енергетичної інфраструктури належать доволі різноманітні об'єкти, критерії для розміщення яких суттєво відрізнятимуться, моделювання

здійснюється на прикладі знижувальних електропідстанцій. Вибір саме цих підстанцій зумовлений їх великою кількістю на території країни однак, враховуючи наявність численних об'єктів, моделювання має охоплювати одразу багато ділянок. Це створює додаткові труднощі для ручного виконання процесу, що зумовлює потребу у впровадженні новітніх методів.

3.1. Побудова моделі придатності

Знижувальні підстанції часто стають мішенню для обстрілів з боку ворога, що підвищує актуальність їх моделювання з погляду безпеки. Також варто зазначити, що фактори розміщення цих підстанцій є досить універсальними: їх можна адаптувати та модифікувати, щоб отримати моделі для інших енергетичних об'єктів.

Для моделювання пріоритетних місцеположень були використані такі дані:

- Типи наземного покриття ESRI LandCover (Sentinel-2, 2023) за 2023 рік, отримані на основі зображень Sentinel-2 L2A з просторовим розрізненням 10 м.
- Набір просторових растрових даних (GHSL, 2020) та (HDE, 2024), який відображає розподіл густоти населення та адміністративні кордони України (рівень 2 – області).
- Шари OpenStreetMap (OSM, 2023).
- Цифрова модель рельєфу (ЦМР) від SRTM та Copernicus DEM (SRTM n.d.).
- Дані про розташування та події збройних конфліктів від ACLED (n.d.).

Згідно з Правилами установки електростанцій (Про затвердження Правил улаштування електроустановок, 2017) для розміщення знижувальних електропідстанцій необхідно:

- Дотримуватися мінімальної відстані трансформаторних підстанцій від автодороги: чим вищий клас напруги, тим більша відстань.
- Розміщувати підстанції якомога ближче до споживача, щоб скоротити втрати електроенергії під час транспортування.
- Забезпечити достатню відстань між підстанціями та деревами висотою понад 4 м, враховуючи їхню потенційну висоту через 25 років, щоб запобігти пошкодженням у разі падіння дерева.
- Дотримуватися вимог протипожежного захисту щодо відстані від меж лісового масиву, місць розроблення та відкритого залягання торфу.

Було визначено шість основних факторів, які впливають на розміщення електропідстанцій: наземний покрив, густина населення, щільність доріг, рельєф, надзвичайні ситуації, спричинені воєнними діями, та пріоритетність регіонів. Кожному фактору присвоюється бал, який визначає, наскільки цей критерій важливий.

Найвищий бал – 10 – має фактор пріоритетності регіонів. За допомогою цього фактора

відфільтровується територія, яка непридатна внаслідок перебування під окупацією, оскільки за іншими факторами модель може ідентифікувати придатні ділянки на окупованих територіях. Тому території, які знаходяться під окупацією та біля лінії фронту, мають меншу пріоритетність.

Наземний покрив – 9 – важливий фактор, врахування якого дає змогу встановити пріоритетність типів наземного покриття для розміщення електропідстанцій та відсіяти непридатні.

Густина населення – 9 – впливає на створення вищої пріоритетності ділянок, що знаходяться ближче до населених пунктів, тому, чим вища густина населення, тим вищий бал.

Густина населення ($D_{\text{нас}}$) розраховується за формулою:

$$D_{\text{нас}} = \frac{N}{A},$$

де N – чисельність населення на території, A – площа території.

Надзвичайні ситуації, спричинені воєнними діями – 8 – цей фактор враховує кількість випадків дистанційних вибухів, боїв та насильства проти мирних жителів. Відповідно, чим більша кількість таких випадків, тим менший бал і придатність території. Для врахування фактора віддаленості від зон бойових дій чи надзвичайних ситуацій використовується формула евклідової відстані:

$$D = \sqrt{(x_{\text{ділянка}} - x_{\text{небезпечна зона}})^2 + (y_{\text{ділянка}} - y_{\text{небезпечна зона}})^2},$$

де $(x_{\text{ділянка}}, y_{\text{ділянка}})$ – координати ділянки, $(x_{\text{небезпечна зона}}, y_{\text{небезпечна зона}})$ – координати небезпечної зони.

Щільність доріг – 8 – дорожня мережа має важливе значення для розміщення об'єктів, тому ділянки з більшою щільністю мережі мають більші бали. Проте, оскільки найбільша щільність доріг у великих містах, для виключення ідентифікації ділянок тільки на території таких міст, значення найбільшої щільності має не найвищий бал.

Щільність доріг ($D_{\text{дор}}$) розраховується за формулою:

$$D_{\text{дор}} = \frac{L_{\text{дор}}}{A},$$

де $L_{\text{дор}}$ – загальна довжина доріг на території.

Рельєф – 7 – виключає низинні території як непридатні та знижує пріоритетність для високогірних вершин, оскільки для розміщення об'єктів на таких висотах висувається багато вимог.

На основі зібраних даних фахівцями Світового центру даних була сформована експертна бальна оцінка показників. Числові діапазони факторів поділено на класи за методом класифікації даних natural breaks (Jenks), Табл. 2.

Карта за кожним фактором після оцінювання трансформується за 10-бальною шкалою придатності території. Згідно зі шкалою найменш придатні ділянки матимуть 1 бал та темночервоний колір, а найбільш придатні 10 балів та темнозелений колір (Рис. 5, 6).

Таблиця 2. Бальна оцінка показників придатності території для розміщення знижувальних електропідстанцій

Фактор	Бали	Фактор	Бали
Наземний покрив – 9		Надзвичайні ситуації – 8	
Вода	1	<200	10
Деревний покрив	5	>500	7
Підтоплена рослинність	2	>1000	5
		>10000	3
Поля	8	>50000	2
Гола земля	8	>200000	2
Урбанізовані території	9	>300000	1
		Густина населення – 9	
Хмари	1	>34,5	2
Сніг	1	34,5–103,5	4
Трав'яний покрив	10	103,5–189,7	6
		189,7–293,2	8
Щільність доріг – 8		Рельєф – 7	
>11,7	1	293,2–517,4	9
>23,27	2	517,4–4398,2	10
>34,83	5	Рельєф – 7	
>46,39	5	0	1
>57,95	6	50	7
>69,52	7	150	10
>81,08	8	300	10
>92,64	9	500	10
>104,2	10	1000	9
>115,76	9	1500	8
Пріоритетні регіони – 10			
Окупована територія: Луганська, окупована частина Донецької Запорізької та Херсонської областей			1
Не окупована частина Донецької, Запорізької та Херсонської областей			2
Харківська			3
Сумська			4
Миколаївська			5
Чернігівська			6
Київ			8
Одеська			9
Київська, Рівненська, Волинська			10

За фактором щільності доріг (Рис. 5, а) територія є тим більш придатною для розміщення знижувальних електропідстанцій, чим вище значення щільності. Найбільш щільна мережа доріг у великих містах та поблизу них, а найменша щільність вздовж кордону.

Під час воєнного конфлікту об'єкти енергетичної інфраструктури стають пріоритетними цілями для обстрілів. Тому при релокації або розміщенні нових об'єктів важливо враховувати частоту обстрілів та відстань від зон активних бойових дій. Аналіз придатності територій за фактором віддаленості від місць надзвичайних ситуацій, спричинених військовими діями (Рис. 5, б), свідчить, що найбільш небезпечними є території вздовж кордону з російською федерацією, окремі райони тимчасово окупованих Донецької, Луганської, Запорізької та Херсонської областей, частина Харківської області, а також великі міста, переважно обласні центри.

Рельєф відіграє суттєву роль у розміщенні об'єктів енергетичної інфраструктури, оскільки значно впливає на їх ефективність та надійність.

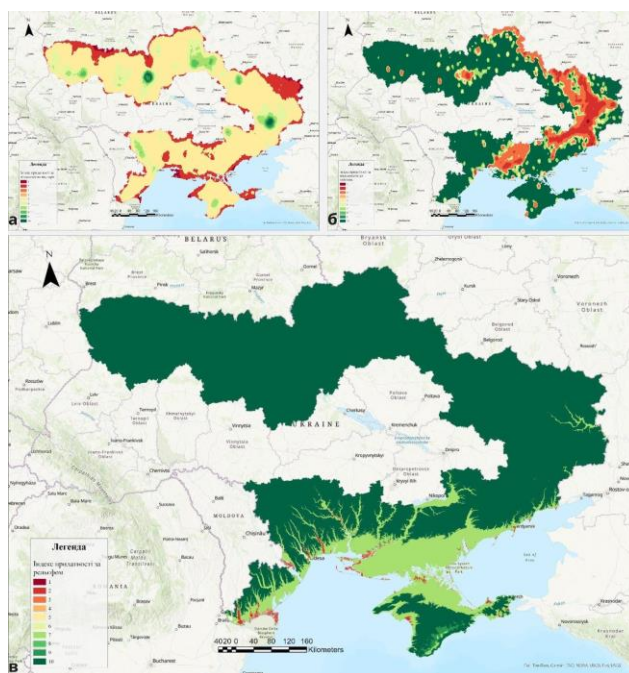


Рис. 5. Індекси факторів впливу на моделювання оптимальних ділянок під розміщення електропідстанцій: індекс придатності за щільністю доріг (а), індекс придатності за віддаленістю від місць надзвичайних ситуацій, спричинених воєнними діями (б), індекс придатності за рельєфом (в)

Важливо враховувати рельєфні особливості (Рис. 5, в) для виключення низинних територій (до 50 м над рівнем моря) та високогірних вершин (понад 1000 м). Низинні землі, переважно долини річок та береги озер, характеризуються високим рівнем ґрунтових вод, що робить їх непридатними для розміщення електропідстанцій через ризик підтоплень та корозії обладнання. Висотні території понад 1000 м можуть бути придатними, однак потребують додаткового технічного оснащення, такого як системи штучного підігріву повітря, що збільшує експлуатаційні витрати.

Отже, з урахуванням рельєфу, більшість територій областей є високопридатними для розміщення об'єктів енергетичної інфраструктури, за винятком низинних частин південних областей та гірських вершин, розташованих на території півострова Крим.

Аналізуючи територію за типом наземного покриття (Рис. 6, а), було визначено, що непридатними є поверхня води, підтоплена рослинність та сніг, деревний покрив є умовно придатним, проте, зважаючи на небезпеку обвалу дерев та пожежі, електропідстанції необхідно розміщувати на відстані. Інші типи наземного покриття мають доволі високу придатність для розміщення електропідстанцій.

Одним із правил розміщення знижувальних електропідстанцій є розміщення таких об'єктів якнайближче до споживача. Відповідно за фактором густоти населення (Рис. 6, б), чим вища густина населення на території, тим більш придатною вона є.

Згідно з картою придатності найбільшу придатність мають території великих міст, переважно обласних центрів.

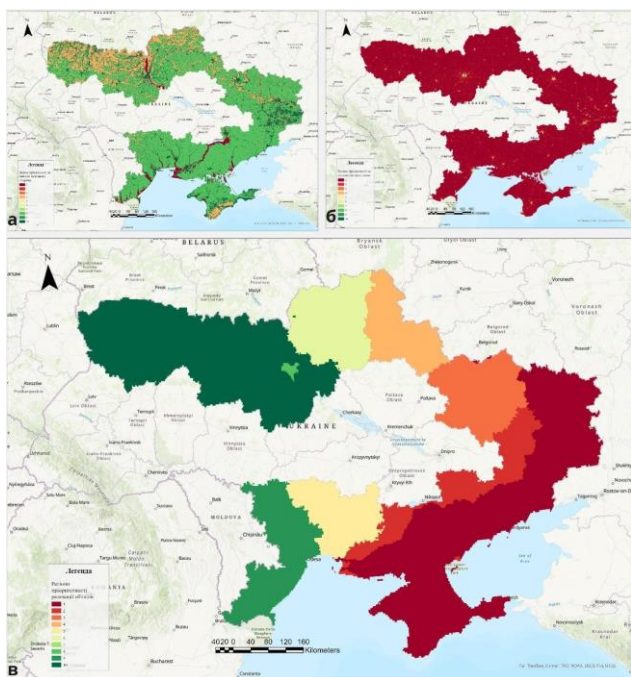


Рис. 6. Індеси факторів впливу на моделювання оптимальних ділянок під розміщення електростанцій: індекс придатності за типом наземного покриття (а), індекс придатності за густиною населення (б), регіони пріоритетності релокації об'єктів енергетичної інфраструктури (в)

Окрім обстрілів та битв важливо враховувати наявний статус території (окупована чи неокупована територія) та наближеність до окупованих територій. За пріоритетністю для релокації об'єктів окуповані регіони, такі як Крим, частини Херсонської, Донецької, Луганської та Запорізької областей є непридатними, неокуповані частини цих областей, Харківська та Сумська області мають низьку придатність. Найбільш придатними є території Волинської, Рівненської, Житомирської та Київської областей (Рис. 6, в).

3.2. Результат оцінювання придатності територій щодо розміщення електростанцій

На основі всіх факторів, їх бальної оцінки та пріоритетності була сформована загальна карта придатності території (Рис. 7). Згідно з картою найбільш придатними для розміщення електростанцій є території Волинської, Рівненської, Житомирської, Київської, Чернігівської та Одеської областей, дещо менш придатними частини територій Сумської, Харківської та Миколаївської областей.

На основі карти придатності були ідентифіковані 60 ділянок для релокації об'єктів енергетичної інфраструктури – знижувальних електростанцій (Рис. 8). З них на території Волинської області – 10 ділянок, Рівненської – 13, Житомирської – 16,

Київської – 10, місто Київ – 2, Чернігівської – 6 та Одеської – 4.

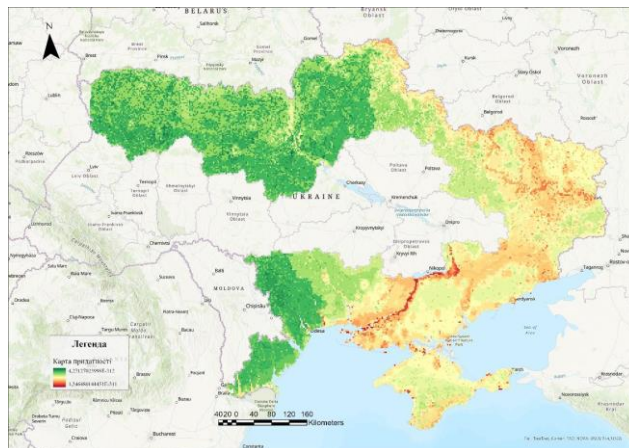


Рис. 7. Карта придатності

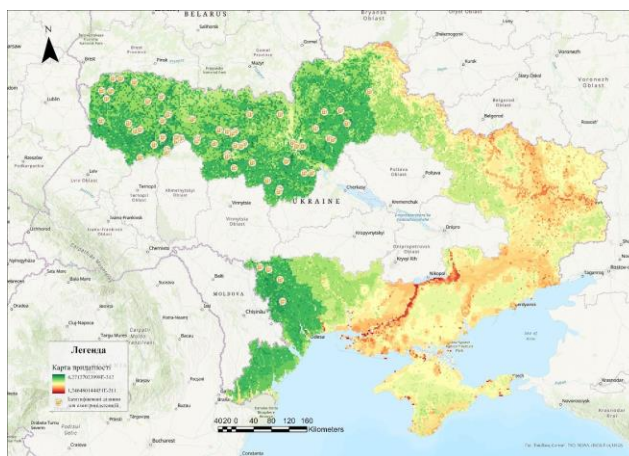


Рис. 8. Ідентифіковані ділянки, придатні для розміщення електростанцій

4. Висновки

У цьому дослідженні викладено комплексне моделювання придатності територій для розміщення промислових об'єктів і релокації енергетичної інфраструктури в Україні в умовах військових загроз. На основі геоінформаційної системи було проведено багатофакторний аналіз, який охоплює такі параметри, як рельєф, транспортна інфраструктура, густина населення, природні умови та безпекові ризики. Результати моделювання дали змогу визначити 50 оптимальних ділянок для промислових об'єктів і 60 ділянок для електростанцій, які відповідають критеріям безпеки, економічної ефективності й доступності. Дослідження підтвердило доцільність розміщення підприємств у віддалених від бойових дій районах з розвинутою транспортною мережею, що забезпечує ефективне постачання ресурсів і захист від атак. Особливу увагу приділено прикордонним областям, які мають стати резервом для критичної інфраструктури, що зменшує ризики її знищення та

підвищує стабільність електропостачання. Крім того, методи дистанційного зондування, штучного інтелекту та аналізу великого обсягу даних дало змогу виявити потенційні локації з урахуванням безпеки, логістичних витрат і доступності ресурсів. Це сприяє адаптації систем енергопостачання до динамічної безпекової ситуації та забезпечує стійкість економіки. Отже, дослідження надає науково обгрунтовані рішення для релокації критичної інфраструктури в умовах воєнних дій, сприяючи стабільності економіки та енергетичної безпеки України.

Author Contributions: Conceptualization, Gapon S. and Pyshnograiev I.; methodology, Gapon S. and Pyshnograiev I.; formal analysis, Gapon S.; investigation, Borovyk K., Gapon S. and Khashchevatska A.; data curation, Borovyk K. and Khashchevatska A.; writing – original draft preparation, Borovyk K. and Khashchevatska A.; writing – review and editing, Gapon S. and Pyshnograiev I.; visualization, Borovyk K. and Khashchevatska A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The study was carried out within the framework of scientific research funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine (state registration number 0123U102015).

Data Availability Statement: The study used open data, which are referenced in the text of the paper.

Acknowledgments: The authors are grateful to the Armed Forces of Ukraine for their service and sacrifice and would like to thank them for the safety of our families and the opportunity to conduct this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Внесок авторів: Концептуалізація – Сергій Гапон та Іван Пишнограєв; методологія – Сергій Гапон та Іван Пишнограєв; формальний аналіз – Сергій Гапон; дослідження – Кароліна Боровик, Сергій Гапон та Аліна Хашчевацька; обробка даних – Кароліна Боровик та Аліна Хашчевацька; написання – підготовка оригінального тексту – Кароліна Боровик та Аліна Хашчевацька; написання – рецензування та редагування – Сергій Гапон та Іван Пишнограєв; візуалізація – Кароліна Боровик та Аліна Хашчевацька. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Дослідження виконане в межах науково-дослідної роботи, що профінансоване МОН України (номер державної реєстрації 0123U102015).

Доступність даних: У дослідженні використані відкриті дані, на які присутні посилання в тексті статті.

Подяки: Автори вдячні Збройним Силам України за їхню службу та самопожертву та хочемо подякувати за безпеку наших сімей та можливість проведення цього дослідження.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Література

Дюпої, А., Нуссбаум, Д., Бутрімас, В., Гранітас, А. (2021). Енергетична безпека в добу гібридних воєн. *NATO review*. Взято з <https://www.nato.int/docu/review/uk/articles/2021/01/13/energetichna-bezpeka-v-dobu-gbridnih-von/index.html>.

Кузніченко, С., Бучанська, І. (2019) Вибір операторів агрегування для багатокритеріальної оцінки придатності

територій. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2(6), 46–56. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2019.6.4656>.

Про затвердження Правил улаштування електроустановок : Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. Взято з <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.

Про організацію захисту та забезпечення безпеки функціонування об'єктів критичної інфраструктури та енергетики України в умовах ведення воєнних дій : Указ Президента України від 17.10.2023 № 695/2023. Взято з <https://www.rnbo.gov.ua/ua/ukazy/6670.html>.

Рікалович, А., Чосич, І., Лазаревич, Дж. (2013). Багатокритеріальний аналіз на основі ГІС для вибору промислового майданчика. *24-й міжнародний симпозіум DAAAM з інтелектуального виробництва та автоматизації*, 1054–1063. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.090>.

Суходоля, О.М. (2015). Проблеми захисту енергетичної інфраструктури в умовах гібридної війни. Взято з <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/problemi-zakhistu-energetichnoi-infrastrukturi-v-umovakh-gibridnoi>.

Gerhard, J., Kresse, W., Danko, D. eds (2022). Geographic Information Systems in Defense. *Springer Handbook of Geographic Information*, 685–705. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53125-625>.

Jiuping, X., Xiaoling, S., Yimin, W., Ziqiang, Z. (2015). GIS-modelling based coal-fired power plant site identification and selection. *Applied Energy*, 159, 520–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.008>.

Majumdar, S., Pani, S. K., Singh, S. K., Garg, L., Pachori, R. B., Zhang X. (2021) The Role of Remote Sensing and GIS in Military Strategy to Prevent Terror Attacks. *Intelligent Data Analytics for Terror Threat Prediction: Architectures, Methodologies, Techniques and Applications*. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119711629.ch4>.

Rabiei-Dastjerdia, H., Zarghanib, S., Hadi Azamib, H., Heydari, A., Janparvarb, M., Jafarib, F. (2021). Spatial distribution of regional infrastructures in the northeast of Iran using GIS and Mic Mac observation (A case of Khorasan Razavi province). *Heliyon*, 7(6), e07119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07119>.

Rustemli, S., Guntas, O., Gokhan, S., Koc, A., Van Wilfried, S., Dogan, S. (2024). Wind power plant site selection problem solution using GIS and resource assessment and analysis of wind energy potential by estimating Weibull distribution function for sustainable energy production: The case of Bitlis/Turkey. *Energy Strategy Reviews*, 56, 101552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101552>.

Sowers, J. L., Weinthal, E., Zawahri, N. (2017) Targeting environmental infrastructures, international law, and civilians in the new Middle Eastern wars. *Security Dialogue*, 48(5), 410–430. DOI: <https://doi.org/10.1177/0967010617716615>.

Srai, J. S., Graham, G., Van Hoek, R., Joglekar, N., Lorentz, H. (2023) Impact pathways: unhooking supply chains from conflict zones – reconfiguration and fragmentation lessons from the Ukraine–Russia war. *International Journal of Operations & Production Management*, 43(13), 289–301. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2022-0529>.

Державний земельний кадастр (2022) Взято з https://e.land.gov.ua/auth_select.

Портал відкритих даних, природно-заповідний фонд (2022) Взято з <https://data.gov.ua/dataset>.

ACLED (2023) Retrieved from <https://acleddata.com/data-export-tool/>.

GHSL (2020) Retrieved from <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php?ds=pop>.

Global Energy Observatory (2024) Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/download-data/>.

HDE (2024) Retrieved from <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-ukr>.

OpenCellID (n.d) Retrieved from <https://opencellid.org/downloads.php>.

OpenTopography High-Resolution Topography Data and Tools (n.d) Retrieved from <https://opentopography.org/>.

OSM (2023) Retrieved from <https://www.openstreetmap.org/#map=10/50.1034/31.3605>.

Sentinel-2 Land Use/Land Cover Time Series (2023). Retrieved from <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d3da5dd386d140cf93fc9ecbf8da5e31>.

SRTM (n.d). Retrieved from <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1>.

References

- Dupuy, A., Nussbaum, D., Butrimas, V., Granitsas, A. (2021). Energy Security in the Age of Hybrid Warfare. *NATO review*. Retrieved from <https://www.nato.int/docu/review/uk/articles/2021/01/13/energetichna-bezpeka-v-dobu-gbridnih-von/index.html>.
- Gerhard, J., Kresse, W., Danko, D. eds (2022). Geographic Information Systems in Defense. *Springer Handbook of Geographic Information*, 685–705. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53125-625>.
- Jiuping, X., Xiaoling, S., Yimin, W., Ziqiang, Z. (2015). GIS-modelling based coal-fired power plant site identification and selection. *Applied Energy*, 159, 520–539. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.008>.
- Kuznichenko, S., Buchynska, I. (2019). Selection of aggregation operators for a multi-criteria evaluation of suitability of territories. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 2(6), 46–56. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2019.6.4656>.
- Majumdar, S., Pani, S. K., Singh, S. K., Garg, L., Pachori, R. B., Zhang X. (2021) The Role of Remote Sensing and GIS in Military Strategy to Prevent Terror Attacks. *Intelligent Data Analytics for Terror Threat Prediction: Architectures, Methodologies, Techniques and Applications*. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119711629.ch4>.
- On Approval of the Rules for Electrical Installations : Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated 21.07.2017 № 476. Retrieved from <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.
- On the organization of protection and security of critical infrastructure and energy facilities of Ukraine in the context of military operations : Decree of the President of Ukraine of 17.10.2023 № 695/2023. Retrieved from <https://www.rnbo.gov.ua/ua/Ukazy/6670.html>.
- Rabiei-Dastjerdia, H., Zarghanib, S., Hadi Azamib, H., Heydari, A., Janparvarb, M., Jafarib, F. (2021). Spatial distribution of regional infrastructures in the northeast of Iran using GIS and Mic Mac observation (A case of Khorasan Razavi province). *Heliyon*, 7(6), e07119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07119>.
- Rikalovych, A., Chosych, I., Lazarevych, D. (2013). GIS based multi-criteria analysis for industrial site selection. *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 1054–1063. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.090>.
- Rustemli, S., Guntas, O., Gokhan, S., Koc, A., Van Wilfried, S., Dogan, S. (2024). Wind power plant site selection problem solution using GIS and resource assessment and analysis of wind energy potential by estimating Weibull distribution function for sustainable energy production: The case of Bitlis/Turkey. *Energy Strategy Reviews*, 56, 101552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101552>.
- Sowers, J. L., Weinthal, E., Zawahri, N. (2017) Targeting environmental infrastructures, international law, and civilians in the new Middle Eastern wars. *Security Dialogue*, 48(5), 410–430. DOI: <https://doi.org/10.1177/0967010617716615>.
- Srai, J. S., Graham, G., Van Hoek, R., Joglekar, N., Lorentz, H. (2023) Impact pathways: unhooking supply chains from conflict zones – reconfiguration and fragmentation lessons from the Ukraine–Russia war. *International Journal of Operations & Production Management*, 43(13), 289–301. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2022-0529>.
- Sukhodolia, O. M. (2015) Problems of protecting energy infrastructure in a hybrid war. Retrieved from <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/problemi-zakhistu-energetichnoi-infrastrukturi-v-umovakh-gybridnoi>.
- ACLED (2023). Retrieved from <https://acleddata.com/data-export-tool/>.
- GHSL (2020). Retrieved from <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php?ds=pop>.
- Global Energy Observatory (2024). Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/download-data/>.
- HDE (2024). Retrieved from <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-ukr>.
- Open data portal, nature reserve fund (2022). Retrieved from <https://data.gov.ua/dataset>.
- OpenCellID (n.d). Retrieved from <https://opencellid.org/downloads.php>.
- OpenTopography High-Resolution Topography Data and Tools (n.d). Retrieved from <https://opentopography.org/>.
- OSM (2023). Retrieved from <https://www.openstreetmap.org/#map=10/50.1034/31.3605>.
- Sentinel-2 Land Use/Land Cover Time Series (2023). Retrieved from <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d3da5dd386d140cf93fc9ecbf8da5e31>.
- SRTM (n.d). Retrieved from <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1>.
- The State Land Cadastre (2022). Retrieved from https://e.land.gov.ua/auth_select.

MODELING THE SUITABILITY OF TERRITORIES FOR THE DEPLOYMENT OF UKRAINE'S CRITICAL INFRASTRUCTURE IN THE FACE OF MILITARY THREATS

K. V. Borovyk, S. V. Gapon, I. O. Pyshnograiev, A. I. Khashchevatska
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

The study included an assessment of the suitability of Ukrainian territories for the location of industrial facilities and relocation of energy infrastructure in border areas and in the context of military operations. A comprehensive GIS model analyzed the territory according to a number of factors that influence the choice of location for important infrastructure. The main factors taken into account were terrain

features (slope, height differences), land cover, accessibility of transport, distance to settlements, and distance from emergencies caused by military operations. The modeling included distance and accessibility analysis, which allowed to assess the proximity of each object to certain infrastructure elements. The result was the general map of suitability, where the most promising areas were those in regions that were far from the combat zone and have developed infrastructure and the necessary conditions for the location of the required industrial centers or energy substations. This approach contributed to economic feasibility, minimizes logistics costs, and guarantees a stable power supply. One of the factors taken into account when modeling priority locations was the use of cadastral plots. It was an important element that ensures location on specific suitable land plots defined by their intended use, rather than in the abstract. It avoided the development of projects outside the context of the intended use and took into account the real capabilities of the territories for effective planning of industrial infrastructure. The proposed model allowed to see non-obvious patterns and identify areas that would not be considered as priorities using classical assessment methods. Based on the model, 50 priority sites for industrial facilities and 60 for power substations were identified that meet the requirements of safety and economic feasibility.

Keywords: GIS, remote sensing, critical infrastructure, military operations, area suitability modeling, relocation, economic resilience.

Рукопис статті отримано 05.12.2024

Надходження остаточної версії: 19.12.2024

Публікація статті: 30.12.2024