МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АГРОБІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Допускається до захисту
Зав. кафедри геодезії, землеустрою
та інженерії безпілотних технологій
_____ к.е.н., доцент Т.М. Сіроштан
«09» листопада 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Кваліфікація: «Магістр геодезії та землеустрою»

Виконав: Куліш Олег Андрійович _____
Керівник: доцент Комарова Н.В. _____
Рецензент: PhD з економіки Тарнавський В.А. _____

Біла Церква 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Агробіотехнологічний факультет

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Затверджую
Гарант ОП «Землеустрій та кадастр»
_____ к.е.н., доцент Камінецька О.В.
«25» вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачу

Кулішу Олегу Андрійовичу

Тема: Сучасний аналіз геопросторових даних для задач сталого розвитку територій.

Затверджено наказом ректора № 496/С від 04.11.2025 р.

Термін здачі студентом готової кваліфікаційної роботи в деканат: до 13.11.2026.

Вихідні дані для кваліфікаційної роботи:

1. Статистичні дані Державної служби статистики України щодо соціально-економічного розвитку регіонів за 2020–2021 рр.

2. Дані Держлісагентства про лісистість і дані про природно-заповідний фонд регіонів.

3. Дані про викиди забруднювальних речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел за регіонами.

4. Нормативно-правові акти України щодо Цілей сталого розвитку та національної інфраструктури геопросторових даних.

5. Наукові праці з інтелектуального та просторового аналізу геопросторових даних.

Перелік питань, що розробляються в роботі:

1. Теоретико-методологічні засади аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку територій.

2. Геопросторовий аналіз сталого розвитку регіонів України.

3. Напрями використання результатів геопросторового аналізу в управлінні сталим розвитком територій.

Календарний план виконання роботи:

Етап виконання	**Дата виконання етапу**	**Відмітка про виконання**
Огляд літератури	Жовтень 2025-вересень 2026	Виконано
Методична частина	Листопад 2025 – травень 2026	Виконано
Дослідницька частина	Червень - вересень 2026	Виконано
Оформлення роботи	Жовтень 2026	Виконано
Перевірка на плагіат	Початок листопада 2026	Виконано
Подання на рецензування	Листопад 2026	Виконано
Попередній розгляд на кафедрі	Листопад 2026	Виконано

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія КОМАРОВА

Здобувач _____ Олег КУЛІШ

Дата отримання завдання 25.10.2025 р.

АНОТАЦІЯ

Куліш Олег Андрійович. Сучасний аналіз геопросторових даних для задач сталого розвитку територій.

Кваліфікаційна робота на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій», кваліфікація «Магістр геодезії та землеустрою». – Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, 2026.

Кваліфікаційна робота присвячена обґрунтуванню методичних засад і практичній апробації сучасних методів аналізу геопросторових даних для оцінки сталого розвитку територій. У першому розділі розкрито концепцію сталого розвитку територій і підходи до його вимірювання, охарактеризовано геопросторові дані, їх моделі та джерела, проаналізовано методи просторової автокореляції, кластеризації, геостатистики та машинного навчання. Сформовано інформаційну базу з восьми показників трьох вимірів сталого розвитку для 22 областей України за 2020–2021 роки та розроблено методику аналізу. Розраховано індекси вимірів, інтегральний індекс сталого розвитку та коефіцієнт гармонійності. Обґрунтовано диференційовані рекомендації для типів регіонів, запропоновано архітектуру геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку та систему показників для адаптації методики до рівня територіальних громад із використанням даних дистанційного зондування Землі.

Кваліфікаційна робота магістра містить 63 сторінок, 18 таблиць, 11 рисунків, список використаних джерел із 55 найменувань.

Ключові слова: геопросторові дані, сталий розвиток, індекс сталого розвитку, просторова автокореляція, індекс Морана, гарячі точки, кластеризація, геоінформаційні системи, регіони України.

ABSTRACT

Kulish Oleh. Modern analysis of geospatial data for sustainable territorial development.

Qualification work for the second (Master's) level of higher education, specialty 193 "Geodesy and Land Management", qualification "Master of Geodesy and Land Management". – Bila Tserkva National Agrarian University, Bila Tserkva, 2026.

The qualification work substantiates the methodological foundations of modern geospatial data analysis for assessing sustainable territorial development and tests these methods in practice. The first chapter describes the concept of sustainable territorial development and approaches to measuring it, characterises geospatial data, their models and sources, and reviews methods of spatial autocorrelation, clustering, geostatistics and machine learning.

In the second chapter, a dataset of eight indicators covering three dimensions of sustainable development is compiled for 22 oblasts of Ukraine for 2020–2021, and an analysis methodology is developed. Dimension indices, an integral sustainable development index and a harmony coefficient are calculated. A negative relationship between the economic and environmental dimensions is found, together with significant spatial autocorrelation of the social and environmental dimensions but not of the integral index. Substantiates differentiated recommendations for each type of region and proposes the architecture of a GIS-based decision support system for sustainable development and a set of indicators for adapting the methodology to the level of territorial communities using remote sensing data.

The Master's qualification work contains 63 pages, 18 tables, 11 figures and a list of 55 references.

Keywords: geospatial data, sustainable development, sustainable development index, spatial autocorrelation, Moran's I, hot spots, clustering, geographic information systems, regions of Ukraine.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ 11
1.1. Концепція сталого розвитку територій та підходи до його вимірювання 11
1.2. Геопросторові дані як об'єкт аналізу: сутність, моделі та джерела 16
1.3. Сучасні методи аналізу геопросторових даних 21
РОЗДІЛ 2 ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ 26
2.1. Інформаційна база та методика дослідження 26
2.2. Оцінка рівня та просторового розподілу сталого розвитку областей України 31
2.3. Кластеризація регіонів та аналіз гарячих точок за складовими сталого розвитку 36
РОЗДІЛ 3 НАПРЯМИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ СТАЛИМ РОЗВИТКОМ ТЕРИТОРІЙ 42
3.1. Обґрунтування диференційованих рекомендацій для типів регіонів 42
3.2. Геоінформаційна система підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку територій 47
3.3. Адаптація методики до рівня територіальних громад та оцінка її ефективності 52
ВИСНОВКИ 56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 59

ВСТУП

Актуальність теми. Сталий розвиток як модель збалансованого поєднання економічного зростання, соціального добробуту та збереження довкілля став базовою парадигмою державної політики більшості країн світу. Ухвалення Генеральною Асамблеєю ООН Порядку денного в галузі сталого розвитку на період до 2030 року і адаптація Цілей сталого розвитку для України Указом Президента України № 722/2019 зумовили потребу в об'єктивних інструментах вимірювання прогресу на рівні країни, регіонів і територіальних громад.

Більшість показників сталого розвитку мають просторову прив'язку: вони характеризують конкретні території з їхніми природними умовами, структурою господарства та системою розселення. Тому ефективне управління сталим розвитком неможливе без аналізу геопросторових даних – інформації про об'єкти та явища, прив'язаної до місця на земній поверхні. Стрімке зростання обсягів таких даних, зумовлене розвитком дистанційного зондування Землі, глобальних навігаційних систем, відкритих державних реєстрів і національних інфраструктур геопросторових даних, вимагає застосування сучасних методів їх обробки: просторової статистики, кластеризації, геостатистики та інтелектуального аналізу.

Для України ця проблема набула особливої гостроти. Регіони країни суттєво різняться за рівнем економічного розвитку, демографічною ситуацією та станом довкілля, а повномасштабна збройна агресія поглибила ці диспропорції та поставила завдання післявоєнного відновлення на засадах сталого розвитку. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки і Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» створили нормативні передумови для використання геопросторових даних в управлінні, проте методичні підходи до комплексного геопросторового аналізу сталого розвитку територій залишаються недостатньо впровадженими в практику. Саме це зумовлює актуальність теми кваліфікаційної роботи.

Теоретико-методологічні засади вимірювання сталого розвитку розроблено в працях М. З. Згуровського та наукової школи Світового центру даних з геоінформатики та сталого розвитку. Методологію інтелектуального аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку обґрунтовано в дисертаційному дослідженні В. В. Путренка. Питання геоінформатики та дистанційного зондування Землі висвітлено в роботах О. О. Світличного, С. В. Плотницького, С. С. Кохана, А. Б. Востокова, формування національної інфраструктури геопросторових даних – Ю. О. Карпінського й А. А. Лященка. Серед зарубіжних учених фундаментальні засади просторового аналізу сформулювали W. Tobler, P. Moran, L. Anselin, A. Getis і J. Ord, методи кластеризації – J. MacQueen, J. Ward, T. Kohonen, геостатистики – G. Matheron, просторового інтелектуального аналізу даних – H. Miller і J. Han.

Водночас потребують подальшого розроблення питання практичного застосування сучасних методів просторової статистики для оцінки сталого розвитку регіонів України з урахуванням актуальних статистичних даних, виявлення просторових закономірностей у розподілі його складових та використання отриманих результатів для обґрунтування управлінських рішень.

Мета та завдання дослідження. Мета кваліфікаційної роботи полягає в обґрунтуванні методичних засад і практичній апробації сучасних методів аналізу геопросторових даних для оцінки сталого розвитку територій та формуванні рекомендацій щодо використання отриманих результатів в управлінні.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

– розкрити сутність концепції сталого розвитку територій і підходи до його вимірювання;

– охарактеризувати геопросторові дані як об'єкт аналізу, їх моделі та джерела;

– проаналізувати сучасні методи аналізу геопросторових даних;

– сформувати інформаційну базу та методику геопросторового аналізу сталого розвитку регіонів України;

– оцінити рівень і просторовий розподіл сталого розвитку областей України;

– здійснити кластеризацію регіонів та аналіз гарячих точок за складовими сталого розвитку;

– обґрунтувати диференційовані рекомендації для виділених типів регіонів;

– запропонувати структуру геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку;

– визначити напрями адаптації методики до рівня територіальних громад та оцінити її ефективність.

Об'єктом дослідження є процеси сталого розвитку територій та їх просторова диференціація (на прикладі областей України).

Предметом дослідження є методи та інструменти аналізу геопросторових даних для оцінки сталого розвитку територій.

Методи дослідження. У роботі використано: абстрактно-логічний і монографічний методи – для узагальнення теоретичних положень; метод побудови композитних індексів з мінімаксною нормалізацією – для оцінки сталого розвитку; методи просторової автокореляції (глобальний індекс Морана, локальна статистика Getis-Ord Gi*) – для виявлення просторових закономірностей; метод k-середніх із критерієм силуету – для кластеризації регіонів; картографічний і графічний методи – для візуалізації результатів; системний підхід – для проєктування геоінформаційної системи підтримки рішень. Розрахунки виконано з використанням мови програмування Python.

Інформаційною базою дослідження є дані Державної служби статистики України, Держлісагентства, нормативно-правові акти України та ЄС, документи ООН, наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

– удосконалено методичний підхід до інтегральної оцінки сталого розвитку регіонів на основі восьми показників економічного, соціального та

екологічного вимірів за даними 2020–2021 рр. з обчисленням коефіцієнта гармонійності розвитку;

– встановлено, що для обраного набору показників за відсутності значущої просторової автокореляції інтегрального індексу його соціальна та екологічна складові мають статистично значущу позитивну просторову автокореляцію, що свідчить про компенсаційний характер просторової структури сталого розвитку України;

– дістала подальшого розвитку типологія регіонів України за складовими сталого розвитку на основі кластеризації методом k-середніх і аналізу гарячих точок.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання методики та отриманих результатів органами державної влади та місцевого самоврядування під час розроблення стратегій регіонального розвитку, планів відновлення та моніторингу досягнення Цілей сталого розвитку.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків і списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ

1.1. Концепція сталого розвитку територій та підходи до його вимірювання

Ідея сталого розвитку сформувалася в другій половині XX століття як відповідь на загострення суперечностей між економічним зростанням, станом природного середовища та соціальними потребами людства. Поворотним моментом стала доповідь Міжнародної комісії з навколишнього середовища та розвитку «Наше спільне майбутнє» (1987 р.), підготовлена під керівництвом Г. Х. Брундтланд. У ній сталий розвиток визначено як розвиток, що задовольняє потреби теперішнього покоління без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти власні потреби [9]. Подальше становлення концепції пов'язане з Конференцією ООН з навколишнього середовища і розвитку в Ріо-де-Жанейро (1992 р.), Всесвітнім самітом зі сталого розвитку в Йоганнесбурзі (2002 р.) та Декларацією тисячоліття ООН (2000 р.), що визначила Цілі розвитку тисячоліття на період до 2015 року [1, 33].

У 2015 році Генеральна Асамблея ООН ухвалила резолюцію «Перетворення нашого світу: Порядок денний у галузі сталого розвитку на період до 2030 року», яка містить 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР) і 169 завдань [8]. Цілі охоплюють подолання бідності та голоду, забезпечення здоров'я та якісної освіти, гендерну рівність, доступ до чистої води та енергії, гідну працю й економічне зростання, розвиток інфраструктури, скорочення нерівності, сталі міста та громади, відповідальне споживання, боротьбу зі зміною клімату, збереження морських і наземних екосистем, мир і справедливість, а також партнерство заради сталого розвитку. Важливо, що значна частина ЦСР має виражений територіальний вимір: ціль 11 безпосередньо стосується міст і населених пунктів, а цілі 6, 13, 14 і 15 – стану природних систем конкретних територій.

Україна приєдналася до глобального процесу забезпечення сталого розвитку та адаптувала ЦСР з урахуванням національної специфіки. За результатами інклюзивного процесу було підготовлено національну доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» (2017 р.), що визначила національні завдання та індикатори їх моніторингу [14, 18]. Указом Президента України від 30.09.2019 № 722/2019 ЦСР затверджено як орієнтири для розроблення прогнозних і програмних документів, проєктів нормативно-правових актів з метою забезпечення збалансованості економічного, соціального та екологічного вимірів сталого розвитку [2, 33]. У 2020 році Україна представила перший Добровільний національний огляд щодо досягнення ЦСР [15]. На регіональному рівні засади сталого розвитку інтегровано в Державну стратегію регіонального розвитку на 2021–2027 роки [3, 19] та Закон України «Про засади державної регіональної політики» [7, 23].

Поняття сталий розвиток території в науковій літературі трактують як процес збалансованої зміни економічної, соціальної та екологічної підсистем певної території, за якого зростання добробуту населення досягається без перевищення природно-ресурсного потенціалу та асиміляційної здатності довкілля. О. І. Шаблій розглядає територію як суспільно-географічний комплекс, у якому взаємодіють населення, господарство та природне середовище [24, 40]. Звідси випливає, що сталий розвиток території не може бути зведений до жодного окремого показника: він потребує комплексного, багатовимірного підходу до оцінювання.

Традиційно виокремлюють три виміри сталого розвитку – економічний, соціальний та екологічний (рис. 1.1). Економічний вимір відображає ефективність використання ресурсів, рівень продуктивності та інвестиційної активності. Соціальний – якість життя населення, демографічну ситуацію, зайнятість, доступ до освіти та охорони здоров'я. Екологічний – стан природних систем, рівень антропогенного навантаження та збереженість біорізноманіття. До цих трьох вимірів часто додають інституційний, що характеризує якість

управління та участь громадськості. Сталий розвиток досягається у зоні перетину всіх вимірів, тобто за умови їх збалансованості.

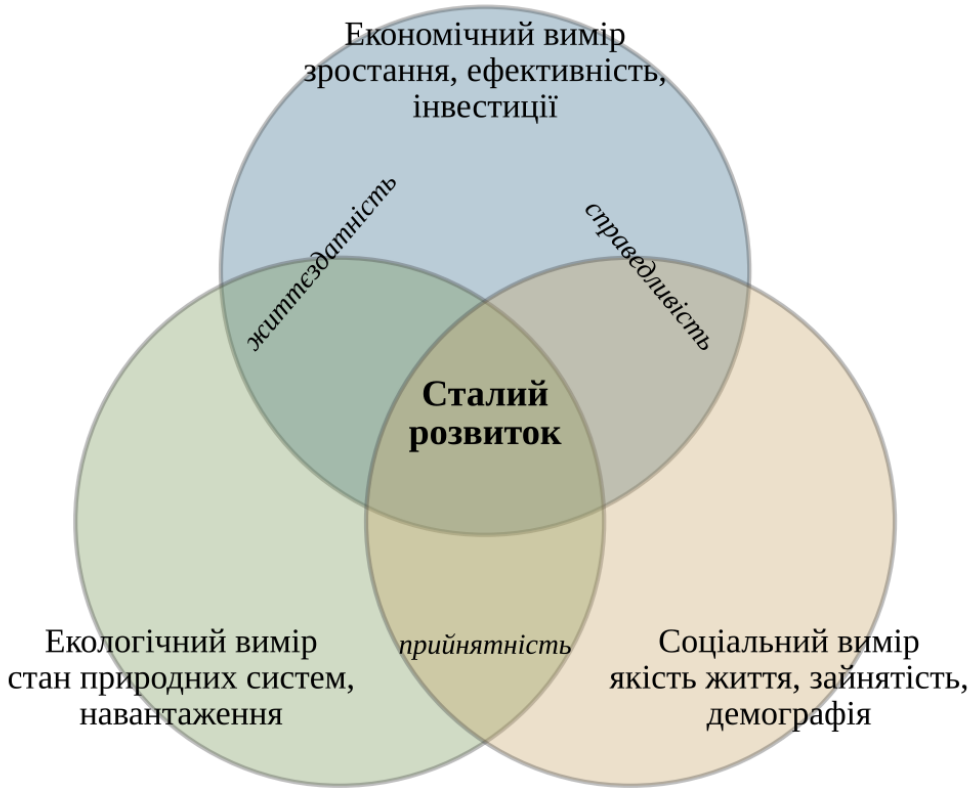


Рис. 1.1. Виміри сталого розвитку території та їх взаємозв'язок
Джерело: розроблено автором за [1; 9; 13].

Ключовою проблемою практичного застосування концепції є її вимірювання. У світовій практиці сформувалося кілька підходів до оцінки сталого розвитку. Перший – система окремих індикаторів, згрупованих за тематичними блоками (наприклад, глобальна система індикаторів ЦСР ООН). Другий – агреговані (композитні) індекси, які зводять множину показників до одного або кількох узагальнених значень. Третій – індикатори «нарощеного» багатства та екологічного сліду, що оцінюють сталість через баланс капіталів або навантаження на біосферу. Методичні засади побудови композитних індикаторів узагальнено в настанові ОЕСР та Спільного дослідницького центру Європейської комісії, яка визначає послідовність етапів: формування

теоретичної рамки, відбір показників, обробка пропусків, нормалізація, зважування й агрегування, аналіз чутливості та візуалізація [12].

В Україні найбільш розвиненою є методика, запропонована науковою школою М. З. Згуровського. Відповідно до неї індекс сталого розвитку обчислюється на основі трьох вимірів – економічного, екологічного та соціально-інституційного, – а також ступеня гармонійності розвитку, що відображає рівновіддаленість значень вимірів від ідеального стану [13]. В. В. Путренко розвинув цей підхід, доповнивши його методами інтелектуального аналізу геопросторових даних – кластеризацією, аналізом гарячих точок, нейронними мережами та геостатистичним моделюванням, що дало змогу перейти від простого рейтингування регіонів до виявлення просторових закономірностей і типізації територій [1]. Основні підходи до вимірювання сталого розвитку узагальнено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика підходів до вимірювання сталого розвитку територій

Підхід	Сутність	Переваги	Обмеження
Система окремих індикаторів (ЦСР ООН, національні індикатори)	Набір показників за цілями та завданнями	Повнота, відповідність міжнародним зобов'язанням	Складність узагальнення, відсутність інтегральної оцінки
Композитні індекси (методика ОЕСР–JRC)	Агрегування нормалізованих показників у єдиний індекс	Наочність, можливість рейтингування та порівняння	Залежність від вибору ваг і методу нормалізації
Індекс сталого розвитку М. З. Згуровського	Індекси трьох вимірів і ступінь гармонійності	Врахування збалансованості вимірів	Потреба у великій кількості вихідних даних
Геопросторовий інтелектуальний аналіз (В. В. Путренко)	Поєднання індексів із кластеризацією, аналізом гарячих точок, геостатистикою	Виявлення просторових закономірностей, типізація територій	Вимоги до кваліфікації аналітика та програмного забезпечення

Джерело: узагальнено автором за [1; 8; 12; 13].

Під час побудови композитних індексів сталого розвитку необхідно вирішити кілька методичних питань. Першим є вибір показників, які мають бути релевантними, доступними для всіх територіальних одиниць,

порівнянними в часі та мінімально корельованими між собою. Другим – нормалізація, тобто приведення показників з різними одиницями виміру до безрозмірної шкали. Найпоширенішим є мінімаксний метод, за якого для стимуляторів (показників, зростання яких свідчить про поліпшення стану) застосовують формулу:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - x_j\,\min) / (x_j\,\max - x_j\,\min), \quad (1.1)$$

а для дестимуляторів (показників, зростання яких свідчить про погіршення):

$$x_{ij}' = (x_j\,\max - x_{ij}) / (x_j\,\max - x_j\,\min), \quad (1.2)$$

де x_{ij} – значення j-го показника для і-ї території;

$x_j\,\min$, $x_j\,\max$ – мінімальне та максимальне значення j-го показника серед усіх територій.

Третім питанням є зважування та агрегування. За відсутності обґрунтованих експертних ваг найчастіше застосовують рівні ваги показників у межах виміру та рівні ваги вимірів у загальному індексі. Агрегування може бути адитивним (середнє арифметичне) або мультиплікативним (середнє геометричне), причому останнє обмежує можливість компенсації низьких значень одного виміру високими значеннями іншого [12].

Важливим аспектом є врахування збалансованості розвитку. Регіон з високим економічним, але низьким екологічним виміром може мати таке саме значення середнього індексу, як і регіон із середніми значеннями всіх вимірів, хоча за змістом їхній розвиток принципово відрізняється. Для врахування цієї особливості використовують коефіцієнт гармонійності, який тим вищий, чим ближчими між собою є значення вимірів:

$$H = 1 - \sigma / \mu, \quad (1.3)$$

де σ – стандартне відхилення індексів вимірів для території;

μ – середнє значення індексів вимірів.

Окремою методичною проблемою є просторова природа показників сталого розвитку. Значення індексу для конкретної території не є незалежним від значень сусідніх територій: регіони обмінюються ресурсами, людьми,

капіталом, забрудненням. Відповідно до першого закону географії В. Тоблера, усе пов'язане з усім, але близькі об'єкти пов'язані сильніше, ніж віддалені [20]. Тому аналіз сталого розвитку має враховувати просторові взаємозв'язки, а це можливо лише з використанням методів аналізу геопросторових даних.

Отже, концепція сталого розвитку територій передбачає збалансоване поєднання економічного, соціального та екологічного вимірів, а її практичне застосування потребує надійних інструментів вимірювання. Сучасні підходи поєднують побудову композитних індексів із методами геопросторового аналізу, що дає змогу не лише оцінити рівень розвитку, а й виявити просторові закономірності та обґрунтувати диференційовані управлінські рішення.

1.2. Геопросторові дані як об'єкт аналізу: сутність, моделі та джерела

Будь-яке явище, що характеризує розвиток території, відбувається в конкретному місці. Така обставина зумовлює особливий статус інформації про місцеположення в аналізі сталого розвитку. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» визначає геопросторові дані як дані про об'єкти, явища, процеси, що прямо або опосередковано містять інформацію про їх місцезнаходження відносно земної поверхні [4]. Відповідно до цього закону метадані – це дані, що описують зміст, формат, просторові та часові характеристики, якість, умови доступу та інші характеристики геопросторових даних, а набір геопросторових даних – ідентифікована сукупність таких даних.

В. В. Путренко розглядає геопростір як частину фізичного простору, обмежену географічною оболонкою Землі та діапазоном вимірів, характерних для географічних задач [1]. Геопросторовий об'єкт описується трьома групами характеристик: просторовими (координати, форма, розмір, топологічні відношення з іншими об'єктами), атрибутивними (якісні та кількісні властивості) та часовими (момент або період існування, динаміка змін). Саме поєднання цих трьох компонентів відрізняє геопросторові дані від звичайних статистичних і створює як нові можливості аналізу, так і специфічні проблеми.

Специфіка геопросторових даних проявляється в кількох властивостях. Першою є просторова автокореляція – тенденція близьких об'єктів мати подібні значення характеристик, що порушує припущення класичної статистики про незалежність спостережень. Другою – просторова неоднорідність (гетерогенність): зв'язки між змінними можуть суттєво відрізнятися в різних частинах території. Третьою – проблема модифікованої площинної одиниці (MAUP), яка полягає в тому, що результати аналізу залежать від масштабу та способу агрегування даних за територіальними одиницями [35]. Четвертою – залежність від масштабу та роздільної здатності. Такі властивості необхідно враховувати під час вибору методів аналізу.

Для подання геопросторових даних у геоінформаційних системах використовують дві основні моделі (рис. 1.2). Векторна модель описує об'єкти точками, лініями та полігонами з координатами вершин; вона придатна для дискретних об'єктів з чіткими межами – адміністративних одиниць, земельних ділянок, доріг, населених пунктів. Растрова модель подає простір у вигляді регулярної сітки комірок (пікселів), кожна з яких містить значення характеристики; вона придатна для неперервних явищ – рельєфу, температури, вегетаційних індексів, концентрацій забруднювачів [16; 17; 53]. Крім того, використовують моделі TIN (нерегулярна тріангуляційна мережа) для поверхонь, мережеві моделі для транспортних і інженерних систем, а також просторово-часові моделі (зокрема просторово-часовий куб), що поєднують просторові координати з часовою віссю [1].

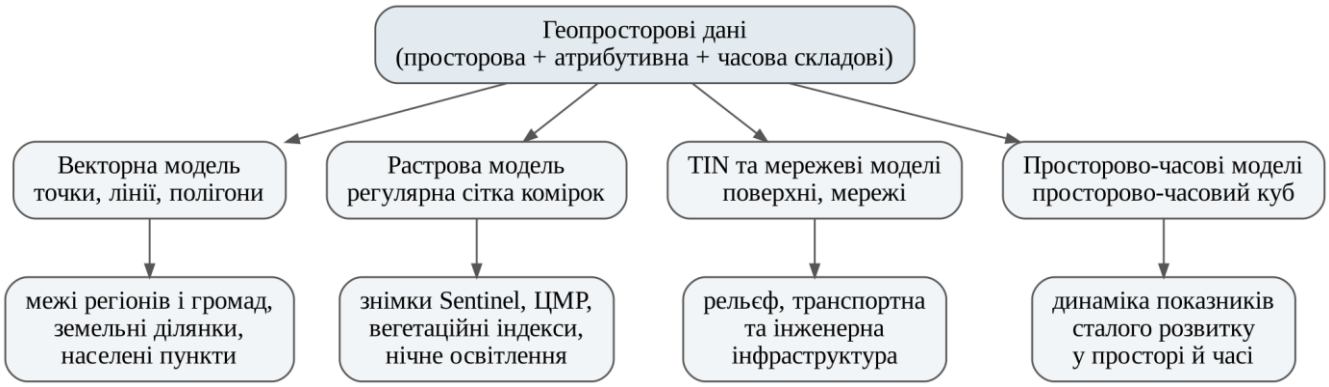


Рис. 1.2. Моделі подання геопросторових даних та їх застосування в аналізі сталого розвитку

Джерело: розроблено автором за [1; 16; 17].

Джерела геопросторових даних для аналізу сталого розвитку можна поділити на кілька груп (табл. 1.2). Перша група – офіційна статистика, що надає показники соціально-економічного розвитку в розрізі адміністративно-територіальних одиниць. Її перевагою є методологічна узгодженість і регулярність, а недоліком – агрегований характер і прив'язка до адміністративних меж. Друга група – державні реєстри та кадастри, зокрема Державний земельний кадастр, що містить відомості про земельні ділянки, їх межі, цільове призначення та обмеження [5]. Третя група – дані дистанційного зондування Землі. Програма Copernicus Європейського Союзу забезпечує відкритий доступ до даних супутників Sentinel: Sentinel-2 отримує мультиспектральні знімки з роздільністю 10–60 м з періодичністю повторного знімання близько 5 днів [32], а Sentinel-1 – радарні дані, незалежні від хмарності. Окреме значення для оцінки економічної активності мають дані нічного освітлення VIIRS [36]. Четверта група – добровільна географічна інформація (VGI), зокрема OpenStreetMap, яку М. Гудчайлд охарактеризував концепцією «громадян як сенсорів» [30]. П'ята група – дані з мобільних пристроїв, соціальних мереж і «інтернету речей», що формують так звані великі геопросторові дані.

Таблиця 1.2

Основні джерела геопросторових даних для аналізу сталого розвитку територій

Група джерел	Приклади	Просторова деталізація	Періодичність оновлення
Офіційна статистика	Держстат, головні управління статистики в областях	Регіони, райони, громади	Щорічно, щокварталь но
Державні реєстри та кадастри	Державний земельний кадастр, реєстр речових прав, містобудівний кадастр	Земельні ділянки, об'єкти нерухомості	Безперервн о
Дистанційне зондування Землі	Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat, VIIRS, комерційні знімки високої роздільності	Від 0,3 м до сотень метрів	Від щоденної до щомісячної
Добровільна географічна інформація	OpenStreetMap, краудсорсингові платформи	Окремі об'єкти	Безперервн о
Великі дані	Дані мобільних операторів, соціальних мереж, сенсорних мереж	Точкові дані	У режимі реального часу
Інфраструктури геопросторових даних	Геопортал НІГД, INSPIRE, тематичні геопортали	Залежно від набору	Залежно від набору

Джерело: узагальнено автором за [1; 4; 5; 30; 32; 36].

Ефективне використання геопросторових даних різних джерел потребує їх інтеграції, що забезпечується інфраструктурами геопросторових даних. У Європейському Союзі з 2007 року діє Директива INSPIRE, яка встановлює загальні правила створення інфраструктури просторової інформації, визначає 34 теми просторових даних, вимоги до метаданих, сервісів пошуку, перегляду та завантаження даних [10]. Комітет експертів ООН з глобального управління геопросторовою інформацією (UN-GGIM) разом зі Світовим банком розробив Інтегровану рамку геопросторової інформації (IGIF), що розглядає геопросторову інформацію як національний ресурс для досягнення ЦСР і визначає дев'ять стратегічних напрямів її розвитку: управління, політика та право, фінансування, дані, інновації, стандарти, партнерство, кадровий потенціал, комунікація [11].

В Україні правові засади національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) визначено Законом № 554-IX [4], а порядок її функціонування – постановою Кабінету Міністрів України від 26.05.2021 № 532 [49]. Закон визначає суб'єктів НІГД (держателі та користувачі геопросторових даних), базові та профільні геопросторові дані, вимоги до метаданих і сервісів, а також національний геопортал як центральний вузол доступу. Формування НІГД в Україні обґрунтовували Ю. О. Карпінський і А. А. Лященко, які наголошували на необхідності єдиної системи координат, стандартизації та розмежування базових і тематичних даних [39]. Важливим елементом є також державна геодезична референцна система координат УСК-2000 і правове регулювання топографо-геодезичної діяльності [6].

Якість геопросторових даних визначається їх повнотою, логічною узгодженістю, позиційною, часовою та тематичною точністю. Для аналізу сталого розвитку критично важливими є порівнянність даних у просторі (однакова методика для всіх територіальних одиниць) і в часі (незмінність методики між роками), а також актуальність. В умовах воєнного стану доступ до частини геопросторових даних обмежено з міркувань безпеки, а статистичні дані з 2022 року публікуються в скороченому обсязі, що необхідно враховувати під час формування інформаційної бази аналізу.

Для аналізу сталого розвитку принципове значення має узгодження різних джерел за просторовою основою. Статистичні показники прив'язані до адміністративно-територіальних одиниць, дані дистанційного зондування Землі – до регулярної сітки пікселів, а дані реєстрів – до окремих об'єктів. Їх поєднання потребує операцій просторового агрегування (зональної статистики) та дезагрегування, під час яких необхідно враховувати проблему модифікованої площинної одиниці: одні й ті самі вихідні дані, агреговані за областями чи громадами, можуть давати різні значення показників просторової автокореляції та різні результати кластеризації [35]. Тому під час проєктування аналізу необхідно обґрунтовано обирати рівень територіальних одиниць відповідно до управлінського завдання.

Важливою умовою інтеграції даних є використання єдиної системи координат і стандартизованих метаданих. В Україні державною геодезичною референцною системою координат є УСК-2000, а для зберігання та обміну геопросторовими даними рекомендовано використовувати відкриті стандарти Відкритого геопросторового консорціуму, зокрема формат GeoPackage [52]. Відкриті набори даних державних органів публікуються на Єдиному державному веб-порталі відкритих даних, проте частина з них не містить геометрії і потребує геокодування – прив'язки до територіальних одиниць за кодами КАТОТТГ або адресами. Таким чином, етап підготовки даних, що включає перевірку, узгодження та геокодування, часто займає більшу частину часу дослідження, ніж власне аналіз.

Отже, геопросторові дані є особливим об'єктом аналізу, що поєднує просторову, атрибутивну та часову складові й характеризується просторовою автокореляцією, неоднорідністю та залежністю від масштабу. Для аналізу сталого розвитку використовують різноманітні джерела – від офіційної статистики до супутникових знімків і добровільної географічної інформації, інтеграцію яких забезпечують інфраструктури геопросторових даних.

1.3. Сучасні методи аналізу геопросторових даних

Аналіз геопросторових даних охоплює широкий спектр методів – від простих операцій накладання шарів і вибірки до складних статистичних і машинних алгоритмів. Для задач сталого розвитку найбільш значущими є чотири групи методів: просторова статистика (методи аналізу просторової автокореляції), методи кластеризації та регіоналізації, геостатистичні методи інтерполяції та методи інтелектуального аналізу на основі машинного навчання [1; 33]. Їх класифікацію подано на рис. 1.3.

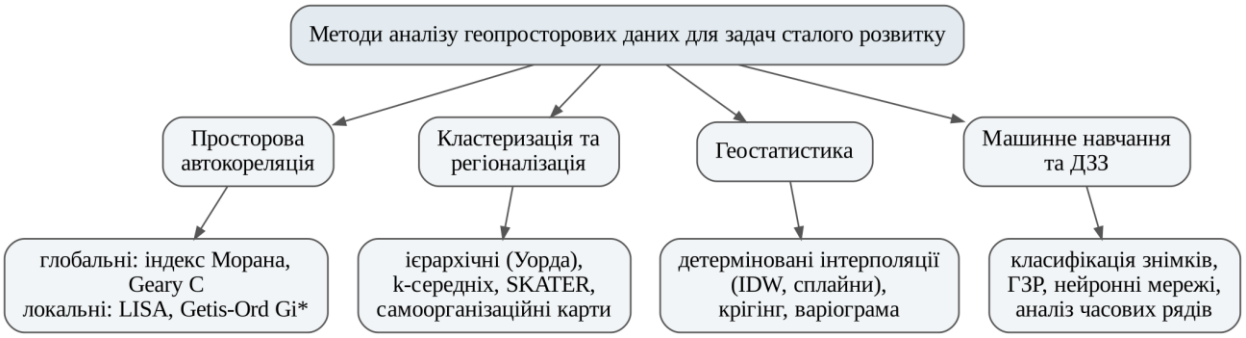


Рис. 1.3. Класифікація сучасних методів аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку

Джерело: розроблено автором за [1; 16; 33].

Методи просторової автокореляції дають змогу встановити, чи є розподіл значень певного показника на території випадковим, чи утворює певні закономірності. Найпоширенішим глобальним показником є індекс Морана, запропонований П. Мораном у 1950 році [21]:

$$I = (n / S_0) \times \Sigma_i \Sigma_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \Sigma_i (x_i - \bar{x})^2, \qquad (1.4)$$

де n – кількість територіальних одиниць;

w_{ij} – елемент матриці просторових ваг;

S_0 – сума всіх елементів матриці ваг;

$\bar{x}$ – середнє значення показника.

Позитивні значення індексу свідчать про кластеризацію подібних значень (високі поруч із високими, низькі поруч із низькими), від'ємні – про чергування, а значення, близькі до математичного сподівання –1/(n–1), – про випадковий розподіл. Статистичну значущість індексу оцінюють за нормальним наближенням або методом перестановок (Монте-Карло), за якого значення показника випадково перемішуються між територіями багато разів і обчислюється частка випадків, коли випадковий індекс перевищує фактичний.

Ключовим елементом методів просторової автокореляції є матриця просторових ваг W, яка формалізує уявлення про сусідство. Найчастіше використовують матриці суміжності – «ферзеву» (сусідами вважаються території зі спільною межею або вершиною) або «ладейну» (лише зі спільною межею), а також матриці, засновані на відстані між центроїдами або на k найближчих сусідах. В. В. Путренко окремо розглядає питання отримання,

зберігання та використання матриці суміжності як основи методів автоматичного районування [1].

Статистика Gi* має характер z-оцінки: значення понад 1,96 свідчать про статистично значущу (на рівні 95 %) «гарячу точку» – концентрацію високих значень, а значення менше –1,96 – про «холодну точку». Аналіз гарячих точок широко застосовується для виявлення зон підвищеного ризику, концентрації бідності, забруднення, а також для оцінки просторової нерівності розвитку [1].

Методи кластеризації призначені для поділу множини об'єктів на групи (кластери) так, щоб об'єкти в межах групи були максимально подібними, а групи – максимально відмінними. Ієрархічні методи послідовно об'єднують або розділяють об'єкти та подають результат у вигляді дендрограми; серед них найпоширенішим є метод Уорда, що мінімізує приріст внутрішньогрупової дисперсії [26]. Неієрархічні методи, зокрема метод k-середніх Дж. МакКвіна [25], ітераційно розподіляють об'єкти між заданою кількістю кластерів, мінімізуючи суму квадратів відстаней до центрів. Для вибору оптимальної кількості кластерів застосовують метод «ліктя» (аналіз зміни суми квадратів відхилень) та коефіцієнт силуету П. Руссеу [27]. Самоорганізаційні карти Т. Кохонена – різновид нейронних мереж без учителя – дають змогу візуалізувати багатовимірні дані на двовимірній сітці та виявляти нелінійні закономірності [28]. Для геопросторових задач важливою є регіоналізація – кластеризація з умовою просторової суміжності, за якої кластери утворюють компактні території. В. В. Путренко показав, що включення координат центроїдів регіонів як додаткових ознак дає змогу отримати географічно компактні кластери, придатні для районування [1].

Геостатистичні методи використовують для моделювання неперервних просторових явищ за даними точкових спостережень. Основи геостатистики заклав Ж. Матерон, увівши поняття регіоналізованої змінної та варіограми [29]. Детерміновані методи інтерполяції (обернених зважених відстаней, сплайнів, природних сусідів) обчислюють значення в невідомих точках за заданою функцією, тоді як геостатистичні методи (крігінг) враховують просторову

структуру даних, описану варіограмою, і дають змогу оцінити похибку інтерполяції [55]. Для задач сталого розвитку геостатистика застосовується під час картографування забруднення ґрунтів і повітря, показників родючості, кліматичних характеристик [1].

Методи інтелектуального аналізу та машинного навчання набули стрімкого розвитку завдяки зростанню обчислювальних потужностей і обсягів даних. До них належать класифікація знімків дистанційного зондування методами випадкового лісу, опорних векторів і згорткових нейронних мереж, географічно зважена регресія для аналізу просторово змінних зв'язків [34], методи виявлення змін і аналізу часових рядів. Хмарні платформи, зокрема Google Earth Engine, забезпечують обробку петабайтних архівів супутникових даних без необхідності їх завантаження [31]. Програмну реалізацію методів просторової статистики забезпечують спеціалізовані продукти – GeoDa [37], бібліотека PySAL мови Python [38], пакети мови R [54], а також модулі настільних ГІС, зокрема QGIS [51].

Порівняльну характеристику основних методів аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку наведено в таблиці 1.3. Сучасний аналіз геопросторових даних для задач сталого розвитку має будуватися як послідовний процес: формування інформаційної бази та перевірка якості даних; побудова композитних індексів; дослідження просторової автокореляції; виявлення локальних кластерів і гарячих точок; типізація територій; інтерпретація результатів і формування рекомендацій. Саме така послідовність реалізована в другому розділі роботи.

Отже, сучасні методи аналізу геопросторових даних дають змогу перейти від простого рейтингування територій до виявлення просторових закономірностей, типізації регіонів і моделювання розвитку. Поєднання методів просторової автокореляції та кластеризації з композитними індексами сталого розвитку є ефективним інструментом обґрунтування управлінських рішень у сфері регіональної політики.

Таблиця 1.3

Характеристика методів аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку

Група методів	Основні методи	Задачі сталого розвитку	Програмні засоби
Просторова автокореляція	Індекс Морана, LISA, Getis-Ord Gi*	Виявлення просторової нерівності, зон концентрації проблем	GeoDa, PySAL, ArcGIS, QGIS
Кластеризація та регіоналізація	k-середніх, Уорда, SKATER, самоорганізаційні карти	Типізація регіонів, районування	Python, R, ArcGIS
Геостатистика	Обернених зважених відстаней, крігінг	Картографування забруднення, природних характеристик	R (gstat), ArcGIS Geostatistical Analyst
Регресійний аналіз	Просторова регресія, географічно зважена регресія	Аналіз чинників розвитку	GeoDa, R, Python
Машинне навчання та ДЗЗ	Випадковий ліс, нейронні мережі, аналіз часових рядів	Моніторинг землекористування, лісів, урбанізації	Google Earth Engine, Python

Джерело: узагальнено автором за [1; 31; 33; 34; 37; 38; 54].

РОЗДІЛ 2 ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

2.1. Інформаційна база та методика дослідження

Практична апробація методів аналізу геопросторових даних виконана на прикладі областей України. Вибір регіонального рівня зумовлений наявністю порівнянних статистичних даних для всіх областей, а також тим, що саме області є основним об'єктом державної регіональної політики [3; 7]. Об'єктом аналізу обрано 22 області. Донецьку та Луганську області виключено з аналізу, оскільки через тимчасову окупацію частини їх територій органи статистики не публікують для них валовий регіональний продукт, а інші показники є неповними. Не включено також Автономну Республіку Крим, м. Севастополь і м. Київ: перші дві – через відсутність даних, а м. Київ – через те, що як місто з особливим статусом воно суттєво відрізняється від областей за структурою показників і спотворювало б результати нормалізації.

Як базовий період обрано 2021 рік – останній рік перед повномасштабним вторгненням, для якого опубліковано повний набір регіональних статистичних показників. Використання цього періоду дає змогу оцінити «довоєнну» просторову структуру сталого розвитку, яка є відправною точкою для планування післявоєнного відновлення.

Відбір показників здійснено з урахуванням таких критеріїв: відповідність трьом вимірам сталого розвитку; наявність порівнянних даних для всіх 22 областей; однозначність інтерпретації (чіткий поділ на стимулятори та дестимулятори); відповідність цілям сталого розвитку. У результаті сформовано систему з восьми показників (табл. 2.1). Капітальні інвестиції на одну особу розраховано як відношення обсягу капітальних інвестицій у 2020 році до чисельності населення на 1 січня 2021 року, а природний приріст на 1000 осіб – як відношення абсолютного природного приросту (скорочення) у 2021 році до чисельності населення на початок року [43; 45].

Таблиця 2.1

Система показників для оцінки сталого розвитку областей України

Вимір	Показник	Одиниця	Тип	Відповідність ЦСР	Джерело
Економічний	ВРП у розрахунку на одну особу, 2021 р.	грн	стимулятор	8	[42]
Економічний	Середньомісячна номінальна заробітна плата, 2021 р.	грн	стимулятор	8	[44]
Економічний	Капітальні інвестиції на одну особу, 2020 р.	тис. грн	стимулятор	9	[43; 45]
Соціальний	Рівень безробіття (за методологією МОП), 2021 р.	%	дестимулятор	8	[44]
Соціальний	Природний приріст (скорочення) населення, 2021 р.	на 1000 осіб	стимулятор	3	[43]
Екологічний	Лісистість території	%	стимулятор	15	[48]
Екологічний	Частка природно-заповідного фонду, на 01.01.2021	%	стимулятор	15	[46]
Екологічний	Щільність викидів від стаціонарних джерел, 2021 р.	т/км²	дестимулятор	3, 11, 13	[47]

Джерело: складено автором.

Вихідні дані для аналізу наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Вихідні дані для оцінки сталого розвитку областей України

Область	ВРП на особу, грн	Заробітна плата, грн	Інвестиції на особу, тис. грн	Безробіття, %	Природний приріст, ‰	Лісистість, %	Частка ПЗФ, %	Викиди, т/км²
Вінницька	114 218	12 488	8,90	11,0	-11,2	13,1	2,5	3,0
Волинська	90 331	11 445	8,88	12,7	-5,5	31,0	11,7	0,3
Дніпропетровська	186 697	13 669	18,65	8,9	-14,4	5,6	3,1	16,8
Житомирська	95 948	11 625	7,75	11,2	-12,7	33,6	4,6	0,4
Закарпатська	60 632	12 235	4,06	11,1	-4,7	51,4	15,5	0,2
Запорізька	138 521	13 782	9,30	11,1	-15,7	3,7	6,1	5,5
Івано-Франківська	88 227	11 988	4,66	8,7	-7,4	41,0	19,3	12,4
Київськ	162 696	14 290	18,32	7,2	-13,2	22,6	12,2	2,1

Область	ВРП на особу, грн	Заробітна плата, грн	Інвестиції на особу, тис. грн	Безробіття, %	Природний приріст, ‰	Лісистість, %	Частка ПЗФ, %	Викиди, т/км²
а								
Кіровоградська	109 183	11 180	7,33	13,2	-14,6	6,7	4,1	0,5
Львівська	119 049	12 530	9,47	7,7	-8,2	28,5	8,3	3,5
Миколаївська	112 864	13 807	8,58	11,3	-13,0	4,0	4,3	0,5
Одеська	115 129	12 326	9,05	7,3	-9,8	6,1	4,9	1,1
Полтавська	195 825	12 988	18,34	12,4	-14,2	8,6	5,7	1,8
Рівненська	77 599	12 762	4,92	9,6	-4,6	36,4	10,4	0,5
Сумська	100 760	11 844	6,83	10,1	-14,6	17,8	8,0	0,8
Тернопільська	79 412	11 595	7,08	11,9	-9,3	13,3	9,8	0,6
Харківська	122 227	12 051	7,69	6,7	-15,0	12,0	2,7	2,3
Херсонська	87 378	11 398	7,08	11,8	-12,8	4,1	13,1	0,6
Хмельницька	96 964	12 326	8,54	10,3	-11,9	12,8	15,9	1,0
Черкаська	112 145	11 965	7,71	10,1	-13,7	15,1	3,6	2,3
Чернівецька	61 088	11 183	3,70	9,3	-7,3	29,2	13,7	0,2
Чернігівська	117 225	11 363	8,15	12,4	-16,3	20,9	8,2	0,7

Джерело: складено та розраховано автором за [42–48].

Описова статистика показників свідчить про суттєву міжрегіональну диференціацію. Найбільшою вона є за щільністю викидів (коефіцієнт варіації 156 %), лісистістю (70 %) і часткою природно-заповідного фонду (56 %), тобто саме екологічні показники найбільше відрізняють області між собою. Серед економічних показників найбільшу варіацію мають капітальні інвестиції на особу (47 %) і ВРП на особу (31 %): максимальне значення ВРП (Полтавська область, 195,8 тис. грн) у 3,2 раза перевищує мінімальне (Закарпатська область, 60,6 тис. грн). Найменш диференційованою є заробітна плата (7 %), що зумовлено вирівнювальним впливом мінімальної заробітної плати та бюджетного сектору.

Методика дослідження включає п'ять етапів (рис. 2.1). На першому етапі здійснено нормалізацію показників мінімаксним методом за формулами (1.1) і (1.2). З огляду на сильну асиметрію розподілу щільності викидів (значення від 0,2 до 16,8 т/км²) перед нормалізацією цей показник логарифмовано за формулою ln(1 + x), що дало змогу уникнути надмірного впливу двох-трьох промислових областей на результати.

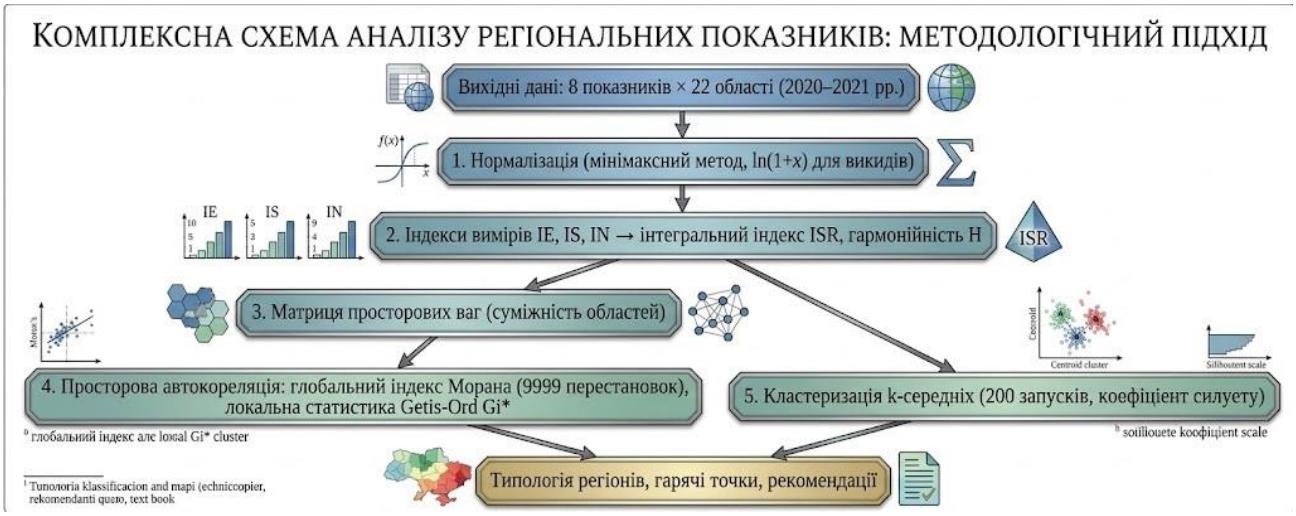


Рис. 2.1. Алгоритм геопросторового аналізу сталого розвитку областей України

Джерело: розроблено автором.

На другому етапі розраховано індекси трьох вимірів як середнє арифметичне нормалізованих показників відповідного виміру: економічного (IE) – за трьома показниками, соціального (IS) – за двома, екологічного (IN) – за трьома. Інтегральний індекс сталого розвитку (ISR) обчислено як середнє арифметичне індексів трьох вимірів, а коефіцієнт гармонійності – за формулою (1.3).

На третьому етапі сформовано матрицю просторових ваг за принципом суміжності: дві області вважаються сусідніми, якщо мають спільну межу. Для 22 областей отримано симетричну бінарну матрицю, у якій кількість сусідів коливається від двох (Волинська, Закарпатська, Запорізька) до семи (Вінницька, Полтавська). Для розрахунку глобального індексу Морана матрицю

нормалізовано за рядками. Межі з Донецькою та Луганською областями, а також з державами-сусідами не враховувалися.

На четвертому етапі розраховано глобальний індекс Морана для інтегрального індексу та індексів вимірів зі статистичною перевіркою методом 9999 випадкових перестановок, а також локальну статистику Getis-Ord Gi* для виявлення гарячих і холодних точок. На п'ятому етапі здійснено кластеризацію областей методом k-середніх у тривимірному просторі індексів вимірів з вибором кількості кластерів за коефіцієнтом силуету. Усі розрахунки виконано автором з використанням мови програмування Python (бібліотека NumPy) за алгоритмами, описаними в підрозділі 1.3.

Перед розрахунком індексів перевірено взаємозв'язки між нормалізованими показниками (табл. 2.3). Більшість коефіцієнтів кореляції не перевищують за модулем 0,65, що свідчить про достатню інформативність набору. Виняток становить пара «ВРП на особу – капітальні інвестиції на особу» (r = 0,93): обидва показники відображають економічний потенціал регіону, тому економічний вимір фактично визначається насамперед рівнем ділової активності. Обидва показники збережено, оскільки вони характеризують різні аспекти – результат (ВРП) і передумови (інвестиції) розвитку, однак цю обставину враховано під час інтерпретації результатів. Характерно, що природний приріст має помірний від'ємний зв'язок з ВРП (r = –0,62) і додатний – з лісистістю (r = 0,73), що відображає демографічні відмінності між західними та центрально-східними регіонами.

Таблиця 2.3

Матриця коефіцієнтів кореляції нормалізованих показників сталого розвитку

Показник	ВРП	ЗП	ІНВ	БЕЗР	ПРИР	ЛІС	ПЗФ	ВИК
ВРП на особу	1,00	0,64	0,93	0,15	-0,62	-0,53	-0,50	-0,56
Заробітна плата	0,64	1,00	0,65	0,35	-0,19	-0,24	-0,20	-0,47
Інвестиції на особу	0,93	0,65	1,00	0,13	-0,45	-0,42	-0,34	-0,43
Безробіття (нормалізоване)	0,15	0,35	0,13	1,00	0,11	0,11	0,03	-0,42
Природний приріст	-0,62	-0,19	-0,45	0,11	1,00	0,73	0,58	0,23
Лісистість	-0,53	-0,24	-0,42	0,11	0,73	1,00	0,59	0,16
Частка ПЗФ	-0,50	-0,20	-0,34	0,03	0,58	0,59	1,00	0,12

Показник	ВРП	ЗП	ІНВ	БЕЗР	ПРИР	ЛІС	ПЗФ	ВИК
Викиди (нормалізовані)	-0,56	-0,47	-0,43	-0,42	0,23	0,16	0,12	1,00

Джерело: розраховано автором. Примітка: для дестимуляторів (безробіття, викиди) наведено кореляцію нормалізованих значень, де більше значення відповідає кращому стану.

Для картографічного подання результатів використано схематичну картограму, у якій кожна область зображена квадратом однакового розміру, розташованим відповідно до її географічного положення. Розташування квадратів узгоджено з картографічною основою Національного атласу України [41]. Такий спосіб, на відміну від звичайної картограми, дає змогу рівною мірою показати всі області незалежно від їх площі, що зручно для порівняння значень індексів.

Отже, сформована інформаційна база включає вісім показників трьох вимірів сталого розвитку для 22 областей України за 2020–2021 роки, а методика поєднує побудову композитних індексів із методами просторової автокореляції та кластеризації. Це дає змогу не лише оцінити рівень сталого розвитку областей, а й виявити просторові закономірності його розподілу.

2.2. Оцінка рівня та просторового розподілу сталого розвитку областей України

Результати розрахунку індексів сталого розвитку областей України наведено в таблиці 2.4, де області впорядковано за спаданням інтегрального індексу.

Таблиця 2.4

Індекси сталого розвитку областей України (2021 р.)

Ранг	Область	Економічний вимір IE	Соціальний вимір IS	Екологічний вимір IN	Інтегральний індекс ISR	Гармонійність H
1	Київська	0,911	0,597	0,541	0,683	0,76
2	Закарпатська	0,121	0,661	0,925	0,569	0,41
3	Рівненська	0,239	0,777	0,691	0,569	0,58
4	Львівська	0,417	0,771	0,458	0,549	0,71
5	Івано-Франківська	0,176	0,729	0,629	0,511	0,53
6	Одеська	0,376	0,734	0,329	0,480	0,62

Ранг	Область	Економічний вимір IE	Соціальний вимір IS	Екологічний вимір IN	Інтегральний індекс ISR	Гармонійність H
7	Чернівецька	0,001	0,687	0,734	0,474	0,29
8	Волинська	0,217	0,502	0,697	0,472	0,58
9	Дніпропетровська	0,911	0,413	0,025	0,450	0,19
10	Хмельницька	0,320	0,412	0,600	0,444	0,74
11	Полтавська	0,854	0,150	0,326	0,443	0,33
12	Харківська	0,334	0,555	0,270	0,387	0,68
13	Миколаївська	0,519	0,290	0,344	0,384	0,75
14	Житомирська	0,225	0,311	0,565	0,367	0,61
15	Тернопільська	0,166	0,401	0,510	0,359	0,60
16	Сумська	0,240	0,312	0,491	0,348	0,70
17	Вінницька	0,388	0,388	0,250	0,342	0,81
18	Запорізька	0,596	0,188	0,196	0,327	0,42
19	Черкаська	0,300	0,351	0,310	0,320	0,93
20	Херсонська	0,165	0,257	0,511	0,311	0,53
21	Чернігівська	0,258	0,062	0,524	0,281	0,33
22	Кіровоградська	0,201	0,072	0,358	0,210	0,44

Джерело: розраховано автором за даними табл. 2.2.

Середнє значення інтегрального індексу сталого розвитку для 22 областей становить 0,422, а коефіцієнт варіації – 26 %. Найвищий рівень сталого розвитку має Київська область (0,683), яка поєднує високий економічний вимір (0,911), що зумовлено близькістю до столиці та значними інвестиціями, з вищими за середні соціальним і екологічним вимірами. Друге та третє місця посідають Закарпатська та Рівненська області (по 0,569), однак їх високий рейтинг забезпечується зовсім іншою структурою: високими екологічним і соціальним вимірами за низького економічного. Найнижчі значення індексу мають Кіровоградська (0,210), Чернігівська (0,281) та Херсонська (0,311) області, для яких характерні низькі соціальні показники – глибоке природне скорочення населення та високий рівень безробіття.

Аналіз коефіцієнта гармонійності засвідчує, що високий інтегральний індекс не завжди означає збалансований розвиток. Дніпропетровська область, яка має найвищий разом з Київською економічний вимір (0,911), характеризується найнижчим екологічним виміром (0,025) і, як наслідок, найнижчою гармонійністю (0,19). Подібна ситуація у Полтавській (0,33) та Запорізькій (0,42) областях. Навпаки, Чернівецька область має найнижчий економічний вимір (0,001) за високих соціального й екологічного, що також

зумовлює низьку гармонійність (0,29). Найбільш збалансованим є розвиток Черкаської (0,93), Вінницької (0,81), Київської (0,76) і Миколаївської (0,75) областей, однак у більшості з них збалансованість досягається на середньому або низькому рівні всіх вимірів. Порівняння інтегрального індексу та гармонійності подано на рис. 2.2.

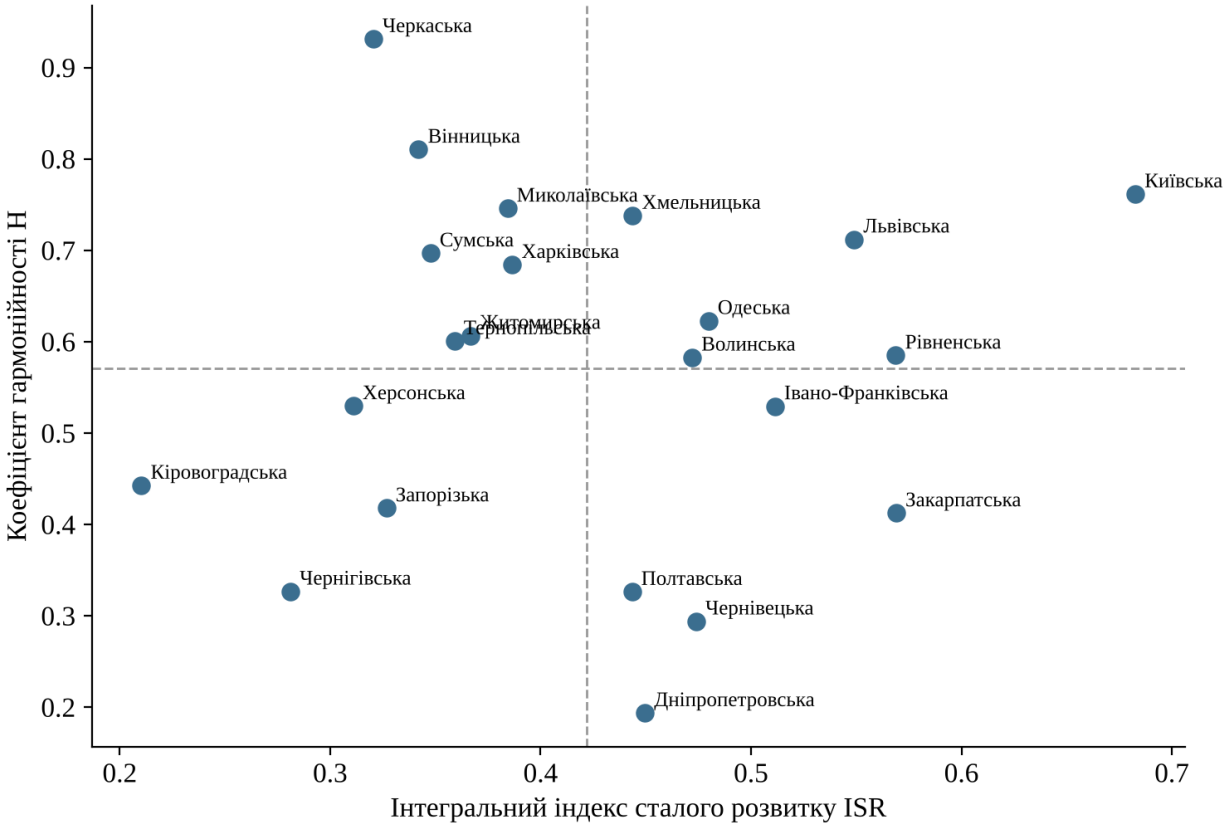


Рис. 2.2. Співвідношення інтегрального індексу сталого розвитку та коефіцієнта гармонійності областей України

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.4.

Для перевірки стійкості отриманих результатів виконано аналіз чутливості рейтингу до методичних припущень. Відмова від логарифмування показника викидів практично не змінює рейтинг: коефіцієнт рангової кореляції Спірмена між базовим і альтернативним варіантами становить 0,98, а максимальне зміщення області в рейтингу – три позиції. Зміна ваг вимірів на користь економічного (0,50 / 0,25 / 0,25) дає коефіцієнт Спірмена 0,84. Найбільше рейтинг змінюється при переході від середнього арифметичного до середнього геометричного індексів вимірів (коефіцієнт Спірмена 0,75): Чернівецька область опускається з 7-го на 22-ге місце, Дніпропетровська – з 9-

го на 19-те, Закарпатська – з 2-го на 8-ме. Це закономірно, оскільки геометричне агрегування «штрафує» незбалансований розвиток і не дає змоги компенсувати низьке значення одного виміру високими значеннями інших. Отже, лідерство Київської, Рівненської, Львівської та Івано-Франківської областей і відставання Кіровоградської, Чернігівської та Херсонської є стійкими до методичних припущень, тоді як позиції областей з незбалансованою структурою розвитку суттєво залежать від способу агрегування.

Розрахунок коефіцієнтів кореляції між індексами вимірів виявив важливу закономірність: економічний та екологічний виміри мають помірний від'ємний зв'язок ($r = –0,61$), соціальний та екологічний – слабкий додатний ($r = 0,41$), а економічний і соціальний практично не пов'язані ($r = –0,17$). Від'ємна кореляція між економічним та екологічним вимірами свідчить про те, що економічне зростання в Україні досі значною мірою відбувається за рахунок промислового навантаження на довкілля, а екологічно благополучні регіони, як правило, є економічно слабшими. Це підтверджує необхідність переходу до моделі розвитку, за якої економічне зростання не супроводжується погіршенням стану довкілля.

Просторовий розподіл інтегрального індексу та індексів вимірів показано на рис. 2.3. Економічний вимір має найвищі значення в центральних і східних областях (Київська, Дніпропетровська, Полтавська, Запорізька), тоді як екологічний – у західних (Закарпатська, Чернівецька, Рівненська, Волинська, Івано-Франківська) та поліських (Житомирська). Соціальний вимір найвищий у західних областях, де природне скорочення населення менш глибоке, а також в Одеській і Львівській областях з низьким рівнем безробіття.

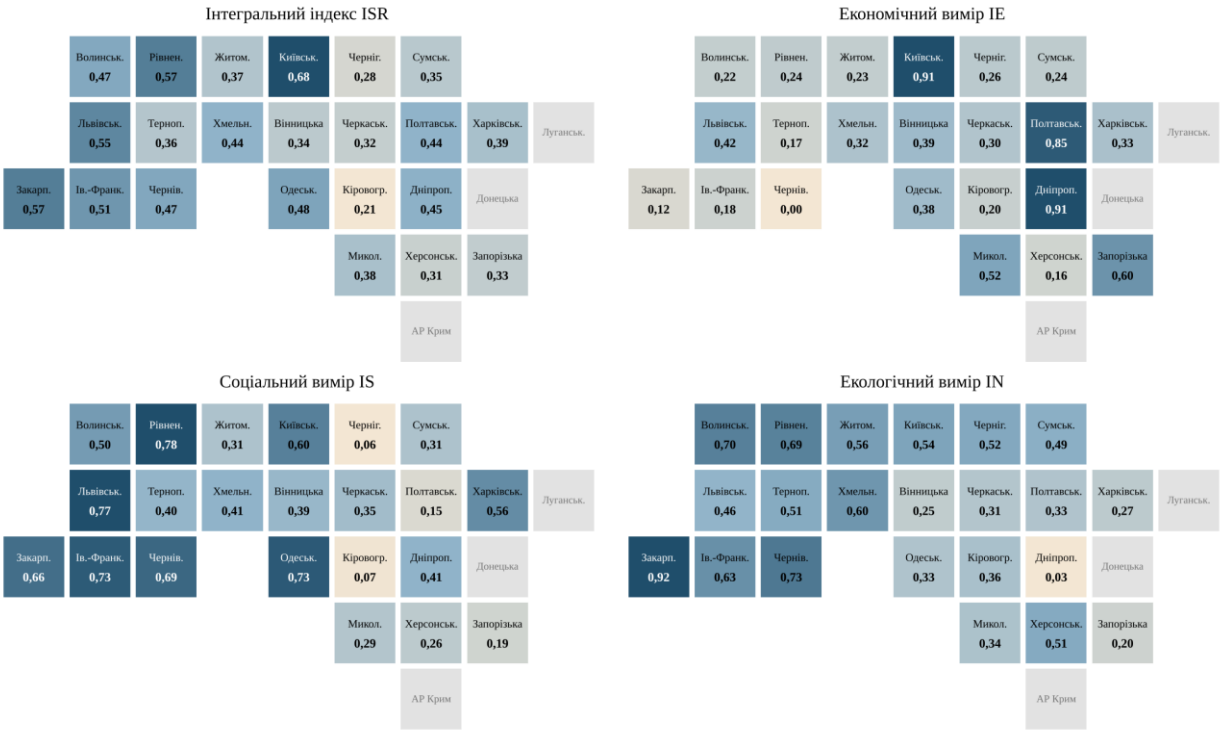


Рис. 2.3. Просторовий розподіл індексів сталого розвитку областей України (2021 р.)

Джерело: побудовано автором.

Для перевірки наявності статистично значущих просторових закономірностей розраховано глобальний індекс Морана (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Результати розрахунку глобального індексу Морана для індексів сталого розвитку

Індекс	Індекс Морана I	Математичне сподівання E(I)	Псевдо-p (9999 перестановок)	Висновок
Інтегральний індекс ISR	0,039	–0,048	0,257	Розподіл не відрізняється від випадкового
Економічний вимір IE	0,083	–0,048	0,161	Розподіл не відрізняється від випадкового
Соціальний вимір IS	0,265	–0,048	0,020	Значуща позитивна автокореляція ($p < 0,05$)
Екологічний вимір IN	0,401	–0,048	0,001	Значуща позитивна автокореляція ($p < 0,01$)

Джерело: розраховано автором.

Результати засвідчують цікаву закономірність. Інтегральний індекс сталого розвитку не має статистично значущої просторової автокореляції (I = 0,039; p = 0,257), тобто його значення розподілені по території України близько до випадкового. Водночас соціальний (I = 0,265; p = 0,020) і особливо

екологічний (I = 0,401; p = 0,001) виміри мають значущу позитивну автокореляцію: області з високими значеннями цих вимірів сусідять з подібними, утворюючи просторові кластери. Таке поєднання пояснюється компенсаційним характером просторової структури: західні області з високими соціальним і екологічним вимірами мають низький економічний вимір, а центральні й східні – навпаки, тому при агрегуванні в інтегральний індекс регіональні закономірності взаємно «гасяться».

Отримані результати мають важливе методичне значення: оцінка лише інтегрального індексу може створити хибне враження про відсутність просторових закономірностей у сталому розвитку. Для обґрунтування управлінських рішень необхідно аналізувати як інтегральний індекс, так і його складові, а також застосовувати методи типізації, що враховують багатовимірну структуру розвитку.

Отже, оцінка засвідчила суттєву міжрегіональну диференціацію сталого розвитку областей України за 2021 рік, від'ємний зв'язок між економічним та екологічним вимірами та значущу просторову автокореляцію соціального й екологічного вимірів за відсутності такої для інтегрального індексу. Це обґрунтовує доцільність кластеризації та локального аналізу гарячих точок, результати яких наведено в наступному підрозділі.

2.3. Кластеризація регіонів та аналіз гарячих точок за складовими сталого розвитку

Для типізації областей за структурою сталого розвитку здійснено кластеризацію методом k-середніх у тривимірному просторі індексів економічного, соціального та екологічного вимірів. Оскільки результат методу k-середніх залежить від початкового розміщення центрів, для кожної кількості кластерів виконано 200 запусків з різними початковими умовами і обрано розв'язок з мінімальною сумою квадратів відхилень. Для вибору оптимальної кількості кластерів розраховано суму квадратів відхилень і середній коефіцієнт силуету (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Показники якості кластеризації областей України методом k-середніх

Кількість кластерів k	Сума квадратів відхилень	Середній коефіцієнт силуету
2	1,997	0,373
3	1,219	0,352
4	0,893	0,361
5	0,679	0,354
6	0,523	0,399

Джерело: розраховано автором.

Сума квадратів відхилень найбільш суттєво зменшується при переході від двох до чотирьох кластерів, після чого темп зменшення сповільнюється («лікоть» графіка). Коефіцієнт силуету для k = 4 (0,361) є вищим, ніж для k = 3 і k = 5. Хоча при k = 6 значення силуету дещо вище, такий поділ утворює кластери з однією-двома областями, що ускладнює їх інтерпретацію. Тому оптимальною визнано кількість кластерів k = 4. Склад і характеристику кластерів наведено в таблиці 2.7, а їх просторове розміщення – на рис. 2.4.

Таблиця 2.7

Типологія областей України за структурою сталого розвитку (k = 4)

Кластер (тип)	Області	Центр кластера (IE / IS / IN)	Характеристика
I. Економічно розвинені з екологічним дефіцитом	Київська, Дніпропетровська, Полтавська, Запорізька, Миколаївська	0,758 / 0,328 / 0,286	Високі ВРП, інвестиції та заробітна плата; значне промислове навантаження, низька лісистість, глибоке природне скорочення населення
II. Соціально-економічно збалансовані з середнім екологічним виміром	Львівська, Одеська, Харківська, Вінницька	0,379 / 0,612 / 0,327	Великі міські центри, низьке безробіття, середній економічний рівень, помірне навантаження на довкілля
III. Еколого-соціальні з низьким економічним виміром	Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Рівненська, Волинська	0,151 / 0,671 / 0,735	Висока лісистість і частка ПЗФ, найсприятливіша демографічна ситуація, низькі ВРП та інвестиції
IV. Аграрні з низьким	Житомирська,	0,234 /	Низькі економічний і

Кластер (тип)	Області	Центр кластера (IE / IS / IN)	Характеристика
соціальним виміром	Хмельницька, Тернопільська, Сумська, Черкаська, Херсонська, Чернігівська, Кіровоградська	0,272 / 0,483	соціальний виміри, глибоке природне скорочення населення, високе безробіття, середній екологічний вимір

Джерело: розраховано автором.

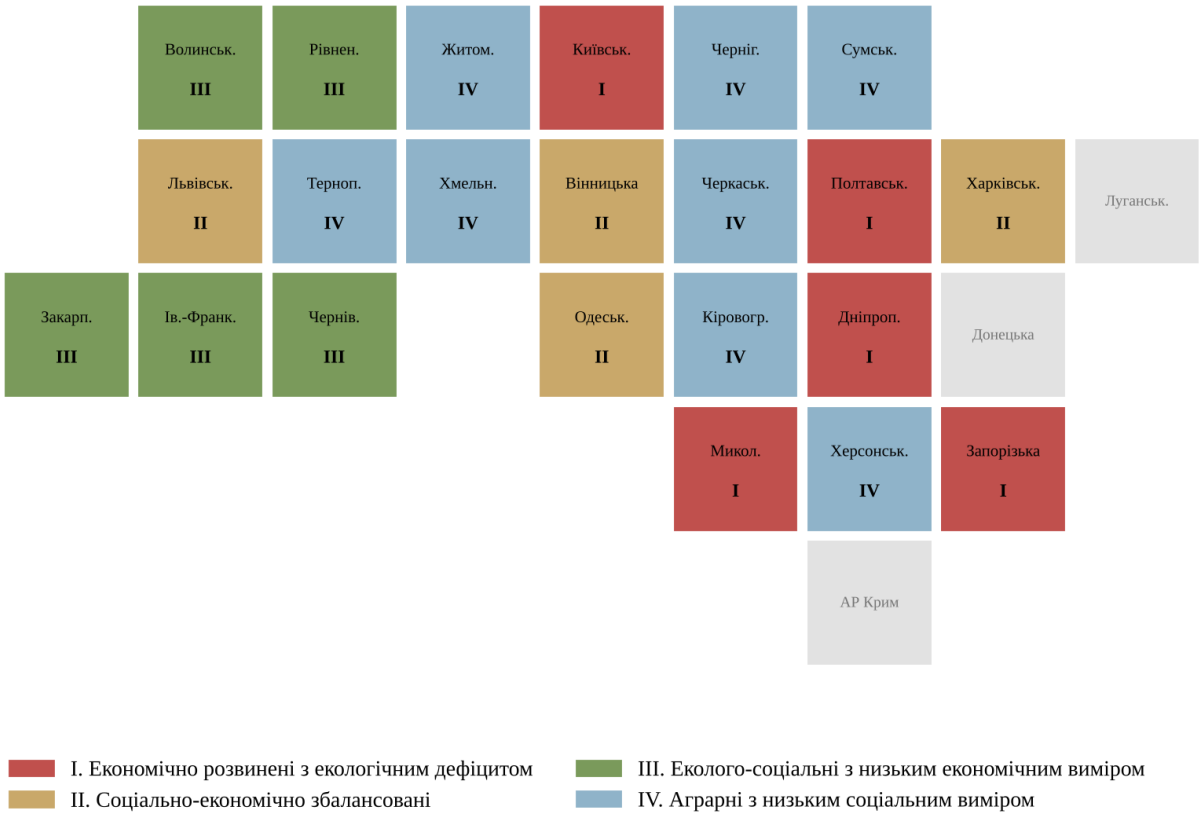


Рис. 2.4. Типологія областей України за структурою сталого розвитку (результати кластеризації методом k-середніх)

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.7.

Кластери мають виражену географічну компактність, хоча просторова суміжність не використовувалася як умова кластеризації. Кластер III утворює суцільний масив на заході країни (Карпатський регіон і Західне Полісся), кластер I охоплює центр і південний схід уздовж Дніпра, кластер IV – переважно центральні та північні аграрні області. Кластер II об'єднує області з найбільшими містами-центрами (Львів, Одеса, Харків, Вінниця), що підтверджує роль великих міст як чинника соціально-економічної

збалансованості. Конфігурацію кластерів у просторі індексів показано на рис. 2.5.

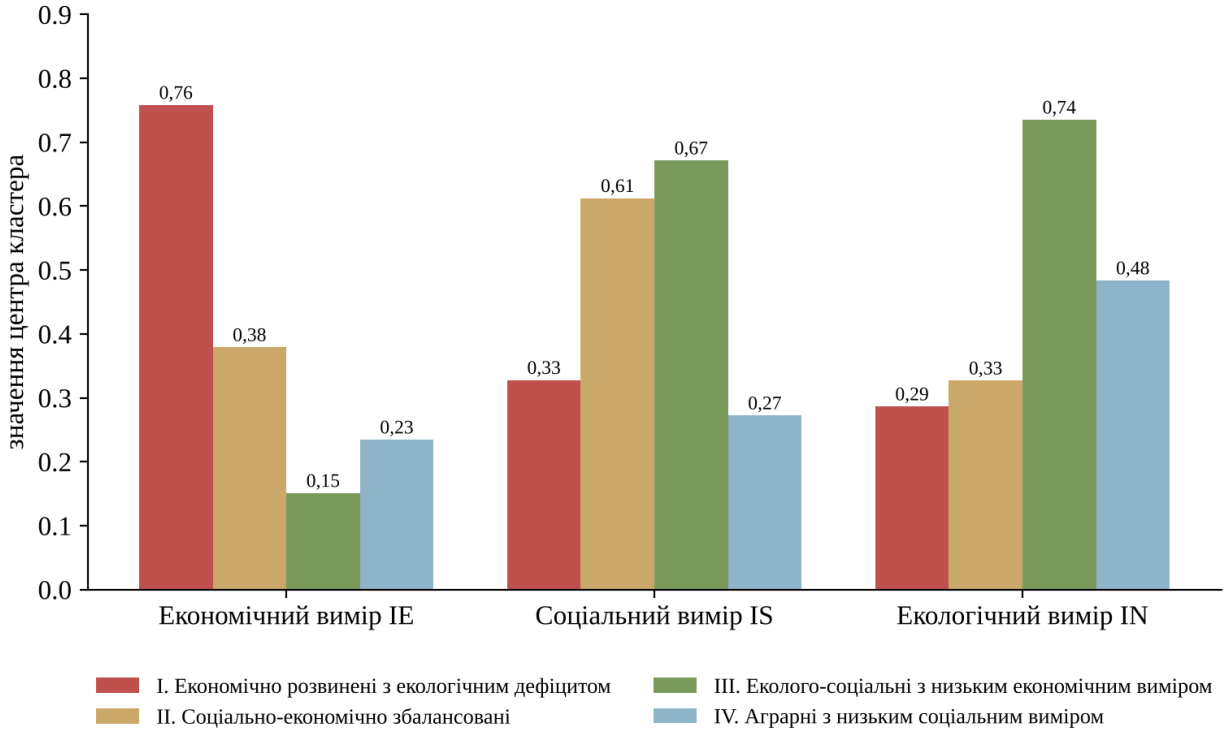


Рис. 2.5. Профілі кластерів областей України за індексами вимірів сталого розвитку

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.7.

Для виявлення локальних просторових концентрацій розраховано статистику Getis-Ord Gi* для інтегрального індексу та індексів вимірів (табл. 2.8). Значення понад 1,96 (менше –1,96) відповідають статистично значущим гарячим (холодним) точкам на рівні 95 %, значення понад 1,65 (менше –1,65) – на рівні 90 %.

Таблиця 2.8

Значення статистики Getis-Ord Gi* для індексів сталого розвитку областей України

Область	ISR	IE	IS	IN
Вінницька	-0,22	-0,28	0,10	-0,11
Волинська	1,80	-0,51	2,03	1,34
Дніпропетровська	-1,80	1,91	-2,30	-2,75
Житомирська	1,34	0,56	0,67	0,76
Закарпатська	2,02	-0,90	2,34	1,84
Запорізька	-0,99	1,45	-1,25	-2,02
Івано-Франківська	1,61	-1,86	2,39	2,26
Київська	-0,40	1,46	-1,62	-0,67

Область	ISR	IE	IS	IN
Кіровоградська	-1,32	1,86	-1,34	-2,95
Львівська	2,13	-1,57	2,58	2,56
Миколаївська	-1,24	0,74	-0,95	-1,90
Одеська	-1,34	0,09	-0,65	-1,58
Полтавська	-1,00	1,97	-1,93	-1,92
Рівненська	0,98	-1,10	1,17	1,66
Сумська	-1,13	0,53	-1,64	-0,69
Тернопільська	1,60	-1,60	2,44	1,90
Харківська	-0,30	1,96	-0,78	-2,03
Херсонська	-1,06	1,64	-1,47	-2,13
Хмельницька	0,10	-1,56	0,74	1,26
Черкаська	-0,50	1,71	-1,41	-1,36
Чернівецька	0,10	-1,51	0,97	0,95
Чернігівська	0,33	1,79	-1,54	0,03

Джерело: розраховано автором.

Аналіз гарячих точок підтвердив і конкретизував результати глобального аналізу (рис. 2.6). За інтегральним індексом значущі гарячі точки (95 %) виявлено у Львівській (2,13) і Закарпатській (2,02) областях, на рівні 90 % – у Волинській (1,80); холодна точка на рівні 90 % – Дніпропетровська область (–1,80). За соціальним виміром сформувалася потужна гаряча точка на заході країни – Львівська (2,58), Тернопільська (2,44), Івано-Франківська (2,39), Закарпатська (2,34) і Волинська (2,03) області, тоді як холодні точки зосереджені в Дніпропетровській (–2,30) і Полтавській (–1,93) областях. За екологічним виміром гаряча точка охоплює Львівську (2,56), Івано-Франківську (2,26), Тернопільську (1,90), Закарпатську (1,84) і Рівненську (1,66) області, а холодна – Кіровоградську (–2,95), Дніпропетровську (–2,75), Херсонську (–2,13), Харківську (–2,03), Запорізьку (–2,02) і Полтавську (–1,92), тобто степову та лісостепову зону з високою розораністю та промисловим навантаженням.

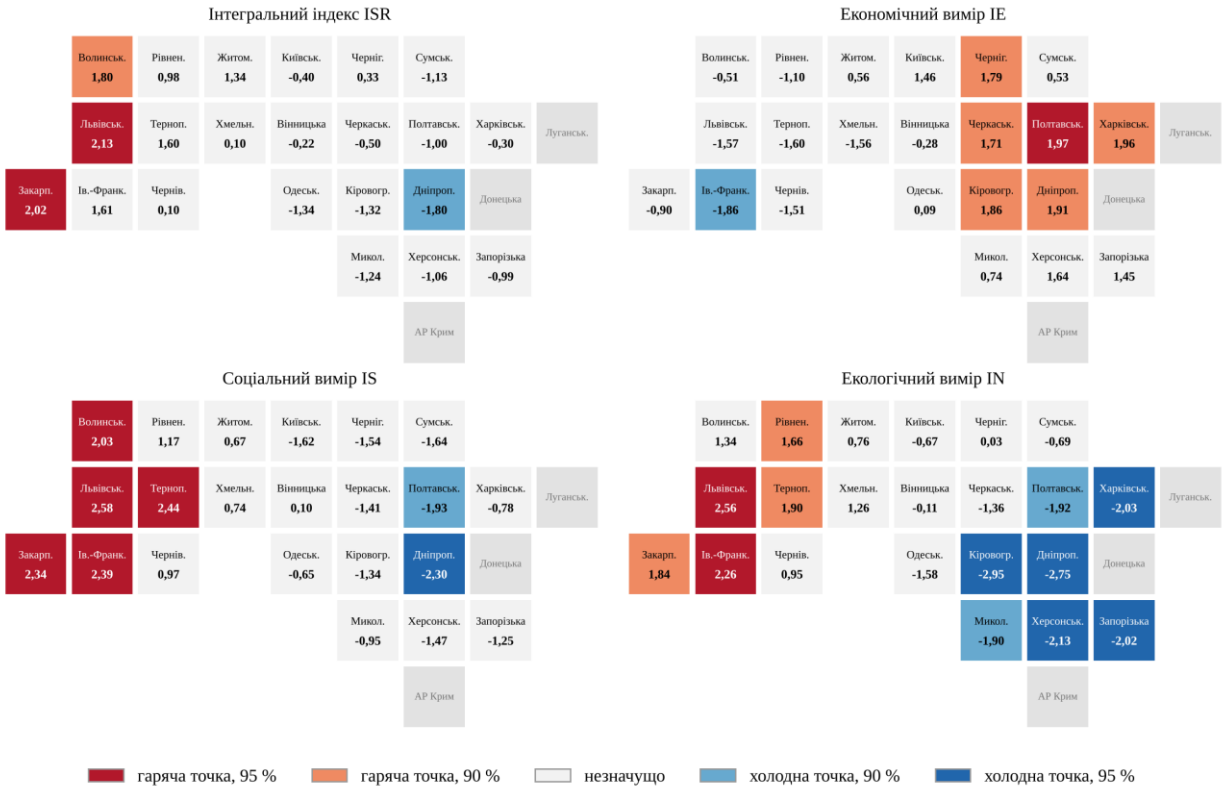


Рис. 2.6. Гарячі та холодні точки за індексами сталого розвитку областей України (статистика Getis-Ord Gi*)

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.8.

Економічний вимір має дзеркальну просторову структуру: гарячі точки (на рівні 90–95 %) охоплюють Полтавську (1,97), Харківську (1,96), Дніпропетровську (1,91), Кіровоградську (1,86) і Чернігівську (1,79) області, тобто центральну та східну частину України, а західні області утворюють зону низьких значень. Слід зазначити, що Кіровоградська та Чернігівська області потрапили до гарячої точки економічного виміру завдяки сусідству з економічно сильними регіонами, хоча власні значення індексу в них низькі. Це демонструє особливість статистики Gi*, яка характеризує не окрему територію, а її оточення, і вказує на потенціал цих областей для залучення в економічні зв'язки з сусідами.

Отже, кластеризація та аналіз гарячих точок дали змогу виділити чотири типи областей за структурою сталого розвитку та виявити чітку просторову поляризацію України: західний еколого-соціальний полюс і центрально-східний економічний полюс з екологічним дефіцитом.

РОЗДІЛ 3 НАПРЯМИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ СТАЛИМ РОЗВИТКОМ ТЕРИТОРІЙ

3.1. Обґрунтування диференційованих рекомендацій для типів регіонів

Результати геопросторового аналізу, отримані в розділі 2, засвідчили, що регіони України суттєво відрізняються не лише рівнем, а й структурою сталого розвитку. Це означає, що уніфіковані заходи регіональної політики не можуть бути однаково ефективними для всіх областей: для регіону з екологічним дефіцитом і високим економічним потенціалом потрібні інші інструменти, ніж для регіону з багатими природними ресурсами та слабкою економікою. Тому основним практичним результатом типізації є можливість обґрунтувати диференційовані рекомендації для кожного типу регіонів.

Принцип диференційованого підходу закладено в Законі України «Про засади державної регіональної політики», який серед завдань політики визначає врахування особливостей розвитку регіонів і підтримку територій, що потребують особливої уваги держави [7], та в Державній стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки, яка передбачає функціональну типологію територій [3]. Отримана в роботі типологія доповнює чинні підходи, оскільки ґрунтується на збалансованості трьох вимірів сталого розвитку.

Для визначення пріоритетів кожного кластера проаналізовано відхилення центра кластера від середнього значення індексів вимірів (рис. 3.1). Вимір, за яким центр кластера суттєво нижчий за середнє, визначено як пріоритетний для вирівнювання, а вимір із суттєво вищим значенням – як конкурентну перевагу, яку слід зберігати й використовувати.

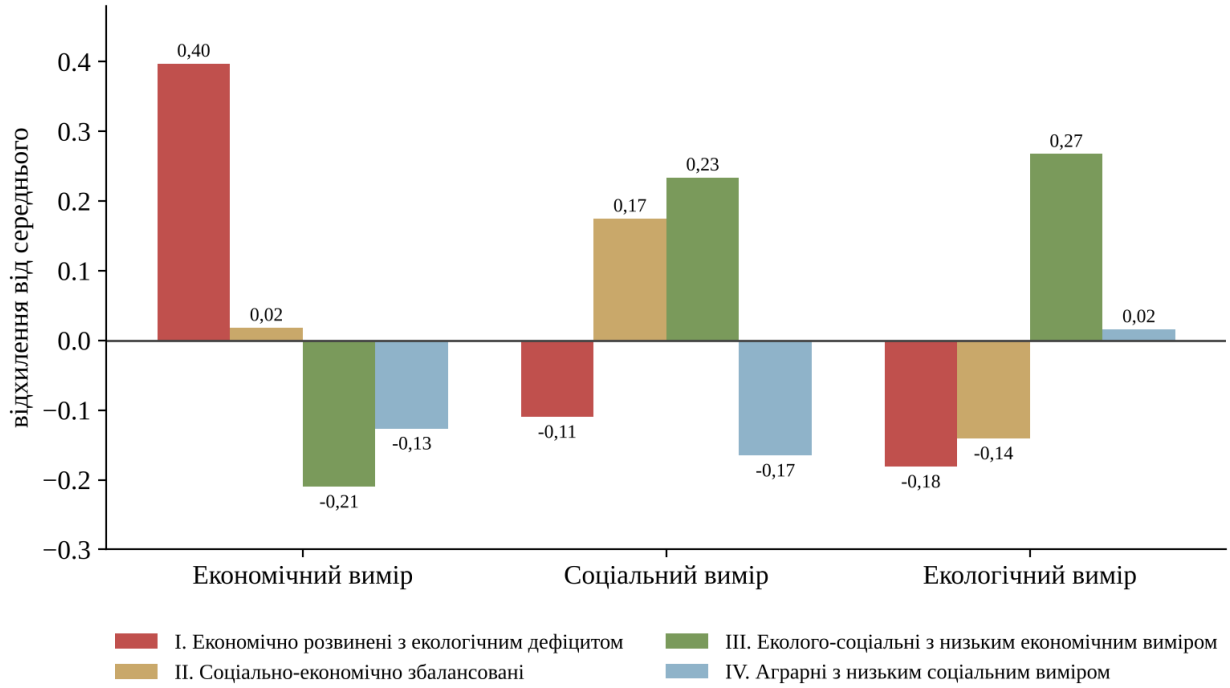


Рис. 3.1. Відхилення центрів кластерів від середніх значень індексів вимірів сталого розвитку

Джерело: розраховано автором.

Для кластера I «Економічно розвинені з екологічним дефіцитом» (Київська, Дніпропетровська, Полтавська, Запорізька, Миколаївська області) конкурентною перевагою є економічний потенціал (центр кластера 0,758 проти середнього 0,361), а пріоритетом – екологічний вимір (0,286 проти 0,467) і соціальний (0,328 проти 0,437). Ключовими напрямами для цих регіонів мають стати екологічна модернізація промисловості, скорочення викидів, збільшення лісистості та площ природно-заповідного фонду, а також заходи з поліпшення демографічної ситуації. Важливо, що саме ці регіони мають найбільші фінансові можливості для реалізації природоохоронних заходів.

Для кластера II «Соціально-економічно збалансовані з середнім екологічним виміром» (Львівська, Одеська, Харківська, Вінницька області) конкурентною перевагою є соціальний вимір (0,612), а пріоритетом – екологічний (0,327). Ці регіони мають великі міські центри, тому ключовими напрямами є розвиток зеленої міської інфраструктури, сталого транспорту, систем управління відходами, а також подальше нарощування економічного потенціалу через інноваційні галузі.

Для кластера III «Еколого-соціальні з низьким економічним виміром» (Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Рівненська, Волинська області) конкурентною перевагою є екологічний (0,735) та соціальний (0,671) виміри, а пріоритетом – економічний (0,151). Розвиток цих регіонів має ґрунтуватися на моделях, що не руйнують природний капітал: сталий туризм і рекреація, органічне сільське господарство, переробка деревини з дотриманням принципів сталого лісокористування, відновлювана енергетика з урахуванням екологічних обмежень, розвиток логістики на кордоні з ЄС. Саме в цих регіонах розміщено значну частину релокованих під час війни підприємств, що створює можливості для економічного зростання, але й ризики для довкілля, які мають контролюватися.

Для кластера IV «Аграрні з низьким соціальним виміром» (Житомирська, Хмельницька, Тернопільська, Сумська, Черкаська, Херсонська, Чернігівська, Кіровоградська області) характерні низькі значення як економічного (0,234), так і соціального (0,272) вимірів за середнього екологічного (0,483). Це найчисленніший кластер, що об'єднує переважно аграрні регіони з глибоким природним скороченням населення та високим безробіттям. Пріоритетами для нього є диверсифікація сільської економіки, розвиток переробки сільськогосподарської продукції, підтримка малого підприємництва, поліпшення доступу до соціальних послуг у сільській місцевості. Важливо, що Сумська, Чернігівська та Херсонська області зазнали значних руйнувань унаслідок бойових дій, тому для них заходи сталого розвитку мають бути інтегровані в плани відновлення.

Узагальнені рекомендації для типів регіонів наведено в таблиці 3.1. Запропонована типологія може бути співвіднесена з Цілями сталого розвитку, що полегшує інтеграцію рекомендацій у стратегічні документи регіонів. Для кожного типу визначено пріоритетні ЦСР, досягнення яких має найбільший потенціал для вирівнювання структури розвитку (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Диференційовані рекомендації для типів регіонів за структурою сталого розвитку

Тип регіонів	Конкурентна перевага	Пріоритет вирівнювання	Основні напрями політики	Ключові індикатори моніторингу
I. Економічно розвинені з екологічним дефіцитом	Економічний вимір	Екологічний, соціальний	Екологічна модернізація промисловості, скорочення викидів, заліснення, розширення ПЗФ, демографічна політика	Щільність викидів, лісистість, частка ПЗФ, природний приріст
II. Соціально-економічно збалансовані	Соціальний вимір	Екологічний	Зелена міська інфраструктура, сталий транспорт, управління відходами, інноваційна економіка	Викиди, частка зелених зон міст, ВРП на особу
III. Еколого-соціальні	Екологічний і соціальний виміри	Економічний	Сталий туризм, органічне агровиробництво, стале лісокористування, логістика з ЄС, екологічний контроль релокованих підприємств	ВРП на особу, інвестиції на особу, збереження лісистості
IV. Аграрні з низьким соціальним виміром	Екологічний вимір (середній)	Соціальний, економічний	Диверсифікація сільської економіки, переробка, підтримка МСП, доступ до послуг, інтеграція в плани відновлення	Безробіття, природний приріст, ВРП на особу

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.2

Пріоритетні Цілі сталого розвитку для типів регіонів

Тип регіонів	Пріоритетні ЦСР	Обґрунтування
I. Економічно розвинені з екологічним дефіцитом	3 (здоров'я), 9 (інфраструктура й інновації), 12 (відповідальне споживання), 13 (клімат), 15 (екосистеми суші)	Висока щільність викидів, низька лісистість, промислове навантаження за наявності фінансових ресурсів для модернізації
II. Соціально-економічно збалансовані	7 (доступна енергія), 11 (сталі міста), 12 (відповідальне споживання)	Концентрація населення у великих містах, потреба в зеленій міській інфраструктурі та управлінні відходами
III. Еколого-соціальні	8 (гідна праця та економічне зростання), 9 (інфраструктура), 15 (екосистеми суші)	Низькі ВРП та інвестиції за високого природного капіталу, ризики від релокації виробництв
IV. Аграрні з низьким соціальним виміром	1 (подолання бідності), 2 (подолання голоду, сільське господарство), 3 (здоров'я)	Глибоке природне скорочення населення, високе безробіття, аграрна спеціалізація

Слід також враховувати, що типологія побудована за довоєнними даними, а повномасштабна збройна агресія суттєво змінила ситуацію в окремих регіонах. Найбільших втрат зазнали області, що опинилися в зоні бойових дій або тимчасової окупації: Харківська, Херсонська, Запорізька, Миколаївська, Сумська, Чернігівська, частково Дніпропетровська та Київська. Для них поряд із рекомендаціями, що випливають із типу регіону, першочерговими стають завдання розмінування, відновлення інфраструктури та повернення населення. Водночас західні області кластера III прийняли значну кількість внутрішньо переміщених осіб і релокованих підприємств, що може підвищити їх економічний вимір, але створює ризики для екологічного. Тому наведені рекомендації мають розглядатися як базові, а після оновлення статистичних даних типологію необхідно перерахувати з використанням запропонованої методики.

Важливим напрямом використання результатів є також обґрунтування міжрегіонального співробітництва. Області різних типів мають взаємодоповнювальні ресурси: регіони кластера I – фінансові та технологічні, кластера III – природні та рекреаційні, кластера IV – аграрні та земельні. Механізми міжрегіонального співробітництва, передбачені законодавством про регіональну політику [7], можуть використовуватися для спільних проєктів, наприклад, компенсаційного лісорозведення в регіонах кластера IV за рахунок підприємств регіонів кластера I або розвитку логістичних ланцюгів переробки сільськогосподарської продукції.

Окремої уваги заслуговує використання результатів аналізу гарячих точок. Виявлена гаряча точка екологічного виміру на заході країни має розглядатися як цілісний екологічний каркас, для якого доцільно розробляти міжрегіональні програми збереження лісових та гірських екосистем. Холодна точка екологічного виміру в степовій і лісостеповій зоні (Кіровоградська, Дніпропетровська, Херсонська, Харківська, Запорізька, Полтавська області) потребує міжрегіональної програми полезахисного лісорозведення та оптимізації структури землекористування. Отже, методи гарячих точок дають

змогу обґрунтовувати не лише заходи для окремих областей, а й міжрегіональні ініціативи, що виходять за межі адміністративних кордонів.

3.2. Геоінформаційна система підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку територій

Практичне використання методів аналізу геопросторових даних в управлінні потребує створення інструменту, який забезпечував би регулярне оновлення даних, автоматизований розрахунок показників і наочне подання результатів для осіб, що ухвалюють рішення. В. В. Путренко обґрунтував необхідність систем підтримки прийняття рішень (СППР) на основі інтелектуального аналізу геопросторових даних, які інтегрують бази даних, модулі аналізу та засоби візуалізації [1]. З урахуванням цього підходу та результатів, отриманих у розділі 2, запропоновано структуру геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку територій (ГІС СППР СРТ).

Архітектура запропонованої системи складається з чотирьох рівнів (рис. 3.2). Рівень даних включає сховище геопросторових даних, що інтегрує статистичні показники, дані державних реєстрів, дані дистанційного зондування Землі та добровільну географічну інформацію. Рівень обробки забезпечує завантаження, перевірку якості, нормалізацію та агрегування даних за територіальними одиницями. Аналітичний рівень містить модулі розрахунку композитних індексів, просторової автокореляції, кластеризації, аналізу гарячих точок і прогнозування. Рівень подання забезпечує доступ користувачів через веб-геопортал з інтерактивними картами, інформаційними панелями та звітами.

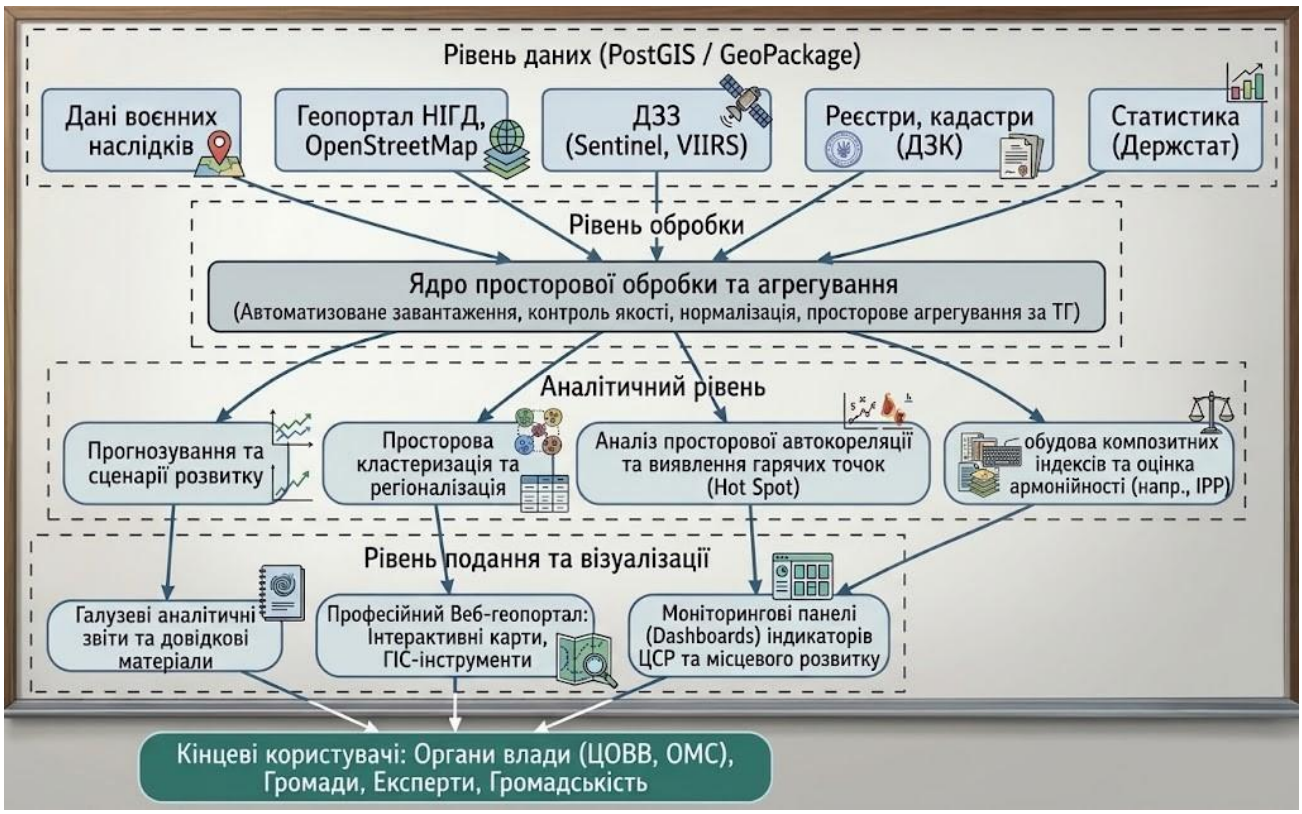


Рис. 3.2. Архітектура геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку територій

Джерело: розроблено автором за [1; 4; 11].

Важливою вимогою до системи є її інтеграція з національною інфраструктурою геопросторових даних. Відповідно до Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» базові геопросторові дані (адміністративно-територіальний устрій, населені пункти, гідрографія, рельєф, земельні ділянки тощо) мають отримуватися з національного геопорталу через стандартизовані сервіси, а результати аналізу можуть публікуватися як профільні геопросторові дані з відповідними метаданими [4; 49]. Це забезпечить узгодженість даних різних систем і можливість їх повторного використання. Склад тематичних шарів системи наведено в таблиці 3.3. Технологічна реалізація системи може ґрунтуватися на програмному забезпеченні з відкритим кодом, що знижує витрати та забезпечує незалежність від постачальників. Для зберігання даних доцільно використовувати просторову базу даних PostgreSQL/PostGIS або для локальних задач – формат GeoPackage, стандартизований Відкритим геопросторовим консорціумом [52].

Аналітичні модулі реалізуються мовою Python з використанням бібліотек PySAL [38], NumPy і scikit-learn, обробка даних ДЗЗ – засобами хмарної платформи Google Earth Engine [31], настільна робота аналітиків – у QGIS [51], а веб-публікація – засобами GeoServer та бібліотек інтерактивних карт.

Таблиця 3.3

Склад тематичних шарів геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку

Група шарів	Шари	Джерело даних	Періодичність оновлення
Базові	Адміністративні межі областей, районів, громад; населені пункти; гідрографія; дороги	Геопортал НІГД, OpenStreetMap	Щорічно
Економічні	ВРП, заробітна плата, інвестиції, кількість підприємств, нічне освітлення	Держстат, VIIRS	Щорічно, щомісячно (ДЗЗ)
Соціальні	Чисельність і рух населення, безробіття, доступність освіти та медицини, ВПО	Держстат, Мінсоцполітики, реєстри	Щорічно, щоквартально
Екологічні	Лісистість, ПЗФ, викиди, якість вод, землекористування, вегетаційні індекси	Держлісагентство, Держстат, Sentinel-2	Щорічно, щомісячно (ДЗЗ)
Воєнні наслідки	Пошкоджена інфраструктура, потенційно заміновані території, пошкоджені землі	Державні реєстри, дані ДЗЗ	У міру надходження
Аналітичні	Індекси вимірів, інтегральний індекс, кластери, гарячі точки	Розрахунок у системі	Після кожного оновлення даних

Джерело: розроблено автором.

Ключовою перевагою запропонованої системи є відтворюваність аналізу: після оновлення вихідних даних усі індекси, кластери та гарячі точки перераховуються автоматично за єдиною методикою, що дає змогу відстежувати динаміку сталого розвитку та оцінювати результативність заходів регіональної політики. Система також може використовуватися для підготовки національних і регіональних звітів про досягнення ЦСР [15], а також для моніторингу результативності реалізації державної регіональної політики.

Особливого значення система набуває в умовах війни та післявоєнного відновлення. Інтеграція шарів воєнних наслідків (пошкоджена інфраструктура, заміновані території, пошкоджені землі) з показниками сталого розвитку дасть

змогу оцінювати не лише довоєнний стан, а й масштаби втрат і пріоритети відновлення з урахуванням принципу «відбудувати краще, ніж було» (build back better). Дані дистанційного зондування Землі, зокрема знімки Sentinel програми Copernicus [32; 50] і дані нічного освітлення VIIRS [36], дають змогу оцінювати зміни на територіях, для яких статистична інформація тимчасово недоступна.

Окрему увагу в системі необхідно приділити контролю якості даних, оскільки помилки у вихідних показниках безпосередньо впливають на результати нормалізації, кластеризації та виявлення гарячих точок. Модуль контролю якості має автоматично перевіряти повноту даних для всіх територіальних одиниць, наявність аномальних значень (наприклад, відхилень понад три стандартні відхилення від середнього або різких змін порівняно з попереднім роком), узгодженість одиниць виміру та відповідність кодів територіальних одиниць кодифікатору КАТОТТГ. Для кожного набору даних мають зберігатися метадані: джерело, дата отримання, методика розрахунку, обмеження використання. Це відповідає вимогам до метаданих, встановленим законодавством про національну інфраструктуру геопросторових даних [4; 49] і Директивою INSPIRE [10].

Не менш важливим є забезпечення порівнянності даних у часі. Зміни адміністративно-територіального устрою (зокрема реформа 2020 року, внаслідок якої замість 490 районів утворено 136 і сформовано 1469 територіальних громад), зміни методик статистичних спостережень, а також відсутність даних для окремих територій у період воєнного стану вимагають механізмів перерахунку показників до єдиної територіальної основи. Для цього в системі доцільно зберігати історичні межі територіальних одиниць і таблиці відповідності між ними, а для територій, де статистичні дані відсутні, використовувати оцінки на основі даних дистанційного зондування Землі з відповідною позначкою про їх характер.

Порядок функціонування системи передбачає такий цикл: щорічне оновлення статистичних даних і щомісячне – даних ДЗЗ; автоматичний

розрахунок індексів і просторових статистик; формування аналітичного звіту; обговорення результатів з органами влади та громадськістю; коригування регіональних програм; оцінка результативності на наступному циклі. Такий цикл реалізує принцип управління на основі даних.

Ефективність системи значною мірою залежить від того, наскільки вона відповідає потребам різних груп користувачів. Основні сценарії використання системи наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Сценарії використання геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку

Користувач	Завдання	Функції системи
Центральні органи виконавчої влади (регіональна політика, статистика)	Моніторинг досягнення ЦСР, підготовка національних звітів, розподіл коштів регіонального розвитку	Розрахунок індексів, рейтинги, типологія, динаміка показників
Обласні та районні військові (державні) адміністрації	Розроблення та моніторинг регіональних стратегій і планів відновлення	Порівняння з іншими регіонами, гарячі точки, пріоритети за вимірами
Органи місцевого самоврядування	Стратегії розвитку громад, комплексні плани просторового розвитку	Показники громад, дані ДЗЗ, зональна статистика
Міжнародні партнери та донори	Обґрунтування програм допомоги та відновлення	Карти потреб, оцінка результативності проєктів
Наукові установи та заклади освіти	Дослідження, навчання	Доступ до даних і алгоритмів, експорт результатів
Громадськість	Контроль діяльності органів влади	Відкриті інтерактивні карти та інформаційні панелі

Джерело: розроблено автором.

Для різних груп користувачів доцільно передбачити різні рівні доступу: відкритий – для узагальнених показників та карт; авторизований – для детальних даних і аналітичних інструментів; обмежений – для даних, що становлять загрозу безпеці в умовах воєнного стану (координати об'єктів критичної інфраструктури, детальні дані про пошкодження та заміновані території). Таке розмежування відповідає принципам відкритості даних і водночас враховує безпекові обмеження.

Отже, запропонована геоінформаційна система підтримки прийняття рішень інтегрує дані різних джерел, автоматизує розрахунок показників сталого розвитку та просторових статистик і забезпечує їх наочне подання, що дає змогу перейти від разових досліджень до регулярного моніторингу сталого розвитку територій.

3.3. Адаптація методики до рівня територіальних громад та оцінка її ефективності

Аналіз, виконаний у розділі 2 на рівні областей, має обмеження, пов'язані з проблемою модифікованої площинної одиниці [35]: області є великими й внутрішньо неоднорідними територіями, у межах яких поєднуються міста й сільська місцевість, промислові та природоохоронні зони. Після реформи децентралізації основним суб'єктом управління розвитком території стала територіальна громада, тому адаптація методики до рівня громад є логічним напрямом її розвитку.

Головною проблемою такої адаптації є обмеженість статистичних даних на рівні громад: офіційна статистика публікує для них значно менше показників, ніж для областей, а частина показників (ВРП, інвестиції) взагалі не розраховується. Тому для рівня громад запропоновано систему показників, що поєднує доступні офіційні дані, відкриті дані бюджетів і реєстрів, а також показники, отримані з даних дистанційного зондування Землі (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Система показників для оцінки сталого розвитку на рівні територіальних громад

Вимір	Показник	Джерело даних	Тип
Економічний	Власні доходи бюджету на одного мешканця	Відкриті дані бюджетів громад	стимулятор
Економічний	Кількість зареєстрованих суб'єктів господарювання на 1000 мешканців	Єдиний державний реєстр	стимулятор
Економічний	Інтенсивність нічного освітлення на одного мешканця	VIIRS	стимулятор
Соціальний	Динаміка чисельності населення	Держстат, реєстри	стимулятор
Соціальни	Доступність закладів освіти та	OpenStreetMap,	дестимуля

Вимір	Показник	Джерело даних	Тип
й	охорони здоров'я (час доїзду)	реєстри закладів	тор
Екологічний	Лісистість та частка природних угідь	Sentinel-2, Державний земельний кадастр	стимулятор
Екологічний	Розораність території	Державний земельний кадастр, Sentinel-2	дестимулятор
Екологічний	Частка забудованих і порушених земель	Sentinel-2	дестимулятор

Джерело: розроблено автором за [4; 5; 30–32; 36].

Перевагою використання даних дистанційного зондування Землі є їх незалежність від адміністративних меж і регулярність оновлення. Наприклад, лісистість, розораність і частку забудованих земель для будь-якої громади можна обчислити шляхом класифікації знімків Sentinel-2 і зонального агрегування результатів у межах громади, а інтенсивність нічного освітлення VIIRS є визнаним непрямим індикатором економічної активності [36]. Важливо, що ці дані доступні і для територій, де статистичні спостереження під час війни обмежені.

Процедура застосування методики на рівні громад передбачає такі кроки: формування набору показників для всіх громад області; нормалізацію та розрахунок індексів вимірів і інтегрального індексу; побудову матриці суміжності громад; розрахунок глобальних і локальних статистик просторової автокореляції; кластеризацію громад з урахуванням просторової суміжності (регіоналізацію); формування рекомендацій для типів громад і їх урахування в стратегіях розвитку та комплексних планах просторового розвитку територій громад. Результати аналізу на рівні громад дають змогу виявити внутрішньообласні диспропорції, приховані на рівні областей, зокрема концентрацію проблем у периферійних громадах.

Для оцінки ефективності запропонованої методики та геоінформаційної системи порівняно традиційний підхід до моніторингу сталого розвитку (на основі окремих статистичних показників і рейтингів) із запропонованим (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Порівняння традиційного та запропонованого підходів до моніторингу сталого розвитку територій

Критерій	Традиційний підхід	Запропонований підхід
Охоплення вимірів	Окремі показники, часто без зв'язку між собою	Інтегральна оцінка трьох вимірів і їх гармонійності
Врахування просторових зв'язків	Відсутнє	Індекс Морана, гарячі точки, регіоналізація
Результат	Рейтинг регіонів	Рейтинг, типологія, просторові кластери, міжрегіональні пріоритети
Деталізація	Області	Області та громади (з використанням ДЗЗ)
Оновлення	Разові дослідження	Автоматизоване регулярне оновлення
Доступність для органів влади	Аналітичні записки	Веб-геопортал з інтерактивними картами
Відтворюваність	Залежить від виконавця	Єдиний відкритий алгоритм

Джерело: розроблено автором.

Ефективність запропонованого підходу проявляється в кількох аспектах. По-перше, у підвищенні обґрунтованості управлінських рішень: як показали результати розділу 2, аналіз лише інтегрального індексу приховує просторову поляризацію України, а методи кластеризації та гарячих точок дають змогу її виявити й урахувати. По-друге, у цільовому спрямуванні ресурсів: диференційовані рекомендації для типів регіонів дають змогу уникнути розпорошення коштів на однакові заходи для різних територій. По-третє, у зниженні трудомісткості моніторингу: автоматизований розрахунок показників скорочує час підготовки аналітичних матеріалів з кількох тижнів до кількох годин після оновлення даних. По-четверте, у прозорості: відкритий алгоритм і загальнодоступні результати підвищують довіру до рішень і дають змогу громадськості контролювати їх виконання.

Впровадження запропонованої методики та геоінформаційної системи доцільно здійснювати поетапно (табл. 3.7). На першому етапі – апробація на рівні областей з використанням наявних статистичних даних і відкритого програмного забезпечення; на другому – пілотне застосування на рівні громад однієї-двох областей із залученням даних дистанційного зондування Землі; на

третьому – масштабування на всю територію країни та інтеграція з національною інфраструктурою геопросторових даних.

Таблиця 3.7

Етапи впровадження методики геопросторового аналізу сталого розвитку територій

Етап	Зміст робіт	Результат
I. Апробація на рівні областей (6 міс.)	Формування бази показників за останні доступні роки, розрахунок індексів, кластерів і гарячих точок, підготовка методичних рекомендацій	Щорічний аналітичний звіт про просторову структуру сталого розвитку регіонів
II. Пілотування на рівні громад (12 міс.)	Розрахунок показників громад 1–2 областей з використанням ДЗЗ і відкритих реєстрів, навчання фахівців органів влади	Типологія громад, рекомендації для стратегій розвитку громад
III. Масштабування та інтеграція (12–24 міс.)	Розгортання веб-геопорталу, автоматизація оновлення, інтеграція з геопорталом НІГД	Регулярний моніторинг сталого розвитку на всіх рівнях управління

Джерело: розроблено автором.

Водночас слід зазначити обмеження проведеного дослідження. Аналіз виконано за даними 2020–2021 років, тобто до повномасштабного вторгнення; сучасна просторова структура сталого розвитку суттєво змінилася внаслідок руйнувань, окупації частини територій, переміщення населення та релокації підприємств. Кількість показників обмежена доступністю порівнянних даних для всіх областей, а рівні ваги показників є спрощенням. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оновлення аналізу за мірою публікації статистичних даних воєнного періоду, розширення системи показників за рахунок даних ДЗЗ, застосування методів регіоналізації з умовою просторової суміжності та географічно зваженої регресії для аналізу чинників сталого розвитку [34].

Отже, адаптація методики до рівня територіальних громад можлива за рахунок поєднання доступних офіційних даних із показниками, отриманими з даних дистанційного зондування Землі та відкритих реєстрів. Запропонований підхід порівняно з традиційним забезпечує інтегральну та просторово орієнтовану оцінку, регулярне оновлення та відтворюваність результатів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі обґрунтовано методичні засади та здійснено практичну апробацію сучасних методів аналізу геопросторових даних для оцінки сталого розвитку територій, а також сформовано рекомендації щодо використання отриманих результатів в управлінні. Результати дослідження дають змогу сформулювати такі висновки.

1. Сталий розвиток території є процесом збалансованої зміни її економічної, соціальної та екологічної підсистем, за якого зростання добробуту населення не перевищує природно-ресурсного потенціалу та асиміляційної здатності довкілля. Україна адаптувала глобальні Цілі сталого розвитку Указом Президента № 722/2019 та інтегрувала їх у Державну стратегію регіонального розвитку на 2021–2027 роки. Узагальнено підходи до вимірювання сталого розвитку – системи окремих індикаторів, композитні індекси, індекс сталого розвитку з урахуванням гармонійності вимірів та геопросторовий інтелектуальний аналіз – і обґрунтовано доцільність поєднання композитних індексів з методами просторового аналізу.

2. Геопросторові дані поєднують просторову, атрибутивну та часову складові й характеризуються просторовою автокореляцією, неоднорідністю та залежністю від масштабу і способу агрегування. Для аналізу сталого розвитку використовують офіційну статистику, державні реєстри та кадастри, дані дистанційного зондування Землі (Sentinel, VIIRS), добровільну географічну інформацію та великі дані, інтеграцію яких забезпечують інфраструктури геопросторових даних (INSPIRE, IGIF ООН, національна інфраструктура геопросторових даних України).

3. Сучасні методи аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку охоплюють методи просторової автокореляції (індекс Морана, LISA, Getis-Ord Gi*), кластеризації та регіоналізації (k-середніх, Уорда, самоорганізаційні карти), геостатистики (крігінг, інтерполяція) та машинного навчання. Їх поєднання дає змогу перейти від рейтингування територій до виявлення просторових закономірностей і типізації.

4. Сформовано інформаційну базу для оцінки сталого розвитку 22 областей України за 2020–2021 роки з восьми показників трьох вимірів: економічного (ВРП, заробітна плата, капітальні інвестиції на особу), соціального (рівень безробіття, природний приріст) та екологічного (лісистість, частка ПЗФ, щільність викидів). Розроблено п'ятиетапну методику, що включає нормалізацію, розрахунок композитних індексів і гармонійності, побудову матриці суміжності, аналіз просторової автокореляції та кластеризацію.

5. Інтегральний індекс сталого розвитку областей коливається від 0,210 (Кіровоградська) до 0,683 (Київська) за середнього значення 0,422. Виявлено від'ємний зв'язок між економічним та екологічним вимірами ($r = –0,61$), що свідчить про збереження ресурсомісткої моделі економічного зростання. Глобальний індекс Морана для інтегрального індексу є статистично незначущим ($I = 0,039$; $p = 0,257$), тоді як соціальний ($I = 0,265$; $p = 0,020$) та екологічний ($I = 0,401$; $p = 0,001$) виміри мають значущу позитивну просторову автокореляцію. Це свідчить про компенсаційний характер просторової структури сталого розвитку, за якого регіональні закономірності окремих вимірів приховуються на рівні інтегрального індексу.

6. Кластеризація методом k-середніх дала змогу виділити чотири типи областей: економічно розвинені з екологічним дефіцитом (Київська, Дніпропетровська, Полтавська, Запорізька, Миколаївська), соціально-економічно збалансовані (Львівська, Одеська, Харківська, Вінницька), еколого-соціальні з низьким економічним виміром (Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Рівненська, Волинська) та аграрні з низьким соціальним виміром (вісім областей). Аналіз гарячих точок Getis-Ord Gi* виявив просторову поляризацію України: гарячі точки соціального та екологічного вимірів на заході країни і холодні точки екологічного виміру в степовій та лісостеповій зоні, тоді як економічний вимір має дзеркальну структуру.

7. Обґрунтовано диференційовані рекомендації для кожного типу регіонів з визначенням конкурентних переваг, пріоритетів вирівнювання, напрямів політики та індикаторів моніторингу, а також запропоновано міжрегіональні

ініціативи на основі результатів аналізу гарячих точок, зокрема програму полезахисного лісорозведення для холодної точки екологічного виміру.

8. Запропоновано чотирирівневу архітектуру геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого розвитку територій (рівні даних, обробки, аналітики та подання), склад її тематичних шарів, включно з шарами воєнних наслідків, та технологічну реалізацію на основі програмного забезпечення з відкритим кодом з інтеграцією з національною інфраструктурою геопросторових даних.

9. Розроблено систему показників для адаптації методики до рівня територіальних громад із залученням даних дистанційного зондування Землі та відкритих реєстрів. Порівняння з традиційним підходом засвідчило, що запропонований підхід забезпечує інтегральну та просторово орієнтовану оцінку, регулярне автоматизоване оновлення та відтворюваність результатів, що підвищує обґрунтованість і прозорість управлінських рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на оновлення аналізу з використанням даних воєнного періоду, розширення системи показників за рахунок даних дистанційного зондування Землі та застосування методів регіоналізації з умовою просторової суміжності на рівні територіальних громад.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Путренко В. В. Методологія інтелектуального аналізу геопросторових даних для задач сталого розвитку : дис. … д-ра техн. наук : 01.05.04. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 449 с.

2. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019

3. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки : Постанова Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 № 695. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п

4. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20

5. Про Державний земельний кадастр : Закон України від 07.07.2011 № 3613-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17

6. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14

7. Про засади державної регіональної політики : Закон України від 05.02.2015 № 156-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-19

8. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development : Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 A/RES/70/1. New York : United Nations, 2015. 35 p.

9. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Oxford : Oxford University Press, 1987. 400 p.

10. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union. 2007. L 108. P. 1–14.

11. Integrated Geospatial Information Framework. Part 1: Overarching Strategic Framework. New York : UN-GGIM, World Bank, 2018. 36 p.

12. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. Paris : OECD, JRC, 2008. 158 p.

13. Згуровський М. З. та ін. Аналіз сталого розвитку – глобальний і регіональний контексти. Ч. 2. Україна в індикаторах сталого розвитку. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 200 с.

14. Цілі сталого розвитку: Україна : національна доповідь. Київ : Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 2017. 176 с.

15. Цілі сталого розвитку: Україна : добровільний національний огляд. Київ : Кабінет Міністрів України, 2020. 110 с.

16. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Science and Systems. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2015. 496 p.

17. Burrough P. A., McDonnell R. A., Lloyd C. D. Principles of Geographical Information Systems. 3rd ed. Oxford : Oxford University Press, 2015. 352 p.

18. Світличний О. О., Плотницький С. В. Основи геоінформатики : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2006. 295 с.

19. Кохан С. С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник. Київ : Вища школа, 2009. 511 с.

20. Tobler W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. Economic Geography. 1970. Vol. 46. P. 234–240.

21. Moran P. A. P. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. Biometrika. 1950. Vol. 37, No. 1/2. P. 17–23.

22. Anselin L. Local Indicators of Spatial Association – LISA. Geographical Analysis. 1995. Vol. 27, No. 2. P. 93–115.

23. Getis A., Ord J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. Geographical Analysis. 1992. Vol. 24, No. 3. P. 189–206.

24. Ord J. K., Getis A. Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. Geographical Analysis. 1995. Vol. 27, No. 4. P. 286–306.

25. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1967. Vol. 1. P. 281–297.

26. Ward J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58, No. 301. P. 236–244.

27. Rousseeuw P. J. Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics. 1987. Vol. 20. P. 53–65.

28. Kohonen T. Self-Organizing Maps. 3rd ed. Berlin : Springer, 2001. 501 p.

29. Matheron G. Principles of Geostatistics. Economic Geology. 1963. Vol. 58, No. 8. P. 1246–1266.

30. Goodchild M. F. Citizens as Sensors: the World of Volunteered Geography. GeoJournal. 2007. Vol. 69, No. 4. P. 211–221.

31. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.

32. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 25–36.

33. Miller H. J., Han J. Geographic Data Mining and Knowledge Discovery. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2009. 486 p.

34. Fotheringham A. S., Brunsdon C., Charlton M. Geographically Weighted Regression: the Analysis of Spatially Varying Relationships. Chichester : Wiley, 2002. 282 p.

35. Openshaw S. The Modifiable Areal Unit Problem. Concepts and Techniques in Modern Geography No. 38. Norwich : Geo Books, 1984. 41 p.

36. Elvidge C. D., Baugh K., Zhizhin M., Hsu F. C., Ghosh T. VIIRS Night-time Lights. International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38, No. 21. P. 5860–5879.

37. Anselin L., Syabri I., Kho Y. GeoDa: an Introduction to Spatial Data Analysis. Geographical Analysis. 2006. Vol. 38, No. 1. P. 5–22.

38. Rey S. J., Anselin L. PySAL: a Python Library of Spatial Analytical Methods. The Review of Regional Studies. 2007. Vol. 37, No. 1. P. 5–27.

39. Карпінський Ю. О., Лященко А. А. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні. Київ : НДІГК, 2006. 108 с.

40. Шаблій О. І. Суспільна географія: теорія, історія, українознавчі студії. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2001. 744 с.

41. Національний атлас України / гол. ред. Л. Г. Руденко. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.

42. Валовий регіональний продукт у розрахунку на одну особу за регіонами України у 2021 році. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_3_1.html (дата звернення: 20.10.2026).

43. Населення регіонів України у 2021 році. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_2_1.html (дата звернення: 20.10.2026).

44. Ринок праці регіонів України у 2021 році. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_2_2.html (дата звернення: 20.10.2026).

45. Капітальні інвестиції за регіонами України. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_3_8.html (дата звернення: 20.10.2026).

46. Природні ресурси регіонів України. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_4_1.html (дата звернення: 20.10.2026).

47. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря за регіонами України у 2021 році. Головне управління статистики у Львівській області. URL:

https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/chapter_4_2.html (дата звернення: 20.10.2026).

48. Територія та лісистість адміністративно-територіальних одиниць України : додаток до листа Держлісагентства від 09.11.2021. URL: https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36973.pdf (дата звернення: 20.10.2026).

49. Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних : Постанова Кабінету Міністрів України від 26.05.2021 № 532. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-п

50. Regulation (EU) 2021/696 of the European Parliament and of the Council of 28 April 2021 establishing the Union Space Programme and the European Union Agency for the Space Programme. Official Journal of the European Union. 2021. L 170. P. 69–148.

51. QGIS User Guide : офіційна документація QGIS. URL: https://docs.qgis.org (дата звернення: 20.10.2026).

52. OGC GeoPackage Encoding Standard. Version 1.4.0. Open Geospatial Consortium. URL: https://www.geopackage.org (дата звернення: 20.10.2026).

53. Shekhar S., Chawla S. Spatial Databases: a Tour. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. 262 p.

54. Bivand R. S., Pebesma E., Gómez-Rubio V. Applied Spatial Data Analysis with R. 2nd ed. New York : Springer, 2013. 405 p.

55. Isaaks E. H., Srivastava R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York : Oxford University Press, 1989. 561 p.