

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ ТА ДКА
УКРАЇНИ

**МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ І
ГЛИБИННИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ
ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ**

ЗА РЕДАКЦІЄЮ ПРОФ. Н.М. КУССУЛЬ,
ПРОФ. А.Ю. ШЕЛЕСТОВА

КИЇВ · НАУКОВА ДУМКА · 2024

УДК 004.932, 528.854

Методи комп'ютерного зору і глибинних нейронних мереж для еколого-економічного аналізу // — Київ: Наукова думка, 2024. — 474 с.
ISBN 978-966-00-1940-9

Монографія містить результати досліджень кафедри математичного моделювання і аналізу даних Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського» для вирішення задач еколого-економічного аналізу на основі сучасних методів комп'ютерного зору і глибинного навчання. В її основу покладено результати національних і міжнародних проєктів МОН України, НФДУ та Horizon Europe.

Запропонована методологія впроваджується у Мінагрополітики та продовольства України, Держстаті, Держгеокадастрі. На міжнародному рівні результати використовуються банком EBRD, центром JRC-EC, платформою UN-SPIDER та програмою NASA Harvest по використанню супутникових даних для сільськогосподарського моніторингу. Монографія є внеском України у програму EuroGEO по інтеграції європейських практик для підтримки прийняття рішень. Наведені результати є основою для розвитку інноваційних проєктів і стартапів по супутниковому моніторингу, екології, сільському господарству та управлінню природними ресурсами.

Монографія буде корисною для науковців, які займаються розробкою та впровадженням інтелектуальних моделей, фахівців із геопросторового аналізу, представників державних органів влади та міжнародних організацій, відповідальних за управління природними ресурсами та екологічний моніторинг. Вона стане цінним ресурсом для студентів, аспірантів та викладачів технічних і природничих спеціальностей.

Підготовлено до друку за підтримки Міністерства освіти і науки України в межах конкурсного проєкту № РН/27-2023 від 25.2023 р. програми зовнішнього інструменту допомоги Євросоюзу.

Рекомендовано до друку вченою радою Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (протокол № 10 від 09.12.2024 р.), вченою радою Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України (протокол №7 від 28.11.2024 р.)

Рецензенти:

член-кореспондент НАН України *О.П. Федоров*
доктор технічних наук, професор *В.В. Лукін*

ISBN 978-966-00-1940-9 © Куссуль Н.М., Шелестов А.Ю., Лавренко А.М., Яйлимов Б.Я., Яйлимова Г.О., Колотій А.В., Дрозд С.Ю., Савін В.В., Мікава П.В., Кириленко І.А., Яворський О.А., Охріменко А.О., Пархомчук О.М., Харь Д.Ф., Волкова Є.А., 2024

ВСТУП

Війна в Україні створила надзвичайні виклики для відновлення країни, особливо у сферах управління природними ресурсами, відбудови інфраструктури та відновлюваної енергетики. У цих умовах критично важливим є впровадження інноваційних технологій для забезпечення стійкого розвитку. Для цього потрібні сучасні методи та математичні моделі еколого-економічного аналізу, що дозволять проводити ефективний моніторинг, прогнозування та підтримку прийняття рішень.

В епоху цифровізації економіки й активного розвитку штучного інтелекту аналіз екологічних та економічних процесів має базуватись на сучасних методах глибинного навчання та комп'ютерного зору. Ці технології дозволяють обробляти великі масиви супутникових і геопросторових даних, забезпечуючи детальний аналіз і прогнозування змін у навколишньому середовищі.

Монографія містить результати досліджень кафедри математичного моделювання і аналізу даних (ММАД) Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського», створеної лише три роки тому. Попри молодий вік, кафедра вже сформувалась як колектив фахівців і однодумців, які розробили комплексну методологію для вирішення актуальних задач у сфері еколого-економічного аналізу на основі сучасних методів комп'ютерного зору і глибинного навчання. Монографію написано на основі результатів національних і міжнародних проєктів, виконаних кафедрою ММАД за підтримки МОН України, НФДУ та Horizon Europe. До всіх цих проєктів активно залучені аспіранти, внесок яких в отриманні результатів важко переоцінити. Всі результати доповідались на авторитетних міжнародних конференціях, значна частина опублікована у рейтингових міжнародних виданнях. У комплексі, монографія описує новітні методи сучасної прикладної математики та науки про дані для вирішення завдань, які стоять перед Україною в умовах сучасних викликів.

Частина 1 монографії «Аналіз сучасного стану методів комп'ютерного зору і глибинних нейронних мереж для еколого-економічного аналізу» містить огляд сучасних методів глибинного навчання та комп'ютерного зору, які застосовуються для розв'язання прикладних задач у сферах екології, економіки та просторового аналізу. У цій частині розглянуто широкий спектр підходів, що включають як класичні архітектури нейронних мереж,

так і новітні алгоритми для обробки великих масивів супутникових даних та 3D реконструкції. У цій частині також обговорюються можливості інтеграції різнорідних даних для підвищення точності прогнозування та моніторингу.

Розділ 1.1 «Аналіз методів та моделей глибинного навчання для розв'язання прикладних задач» висвітлює сучасні методи штучного інтелекту, основу якого складають методи глибинного навчання як ключової технології для розв'язання складних задач. У розділі розглядаються архітектури нейронних мереж, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN) для аналізу супутникових зображень, рекурентні нейронні мережі (RNN) для роботи з часовими рядами, а також трансформери та графові нейронні мережі (GNN), що дозволяють працювати з просторово-часовими даними. Крім основних концепцій, в цьому розділі приділено увагу практичним аспектам застосування цих методів для задач класифікації ґрунтового покриття, виявлення об'єктів, моніторингу змін у навколишньому середовищі та прогнозування кліматичних змін. Автори аналізують використання генеративних змагальних мереж (GAN) для покращення якості зображень, видалення хмарного покриття та виявлення аномалій. Також обговорюються можливості використання напівкерованого навчання та злиття даних для підвищення точності аналізу супутникових знімків, що є особливо актуальним для екологічного моніторингу та підтримки прийняття рішень у реальних умовах.

Розділ 1.2 «Аналіз методів 3D реконструкції середовища для доповненої реальності» надає огляд сучасних методів тривимірної реконструкції, які є основою для створення доповненої реальності (ДР). Розглядаються методи, що дозволяють створювати точні тривимірні моделі оточення, зокрема шляхом аналізу зображень та відновлення їхньої глибини. Описані підходи включають використання монокулярного зображення, стереозображень, багатовидового стереозіставлення (Multi-View Stereo, MVS), а також структуру з руху (Structure from Motion, SfM), які забезпечують високу точність при роботі з двовимірними даними. Крім класичних підходів, у розділі розглянуто новітні методи 3D реконструкції на основі нейронних мереж, які забезпечують автоматизацію процесу, значно знижуючи залежність від ручного налаштування параметрів. В цьому розділі також висвітлено останні тенденції у розробці компактних і легких пристроїв доповненої реальності. Обговорюються переваги та виклики використання таких пристроїв для візуалізації 3D сцен у реальному часі, а також значення правильної реконструкції для

забезпечення реалістичності взаємодії користувачів із доповненими елементами сцени.

Розділ 1.3 «Аналіз методів та моделей комп'ютерного зору та глибинних нейронних мереж для визначення пошкоджень земного покриття» містить огляд сучасних алгоритмів для ідентифікації та моніторингу змін земного покриття, спричинених як природними, так і антропогенними факторами. У розділі розглянуто різні підходи до обробки супутникових зображень, включаючи сегментацію та класифікацію, що базуються на згорткових нейронних мережах (CNN) і трансформерах. Особливу увагу приділено методам автоматичного виявлення пошкоджень. Обговорюється використання даних високої просторової роздільної здатності для підвищення точності аналізу, а також інтеграція різних джерел даних для створення комплексних карт пошкоджень. Також наведено приклади практичного використання методів у задачах оцінки впливу військових дій на довкілля.

Частина 2 «Методи комп'ютерного зору і глибинних нейронних мереж для супутникового інтелекту» присвячена розробці й застосуванню математичних моделей і алгоритмів для аналізу геопросторових і супутникових даних. У цій частині запропоновано методи для виявлення аномалій, обробки незбалансованих даних, оптимізації розмітки графових структур, а також підвищення просторової роздільної здатності зображень. Значна увага приділяється задачам сегментації, класифікації та поліпшення якості даних, що є ключовими для аналізу земного покриття, сільськогосподарських угідь та екологічного моніторингу. Розроблені підходи вирішують практичні проблеми, що виникають під час роботи з великими масивами супутникових даних, включаючи поступове надходження інформації та необхідність збереження її інтерпретованості. Описані алгоритми дозволяють підвищити точність моделей, ефективно працюючи навіть за умов обмеженості даних. Представлені у частині 2 методи є результатом наукових досліджень, проведених на кафедрі математичного моделювання і аналізу даних НТУУ "КПІ імені Сікорського" в межах національних і міжнародних проектів за підтримки МОН України, НФДУ та Horizon Europe.

В розділі 2.1 «Метод виявлення аномалій в даних навчання моделей комп'ютерного зору на основі методів кластеризації» запропоновано підхід до виявлення неоднозначних та ненадійних даних, що можуть впливати на якість моделі машинного навчання. Описаний метод на основі алгоритму К найближчих сусідів (KNN)

дозволяє ідентифікувати екземпляри, які важко класифікувати через перекриття класів або наявність нетипових ознак. Проілюстровано застосування цього методу для задачі попиксельної класифікації сільськогосподарських культур, на основі використання багатоспектральних супутникових зображень. Запропонований підхід дозволяє покращити якість навчальних даних шляхом виявлення ненадійних пікселів та оптимізації наборів навчальних даних.

В розділі 2.2 «Методи сегментації зображень різної природи для випадку незбалансованого набору» запропоновано метод вирішення проблеми дисбалансу класів у навчальних даних в моделях машинного навчання. В основі підходу лежить генерація синтетичних зображень за допомогою генеративних змагальних мереж (GAN), зокрема архітектури $pix2pix$, що дозволяє створювати реалістичні дані з урахуванням багатоспектральних і текстурних характеристик. Це забезпечує підвищення точності сегментації для різних типів зображень – від супутникових знімків до медичних даних. Автор удосконалює класичний метод вагових масок та пропонує модифікацію функції втрат для покращення роботи з незбалансованими вибірками, що забезпечує значне зменшення похибок і підвищення ефективності моделей у складних задачах.

В розділі 2.3 « $1+\lambda$ GP encodings: еволюційний алгоритм для безпечної роботи з даними різних модальностей» запропоновано алгоритм $1+\lambda$ з GP-кодуванням для класифікації даних із підвищеними вимогами до безпеки та інтерпретованості. Метод забезпечує точність і стабільність роботи з різними типами даних, знижуючи ризики, пов'язані з проблемою «чорної скриньки». Модифікації алгоритму, включаючи перезапуск, кешування та кросовер, підвищують продуктивність і запобігають локальним мінімумам. Порівняльний аналіз демонструє переваги цього підходу в задачах класифікації медичних та табличних даних, забезпечуючи вищу точність і кращу інтерпретованість, ніж стандартні методи.

В розділі 2.4 «Задача розмітки на деревах для поступового надходження даних» представлено підхід до вирішення задач оптимальної розмітки дерев, коли дані надходять поступово, а не повністю доступні на початку обчислень. Така ситуація часто виникає через обмеження каналів зв'язку або через специфіку практичних задач, де збір даних займає значний час. Основна ідея методу полягає в модифікації графу, що відповідає дереву, таким

чином, щоб проводити попередні обчислення над уже отриманими даними. Це дозволяє зменшити кількість необхідних операцій після отримання всіх даних. Крім теоретичних аспектів, у розділі 2.4 розглядаються практичні приклади, такі як задача стереозору, де необхідно відновити тривимірну структуру сцени за двома зображеннями. Експерименти показують, що запропонований алгоритм значно скорочує час обробки даних у порівнянні з традиційними підходами, особливо у випадках, коли дані надходять із затримкою.

Розділ 2.5 «Генеративні мережі для підвищення просторового розрізнення супутникових даних на основі трансформерів з увагою» присвячений методам підвищення просторового розрізнення супутникових зображень, зокрема з використанням генеративних змагальних мереж (GAN) та трансформерів з блоками уваги. У цьому розділі розглядається задача підвищення просторового розрізнення (суперрезолюції) для супутникових даних середнього та високого просторового розрізнення, що дозволяє отримувати більш детальні зображення з розрізненням 10 м із вихідних даних розрізненням 20 м або 30 м. Запропонований метод використовує сучасні GAN-моделі з компонентами channel attention та self-attention для більш точного урахування взаємозв'язків між спектральними каналами, що особливо корисно для аналізу рослинності та ландшафтів. Це підвищує якість обробки супутникових даних, дозволяючи застосовувати результати в прикладних дослідженнях. Експерименти показали ефективність методу, зокрема для обробки різних типів покриву — сільськогосподарських угідь, лісів та водних ресурсів.

Частина 3 «Прикладні задачі супутникового інтелекту на мультимодальних даних» присвячена застосуванню розробленої у частині 2 методології для вирішення реальних задач в енергетиці, інфраструктурному плануванні, моніторингу економічної активності та управлінні природними ресурсами. Використання супутникових даних, графових моделей і методів машинного навчання дозволяє проводити комплексний аналіз і підтримувати прийняття рішень на різних рівнях. Представлені приклади демонструють, як авторські методи, розроблені на кафедрі математичного моделювання і аналізу даних НТУУ «КПІ», успішно використовуються для розв'язання прикладних задач у вітчизняних і міжнародних проєктах за підтримки МОН України, НФДУ та Horizon Europe.

В розділі 3.1 «Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних електростанцій на території України» запропоновано

комплексний підхід до вибору територій, де встановлення сонячних електростанцій буде найефективнішим. Аналізуються наслідки війни для енергетичного сектору України та підкреслюється важливість розвитку відновлюваних джерел енергії для забезпечення енергетичної незалежності. Запропонований метод багатокритеріального аналізу враховує кліматичні, топографічні та економічні фактори. Результати дослідження свідчать, що південні та центральні регіони мають найвищий потенціал, тоді як Карпати та Полісся менш придатні через обмежену сонячну радіацію та складний рельєф.

В розділі 3.2 «**Моделювання розвитку інфраструктури сіл на основі графових даних**» представлено графові моделі для планування та оцінки інфраструктури сільських територій. Інфраструктурна мережа представлена як граф, де вузли — це об'єкти інфраструктури, а ребра — транспортні чи комунікаційні зв'язки. Основна увага приділяється оцінці доступності об'єктів, виявленню регіональних дисбалансів і кластеризації мереж для виявлення зон із подібними проблемами. Запропонований підхід дозволяє розробляти рекомендації щодо пріоритетного розвитку інфраструктури, що підтверджено аналізом на реальних даних.

В розділі 3.3 «**Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних**» наведено приклади задач щодо використання супутникових даних та інших геопросторових джерел для моніторингу економічної активності. В умовах обмеженості традиційних статистичних даних, зокрема під час війни або інших кризових ситуацій, застосування альтернативних непрямих індикаторів, таких як нічне освітлення, якість повітря та землекористування, дозволяє отримувати оперативні оцінки економічної діяльності. Особливу увагу приділено аналізу впливу військових дій на регіональну економіку, зокрема в аграрному секторі. Супутникові дані використовуються для виявлення пошкоджень, оцінки площ сільськогосподарських земель та прогнозування врожаїв. Застосування цих методів дозволяє підтримувати прийняття рішень щодо відновлення та розвитку економіки в умовах сучасних викликів.

В розділі 3.4 «**Класифікації типів земного покриття та землекористування на основі супутникових даних з використанням Transfer Learning**» досліджується застосування трансферного навчання для створення карт класифікації земного покриття в умовах обмеженості наземних даних. Використання моделей, навчених на інших територіях, дозволяє покращити точність класифікації в регіонах зі схожими характеристиками. Порівняння

методів, зокрема fine-tuning і екстракції ознак, для супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2 показало, що комбіновані моделі та ансамблювання значно підвищують ефективність класифікації, особливо для сільськогосподарських угідь і регіонів, для яких недостатньо даних для навчання.

Частина 4 «Сучасні інформаційні технології для комп'ютерного зору і глибоких нейронних мереж» охоплює сучасні інформаційні технології інтеграції, обробки та представлення геопросторових даних. Детально розглянуто можливості хмарних платформ і геопорталів, які забезпечують обробку великих обсягів інформації з різних джерел. Особливу увагу приділено інструментам для спільної роботи з даними. Хмарні сервіси та геопортали забезпечують зручний доступ до даних і необхідні інструменти для створення інтерактивних рішень, що дозволяють працювати без розгортання локальної інфраструктури.

Розділ 4.1 «Сучасні підходи до злиття та гармонізації різнорідних геопросторових даних» висвітлює використання хмарних платформ для інтеграції даних із різних джерел. Зокрема, Google Earth Engine (GEE) та CREODIAS забезпечують масштабованість, доступ до великих архівів супутникових зображень і інструменти для аналізу й візуалізації. Концепція Analysis Ready Data (ARD) спрощує роботу з попередньо обробленими даними, що особливо важливо для досліджень екології та управління ресурсами. Розглянуто функціонал платформ, включаючи аналіз часових рядів, розрахунок індексів на основі супутникових даних та інші інструменти, які сприяють екологічному моніторингу та прогнозуванню. Підкреслюється значення хмарних платформ для ефективного злиття даних, що розширює можливості досліджень без потреби в локальній інфраструктурі.

В розділі 4.2 «Засоби публікації та представлення геопросторових даних в Інтернет» обговорюються підходи та засоби для публікації й візуалізації геопросторових даних через геопортали. Геопортали забезпечують доступ до картографічної інформації та дозволяють користувачам взаємодіяти з різними типами даних. Розділ містить огляд компонентів для створення ефективних геопорталів, включаючи серверні інструменти для обробки даних (GeoServer, MapServer, QGIS Server) та клієнтські бібліотеки JavaScript (Leaflet, OpenLayers, Mapbox GL JS), які дозволяють створювати інтерактивні карти та налаштовувати інтерфейси користувача для роботи з картографічними шарами.

Таким чином, дана монографія представляє комплекс сучасних математичних методів та інструментів для вирішення

актуальних задач моніторингу природних ресурсів і економічного розвитку. Запропонована методологія та отримані результати активно впроваджуються у діяльність ключових державних установ, зокрема Міністерства аграрної політики та продовольства України, Державної служби статистики України, Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр). На міжнародному рівні результати використовуються такими організаціями, як Світовий банк, Об'єднаний дослідницький центр Європейської Комісії (JRC EC), платформа UN-SPIDER, а також у рамках програми NASA Harvest, яка зосереджена на застосуванні супутникових даних для сільськогосподарського моніторингу. Монографія є внеском України у програму EuroGEO, спрямовану на інтеграцію європейських геопросторових даних для підтримки прийняття рішень.

Отримані результати можуть слугувати основою для розвитку інноваційних проєктів і стартапів у галузях супутникового моніторингу, екології, сільського господарства та управління природними ресурсами.

Монографія буде корисною для науковців, які займаються розробкою та впровадженням моделей глибинного навчання, фахівців із геопросторового аналізу, представників державних органів влади та міжнародних організацій, відповідальних за управління природними ресурсами та моніторинг екологічних змін. Крім того, вона стане цінним ресурсом для студентів, аспірантів та викладачів технічних і природничих спеціальностей.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Частина 1. Аналіз сучасного стану методів комп'ютерного зору і глибинних нейронних мереж для еколого-економічного аналізу.....	11
Розділ 1. Аналіз методів та моделей глибинного навчання для розв'язання прикладних задач	11
Вступ	11
1.1. Визначення штучного інтелекту.....	13
1.2. Машинне навчання	13
1.3. Огляд моделей та методів глибинного навчання для супутникового моніторингу	16
1.4. Згорткові нейронні мережі (CNN).....	17
1.5. Рекурентні нейронні мережі (RNN)	22
1.6. Генеративні змагальні мережі.....	24
1.7. Використання генеративних змагальних мереж у супутниковому моніторингу	25
1.8. Трансформери	27
1.9. Графова нейронна мережа (GNN)	29
Висновки	35
Перелік посилань.....	37
Розділ 2. Аналіз методів 3D реконструкції середовища для доповненої реальності	49
Вступ	49
2.1. Тривимірна реконструкція як важлива складова доповненої реальності	50
2.2. Методи реконструкції карти глибини по 2D даним.....	53
2.2.1. Лінійна перспектива.....	54
2.2.2. Атмосферне розсіювання.....	55
2.2.3. Розуміння форми по затіненню	56
2.2.4. Бінокулярний диспарат	56
2.2.5. Паралакс руху	57
2.2.6. Розмиття зображення.....	58
2.2.7. Силует (Shape-from-silhouette).....	59
2.2.8. Структура з руху (Structure from Motion – SfM)	60
2.3. Класичні методи 3D реконструкції середовища	61
2.3.1. Відновлення структури з руху для задачі 3D реконструкції	61
2.3.2. Багатовидове стереоспівставлення.....	64
2.3.3. Реконструкція поверхні	66

2.3.4. Поєднання методів SfM, MVS та реконструкції поверхні	66
2.4. Сучасні методи 3D реконструкції середовища	67
2.4.1. HighRes-MVSNet	68
2.4.2. 3D-FHNet	70
2.4.3. Atlas	72
2.4.4. Simplerecon	73
2.4.5. Marigold	75
Висновки	78
Перелік посилань.....	79
Розділ 3. Аналіз методів та моделей комп'ютерного зору та глибинних нейронних мереж для визначення пошкоджень земного покриття	82
Вступ	82
3.1. Методи визначення незаконних звалищ	85
3.2. Методи оцінки пошкоджень внаслідок воєнних дій	94
Висновки	121
Перелік посилань.....	122
Частина 2. Методи комп'ютерного зору і глибинних нейронних мереж для супутникового інтелекту.....	127
Розділ 1. Метод виявлення аномалій в даних навчання моделей комп'ютерного зору на основі методів кластеризації... ..	127
Вступ	127
1.1. Постановка задачі	129
1.2. Розв'язання задачі	132
1.3. Аналіз результатів	134
1.4. Можливості практичного застосування	136
Обговорення і висновки.....	138
Перелік посилань.....	139
Розділ 2. Методи сегментації зображень різної природи для випадку незбалансованого набору.....	143
Вступ	143
2.1. Вдосконалення методу глибинного навчання для класифікації земного покриття та виявлення типу сільськогосподарських культур.....	144
2.1.1. Огляд літератури	144
2.1.2. Постановка задачі.....	146
2.1.3. Розв'язання задачі.....	147
2.1.3.1. Генеративна змагальна мережа.....	149
2.1.3.2. Схема аугментації.....	151
2.1.3.3. Класичний підхід до аугментації	151
2.1.4. Обговорення і висновки	152

2.2. Вдосконалення методу глибинного навчання для сегментації гістологічних зображень	154
2.2.1. Огляд літератури	155
2.2.2. Постановка задачі	156
2.2.3. Розв'язання задачі	157
2.2.3.1. Покращення алгоритму виявлення неоднозначних даних	158
2.2.3.2. Набори вагових масок	161
2.2.3.3. Архітектура моделі та схема експерименту	163
2.2.4. Обговорення і висновки	164
Висновки	166
Перелік посилань	168
Розділ 3. $1+\lambda$ GP encodings еволюційний алгоритм для безпечної роботи з даними різних модальностей	172
Вступ	172
3.1. $1+\lambda$ еволюційний алгоритм з GP кодуванням	173
3.2. Постановка задачі та запропонований підхід	176
3.3. Набори даних	178
3.4. Особливості навчання	181
3.5. Аналіз результатів експериментів	183
3.6. Аналіз результатів	186
Висновки	187
Перелік посилань	188
Розділ 4. Задача розмітки на деревах для поступового надходження даних	192
Вступ	192
4.1. Задача розмітки на деревах	193
4.1.1. Постановка задачі	193
4.1.2. Зведення задачі пошуку оптимальної розмітки дерева до задачі пошуку найкращого шляху на графі спеціального вигляду	193
4.2. Задача розмітки для випадку поступового надходження даних	196
4.2.1. Задача розмітки для випадку поступового надходження даних	197
4.3. Застосування запропонованого методу на прикладі задачі стереозору	202
4.3.1. Задача стереозору	202
4.3.2. Пошук карти глибини при повних даних	203
4.3.3. Зведення задачі до пошуку найкоротшого шляху на графі	205

4.3.4. Пошук карти глибини при поступовому надходженні даних	206
4.3.5. Неупорядковане надходження даних. Найгірший випадок	209
4.3.6. Практичний аналіз роботи запропонованого методу на прикладі задачі стереозору	210
4.4. Результати	212
4.5. Подальші дослідження	213
Висновки	213
Перелік посилань	214
Розділ 5. Генеративні мережі для підвищення просторового розрізнення супутникових даних на основі трансформерів з увагою (transformers with attention)	216
Вступ	216
5.1. Огляд літератури	219
5.2. Постановка задачі	223
5.3. Розв'язання задачі	223
5.4. Аналіз результатів	228
Висновки	234
Перелік посилань	238
Частина 3. Прикладні задачі супутникового інтелекту на мультимодальних даних	242
Розділ 1. Визначення оптимальних місць для розміщення сонячних електростанцій на території України	242
Вступ	242
1.1. Огляд літератури	243
1.2. Постановка задачі	245
1.3. Використані дані	246
1.4. Опис методології	250
1.5. Нечітка логіка для нормалізації вхідних геопросторових даних	252
1.6. Визначення вагових коефіцієнтів за допомогою методу попарних порівнянь	258
1.7. Модель зваженої суми	261
1.8. Оцінка придатності земель України для встановлення сонячних електростанцій	262
Висновки	265
Перелік посилань	266
Розділ 2. Моделювання розвитку інфраструктури сіл на основі графових даних	269
Вступ	269
2.1. Сучасні підходи до оцінки розвитку сільських громад	269

2.1.1. Геопросторова характеристика сільських поселень у провінції Цзянсі	271
2.1.2. Геопросторовий аналіз якості життя у сільських районах України	273
2.1.3. Геопросторові технології для картографування та аналізу поселень в Індії.....	275
2.1.4. Просторово-часовий аналіз глобальних даних про міські будівлі в OSM	276
2.1.5. Кластеризація графових даних	278
2.2. Постановка задачі оцінки розвитку сільської інфраструктури.	279
2.3. Використані дані.....	280
2.4. Методології розв'язання задачі кластеризації.....	284
2.5. Методи візуалізації геопросторових даних	293
2.5.1. Візуалізація результатів кластерного аналізу.....	298
2.5.2. Оптимізація оцінок доступності на основі графових даних	316
2.6. Обговорення.....	325
Висновки	327
Перелік посилань.....	329
Розділ 3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних	332
Вступ	332
3.1. Виявлення ознак економічної діяльності в регіонах за даними різної природи.....	333
3.1.1. Оцінка динаміки економічної діяльності за якістю повітря	333
3.1.2. Оцінка динаміки економічної діяльності за нічним освітленням.....	337
3.1.3. Моніторинг економічної діяльності з використанням різномірних геопросторових даних та супутникових даних підвищеного розрізнення в умовах війни	345
3.1.4. Моніторинг пошкоджень полів з використанням різномірних геопросторових даних та супутникових даних підвищеного розрізнення в умовах війни	355
3.1.5. Використані дані	358
3.1.6. Методологія порівняння використання даних різного просторового розрізнення	360
3.1.7. Результат використання даних різного розрізнення	363
Висновки	372
Перелік посилань.....	374

Розділ 4. Класифікації типів земного покриття та землекористування на основі супутникових даних з використанням Transfer Learning	380
Вступ	380
4.1. Аналіз методів Transfer Learning для класифікації земного покриття	381
4.2. Постановка задачі	384
4.3. Дані та територія досліджень	384
4.4. Проведення експериментів	387
4.5. Імплементация моделі машинного навчання з багатовимірним векторним виходом на основі Transfer Learning на хмарній платформі AWS	394
Висновки	399
Перелік посилань	400
Частина 4. Сучасні інформаційні технології для комп'ютерного зору і глибоких нейронних мереж	403
Розділ 1. Сучасні підходи до злиття та гармонізації різнорідних геопросторових даних	403
Вступ	403
1.1. Хмарні платформи як інструмент гармонізації різнорідних даних	404
1.2. Інфраструктура Google Earth Engine	405
1.3. Інфраструктура CREODIAS	409
Висновки	414
Перелік посилань	415
Розділ 2. Засоби публікації та представлення геопросторових даних в Інтернет	417
Вступ	417
2.1. Огляд порталів	418
2.2. Серверна частина	420
2.2.1. GeoServer	420
2.2.2. MapServer	422
2.2.3. QGIS Server	424
2.3. Клієнтські бібліотеки	426
2.3.1. Leaflet	426
2.3.2. OpenLayers	438
2.3.3. Mapbox GL JS	445
2.4. Готові до використання рішення (MapBender)	454
Висновки	462
Перелік посилань	464
Післямова	466
ЗМІСТ	468

Наукове видання

**ЗА РЕДАКЦІЄЮ
КУССУЛЬ Наталії Миколаївни
ШЕЛЕСТОВА Андрія Юрійовича**

**МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ І
ГЛИБИННИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ
ДЛЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО
АНАЛІЗУ**