МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет біології, географії та екології
Кафедра географії та екології

ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА ДИНАМІКУ РОЗПОДІЛУ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ: ВИКОРИСТАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ

Кваліфікаційна робота (проєкт)
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Виконав: здобувач 2 курсу 05-213М групи
Спеціальності 103 Науки про Землю
Освітньо-наукової програми «Науки про Землю»
Шевченко Владислав Романович

Керівник: к.геогр.н., доцент Молікевич Р.С.
Рецензент: старший науковий співробітник
науково-дослідного відділу
НПП «Нижньодніпровський» Кліменко В.М.

Івано-Франківськ – 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ. СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ…… 3
ВСТУП…….. 4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ТА ЇХ НАСЛІДКІВ……. 7
1.1 Хронологія змін кліматичних умов у четвертинному періоді… 7
1.2 Наслідки змін кліматичних умов…….. 9
1.3 Підходи до дослідження змін кліматичних умов та їх наслідків. 12
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА РОЗПОДІЛ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ……. 17
2.1 Геопросторові методи аналізу рослинного покриву: огляд сучасних підходів……. 17
2.2 Приклади досліджень впливу змін клімату на рослинність у різних регіонах світу…… 24
2.3 Застосування супутникових даних та ГІС для аналізу змін рослинного покриву……. 29
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОПРОСТОРОВИХ МЕТОДІВ НА ПРИКЛАДІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ…….. 32
3.1 Загальна характеристика Чорнобильської зони…….. 32
3.2 Аналіз змін рослинного покриву в динаміці…… 34
3.3 Сценарний аналіз майбутньої динаміки рослинного покриву Чорнобильської зони…… 40
ВИСНОВКИ…… 43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЧАЕС – Чорнобильська атомна електростанція

АЕС – атомна електростанція

ЧЗВ – Чорнобильська зона відчуження.

НАСА – Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

ГІС – географічні інформаційні системи

NDVI – нормалізований диференційний індекс рослинності

NBR – нормалізований індекс вигорілих територій

SAVI – індекс вегетації з урахуванням впливу ґрунту

EVI – покращений вегетаційний індекс

GCM – глобальна кліматична модель

RCM – регіональна кліматична модель

ВСТУП

Актуальність дослідження. Дослідження впливу зміни кліматичних умов на динаміку розподілу рослинного покриву в Чорнобильській зоні відчуження є актуальним у зв'язку з унікальними умовами формування екосистем у посткатастрофному середовищі.

Територія зони відчуження, в якій зменшений антропогенний тиск, стала своєрідною лабораторією природної ренатуралізації. У поєднанні з кліматичними змінами це створює унікальні умови для дослідження адаптацій флори, трансформації ландшафтів та зміни біорізноманіття.

Геопросторові аналітичні методи дають змогу ефективно вивчати просторову динаміку рослинного покриву, виявляти зони деградації чи відновлення та формувати науково обґрунтовані рекомендації з управління цією територією.

Мета роботи: Проаналізувати зміни у рослинному покриві Чорнобильської зони відчуження під впливом кліматичних змін із використанням геопросторових аналітичних методів.

Завдання:

1. Вивчити особливості природного середовища та екосистем Чорнобильської зони.
2. Проаналізувати кліматичні зміни в регіоні протягом останніх десятиліть.
3. Визначити характер динаміки флористичного складу на основі ГІС-даних і супутникових знімків.
4. Розрахувати індекси вегетації (NDVI) та інші показники для оцінки стану рослинного покриву.
5. Встановити зв'язок між змінами клімату та адаптацією рослинності до умов зони відчуження.
6. Запропонувати рекомендації щодо моніторингу та охорони відновлюваних екосистем.

Об'єкт дослідження: Територія Чорнобильської зони відчуження.

Предмет дослідження: Динаміка рослинного покриву в умовах кліматичних змін і пострадіаційного середовища.

Методи дослідження: Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань нами використовувалися наступні методи:

Метод аналізу літературних джерел – для вивчення теоретичних основ геоботаніки та кліматології;

ГІС-аналіз – для просторового аналізу змін у рослинному покриві;

*Аналіз супутникових знімків (Landsat, Sentinel***)** – для виявлення змін NDVI та інших індексів вегетації;

Метод картографування – для побудови карт сучасного та історичного стану рослинності;

Метод порівняння кліматичних параметрів – з метою встановлення залежностей між температурою, кількістю опадів і типами рослинності.

Статистичний аналіз кліматичних даних.

Теоретичне значення дослідження. Дослідження розширює знання про механізми природної ренатуралізації, флористичну динаміку в умовах ізоляції та адаптацію екосистем до зміни клімату на радіоактивно забруднених територіях.

Практичне значення дослідження*:* Результати дослідження можуть бути застосовані для планування довгострокового моніторингу Чорнобильської зони, розробки екологічних стратегій, моделювання біологічного відновлення та збереження флори в екстремальних умовах.

Апробація результатів дослідження. За результатами дослідження опублікована стаття на тему «Інтеграція кліматичних даних у геопросторовий аналіз для прогнозування змін рослинного покриву» в електронному альманасі «Магістерські студії» (Випуск XXIV).

Структура кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота складається зі вступу, основної частини (3 розділи), висновків, списку використаних джерел.

Вступ. У відповідному структурному підрозділі зазначено актуальність дослідження змін клімату, визначено мету, завдання, об’єкт і предмет роботи, а також обґрунтовано наукову новизну та практичне значення.

Розділ 1. У даному підрозділі розкрито теоретичні засади вивчення кліматичних змін і їхнього впливу на рослинний покрив, а також окреслено понятійний апарат і хронологію кліматичних коливань.

Розділ 2. У межах відповідної структурної складової описано методику дослідження змін вегетації з використанням супутникових індексів та кліматичних даних.

Розділ 3. У межах даного розділу проаналізовано природні умови Чорнобильської зони, зміну рослинного покриву за індексом NDVI, вплив клімату та лісових пожеж, а також здійснено сценарне прогнозування.

Висновки. Представлені найбільш важливі та узагальнені результати проведеного дослідження.

Кваліфікаційна робота написана на 42 сторінках основного тексту, 48 сторінках загального тексту та містить у собі 5 таблиць, 9 рисунків, 3 формули, 41 найменування використаних джерел літератури.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ТА ЇХ НАСЛІДКІВ

1.1. Хронологія змін кліматичних умов у четвертинному періоді

Четвертинний період, або антропоген, що розпочався приблизно 2,58 млн років тому і триває дотепер, вирізняється особливою динамічністю кліматичних змін, які справили суттєвий вплив на еволюцію природного середовища, флори та фауни планети. Це період інтенсивних кліматичних коливань, чергування холодних і теплих фаз, які відображаються в глобальному масштабі і мають чітко простежувані наслідки у геологічному та біологічному контексті.

Протягом антропогену відбулося кілька циклів глобального зледеніння, які змінювались періодами інтергляціалу. Ці цикли зумовлювали значні зміни у рівні Світового океану, характері атмосферної циркуляції, біогеографічному розподілі рослинних формацій та структури ландшафтів. Такі зміни мали як довгостроковий, так і короткочасний характер, впливаючи на еволюцію людства, зміну способу життя первісних суспільств, а також на міграційні процеси біоти [11].

Найвідомішими етапами зледенінь є:

- Гюнцьке зледеніння (2,4–1,8 млн р. тому) – одне з перших масштабних похолодань, за якого з’являються масивні покривні льодовики в північній півкулі;
- Міндельське зледеніння (1,4–0,3 млн р. тому) – продовження загального тренду похолодання, поширення льодовиків у Європі;
- Ріське зледеніння (0,3–0,13 млн р. тому) – період із значним охолодженням і активною льодовиковою денудацією;

– Вюрмське зледеніння (115–11,7 тис. років тому) – останній льодовиковий максимум, який значною мірою сформував сучасну геоморфологію територій [2].

Між кожним із зазначених зледенінь відбувалися фази потепління, що призводили до відступу льодовиків, зростання температур, розширення лісових зон і активного поширення теплолюбних видів. Ці кліматичні зміни супроводжувалися трансформацією ґрунтів, гідрографічної мережі та формуванням нових рослинних ландшафтів.

Після закінчення Вюрмського зледеніння настає голоцен – сучасна геологічна епоха, яка почалася близько 11,7 тис. років тому. Голоцен характеризується загальною стабілізацією клімату, поступовим потеплінням та розвитком культур землеробства. Водночас у межах голоцену виділяються кілька кліматичних коливань [24]:

– Голоценовий кліматичний оптимум (8–4 тис. років тому) – період стабільного потепління, розширення лісів, особливо в середніх широтах;
– Пізньоголоценові коливання – незначні кліматичні флуктуації, які могли локально впливати на флористичний склад;
– Мале льодовикове зледеніння (XIV–XIX ст.) – фаза похолодання, що призвела до скорочення лісистості в окремих регіонах, зниження врожайності та демографічних криз у Європі;
– Сучасне глобальне потепління (кінець XIX ст. – наш час) – спостерігається зростання середньорічної температури, зменшення кількості опадів у низці регіонів, пришвидшення темпів деградації біотопів.

Для території України, зокрема зони Полісся, включно з Чорнобильською зоною відчуження, ці кліматичні зміни мали значний вплив на флористичну композицію. У льодовикові періоди територія займалася холодостійкими тундровими і степовими формаціями, тоді як у міжльодовикові – розвивалася структура широколистяних лісів. У

післяаварійний період Чорнобильська зона стала простором природної ренатуралізації, в якому процеси відновлення екосистем відбуваються в умовах мінімального втручання з боку людини, але під впливом змін клімату.

Таким чином, хронологія кліматичних змін у четвертинному періоді дозволяє розглядати природні екосистеми як динамічні системи, що постійно адаптуються до зовнішніх умов. Вивчення цих процесів є основою для розуміння сучасної динаміки ландшафтів, флористичних угруповань і прогнозування наслідків глобального потепління.

1.2. Наслідки змін кліматичних умов

Зміни кліматичних умов, що фіксуються з кінця XIX століття, мають багатовимірний характер і впливають на всі сфери природного середовища та життєдіяльності людини. Потепління, зміна режиму опадів, зростання частоти екстремальних погодних явищ (тропічні зливи, буревії, посухи) та порушення сезонних циклів чинять глибокий вплив на екосистеми, зокрема на структуру та динаміку рослинного покриву. Ці процеси супроводжуються перебудовою екологічних ніш, зміною просторової організації ландшафтів, трансформацією біоценозів та зменшенням стійкості природних систем до зовнішніх впливів [4].

Одним із найпомітніших наслідків глобального потепління є зсув кліматичних зон у бік полюсів. Це призводить до поступового витіснення холодостійких видів флори теплолюбними, що змінює видовий склад рослинності на великих територіях, у тому числі в межах помірного поясу. Деякі ендемічні або рідкісні види опиняються під загрозою зникнення через втрату відповідних умов існування. Одночасно у регіонах, де спостерігається аридизація (зменшення зволоження), виникає деградація природного покриву, що проявляється у зменшенні щільності

та висоти рослин, розширенні територій із ерозійними процесами, зникненні характерних для зволожених умов угруповань.

Істотні кліматичні зміни впливають на фенологічні ритми рослин – строки початку вегетації, цвітіння, плодоношення. Зменшення тривалості зимового періоду, зростання середньорічної температури та зміна кількості ефективних температур веде до порушення традиційних біологічних циклів. Такі зрушення часто викликають десинхронізацію між різними компонентами екосистеми. Наприклад, передчасне цвітіння рослин може не збігатися з періодами активності комах-запилювачів, що негативно впливає на відтворення біорізноманіття. У сільському господарстві це проявляється в нестабільності врожайності та необхідності адаптації культур до нових умов.

Ще одним суттєвим наслідком є зміна гідрологічного балансу, що включає зниження рівня ґрунтових вод, пересихання малих річок, озер, водно-болотних угідь. У результаті зменшується площа ареалів гігрофільних рослин, відбувається деградація торфовищ та інших важливих природних середовищ існування. Особливо вразливими до цього є болотні екосистеми, які виконують функції природних фільтрів і резервуарів вологи.

Для специфічних територій, таких як Чорнобильська зона відчуження, кліматичні зміни мають подвійний ефект. З одного боку, внаслідок зменшеного антропогенного тиску спостерігається природна ренатуралізація, активне відновлення лісових, лугових і чагарникових формацій. З іншого – підвищення температури, зменшення опадів і часті лісові пожежі посилюють процеси трансформації екосистем, зокрема шляхом зміни трофічної структури, підвищення пожежонебезпеки, активізації міграції радіонуклідів у ґрунтово-рослинному покриві та біоті.

До інших загрозливих наслідків кліматичних змін належать [13]:

– інвазія чужорідних (у т.ч. агресивних) видів рослин, які витісняють аборигенні види і змінюють екологічний баланс;

– розширення ареалів шкідників та фітопатогенів, які впливають на здоров’я рослинних угруповань;
– фрагментація природних екосистем, що знижує їх стійкість та здатність до саморегуляції;
– порушення міжвидових зв’язків у харчових ланцюгах, що призводить до зміни функціонування всієї екосистеми.

Крім того, кліматичні зміни мають значний вплив на екосистемні послуги, що забезпечують сталість навколишнього середовища та благополуччя населення. Серед них – регулювання мікроклімату, збереження родючості ґрунтів, стабілізація гідрологічного режиму, очищення повітря та води, зменшення ризику ерозійних і зсувних процесів.

Інфографіка представлена на рисунку 1.1 узагальнює ключові наслідки кліматичних змін, класифіковані за категоріями впливу на рослинність.

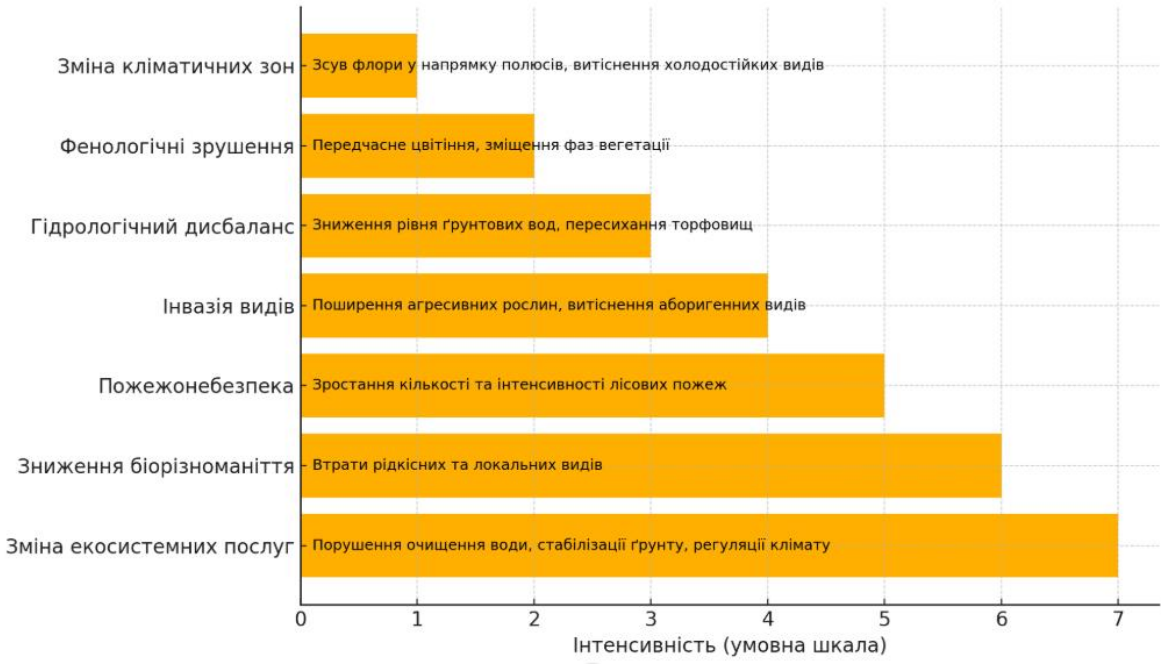


Рисунок 1.1 – Категорії наслідків змін клімату для рослинного покриву

Візуально представлено сім основних категорій, кожна з яких супроводжується стислим описом характеру прояву. Найвиразнішими з них є [34]:

- Зміна кліматичних зон, що демонструє глобальний тренд переформатування екосистем;
- Фенологічні зрушення – впливають на циклічність біологічних процесів;
- Порушення гідрології, що загрожує існуванню вологих угідь і лісових формацій;
- Пожежонебезпека, яка у пострадіаційних регіонах (зокрема Чорнобильській зоні) набуває особливої ваги через ризик вторинного поширення радіонуклідів.

Загалом інфографіка вказує на системність і взаємозв'язаність наслідків, що дає змогу сприймати зміну клімату не як ізольовану подію, а як довготривалий багатофакторний процес, який потребує моніторингу, адаптації та впровадження природоохоронних заходів [21].

Таким чином, зміни клімату виявляють себе не лише як метеорологічне чи фізичне явище, а як глобальний екологічний фактор, що чинить системний вплив на біосферу. Їх вивчення, особливо у ключових зонах моніторингу – таких як Чорнобильська зона відчуження – дає змогу моделювати екологічні сценарії, розробляти адаптаційні стратегії та приймати обґрунтовані управлінські рішення для збереження навколишнього природного середовища.

1.3. Підходи до дослідження змін кліматичних умов та їх наслідків

Дослідження змін кліматичних умов та їх впливу на природне середовище є комплексною науковою проблемою, що потребує

використання міждисциплінарних підходів. Це передбачає поєднання географічних, кліматологічних, екологічних, біологічних, геоінформаційних та навіть соціоекономічних методів. Такий синтез необхідний для глибокого аналізу процесів, що охоплюють як фізичні зміни в атмосфері, так і біологічну відповідь екосистем на нові умови середовища.

Вивчення кліматичних змін є не лише предметом фундаментальної науки, але й важливим прикладним напрямом. Воно лежить в основі розробки адаптаційних стратегій у сфері природокористування, охорони довкілля, управління біорізноманіттям, а також при плануванні сільськогосподарських та лісогосподарських систем. Актуальність цієї тематики посилюється у зв'язку зі стрімким зростанням частоти екстремальних погодних явищ, деградацією природних територій і загрозою для екологічної рівноваги регіонів [39].

Серед основних підходів до дослідження кліматичних змін і їхніх наслідків можна виокремити кліматологічний, палеокліматичний , біогеографічний і екологічний підходи, геоінформаційний підхід та дистанційне зондування землі (ГІС і ДЗЗ), моделювання кліматичних сценаріїв та комплексний (системний) підхід [30].

Кліматологічний підхід базується на багаторічному аналізі метеорологічних даних: температури повітря, кількості опадів, вологості, вітрового режиму, індексів посухи тощо. Методи статистичного аналізу дають змогу будувати довгострокові кліматичні тренди, визначати аномальні періоди та прогнозувати ймовірні зміни. Такий підхід є базовим для інших методів, оскільки клімат є головним фоновим фактором для функціонування природних систем.

Біогеографічний і екологічний підхід орієнтований на аналіз змін у розподілі флори, структури фітоценозів, видової різноманітності та реакцій живих організмів на зміну середовища. Особливо актуальним є вивчення інвазійних процесів, змін у гідрофільних або ксерофільних

угрупованнях, скорочення ареалів рідкісних або ендемічних видів. Екологічні дослідження дозволяють оцінити стійкість біоценозів до кліматичних стресів.

Палеокліматичний підхід застосовується для реконструкції клімату в далекому минулому на основі аналізу палеоархівів: деревних кілець, торфовищ, льодовикових кернів, пилкових профілів. Це дає змогу зіставляти сучасні зміни з історичними аналогами і прогнозувати можливі траєкторії розвитку. Особливо цінний при аналізі природних циклів, які не пов’язані з антропогенними чинниками.

Геоінформаційний підхід та дистанційне зондування Землі (ГІС і ДЗЗ). Завдяки супутниковим знімкам, цифровим моделям рельєфу та індексам вегетації (NDVI, EVI) можна відстежувати просторові зміни рослинності, швидкість її деградації чи відновлення, виявляти зони ризику. ГІС дає змогу інтегрувати різні джерела даних, створювати тематичні карти змін, моделювати вплив кліматичних чинників на біорізноманіття. Це ключовий інструмент моніторингу у великих природоохоронних регіонах, зокрема в Чорнобильській зоні відчуження.

Моделювання кліматичних сценаріїв – цей підхід передбачає застосування глобальних (GCM) і регіональних (RCM) кліматичних моделей для прогнозування змін температури, опадів, ризику посух чи повеней. На основі таких моделей формуються сценарії впливу на конкретні біогеоценози або види. Моделі дозволяють оцінити потенційні екологічні, економічні та соціальні наслідки кліматичних змін.

Комплексний підхід передбачає синтез вищезазначених методів і застосовується в дослідженнях зі складною структурою об’єкта – наприклад, зон з радіоекологічним навантаженням або з високою природною цінністю. Це дозволяє інтегрувати кількісні дані, польові спостереження, історичну інформацію та моделювання у єдину аналітичну систему.

Порівняння цих підходів до дослідження змін кліматичних умов наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння підходів до дослідження змін кліматичних умов

Підхід	Основна мета	Інструменти/методи	Переваги
Кліматологічний	Вивчення динаміки кліматичних показників (температура, опади тощо)	Метеостанції, статистика, аналіз трендів	Доступність довгострокових даних
Біогеографічний/екологічний	Оцінка змін у флорі, ареалах видів, біоценозах	Польові дослідження, аналіз видів, фітосозологія	Безпосередній зв'язок із біологічним різноманіттям
Палеокліматичний	Ретроспективне відновлення кліматичних змін у геологічному минулому	Пилковий аналіз, керни, ізотопні дані	Дозволяє аналізувати довготривалі тренди
ГІС та ДЗЗ	Просторовий аналіз змін рослинного покриву та зон ризику	Супутникові знімки, NDVI, ГІС-моделювання	Широкий охоплення та деталізація змін
Моделювання сценаріїв	Прогнозування наслідків змін клімату	Кліматичні моделі GCM, RCM	Можливість прогнозування на різних масштабах
Комплексний (системний)	Інтеграція різних методів для повного аналізу	Комбінація даних, міждисциплінарні дослідження	Повнота оцінки, адаптованість до складних об'єктів

Кожен з підходів має чітко окреслену мету – від фіксації поточних кліматичних змін (кліматологічний) до ретроспективного аналізу (палеокліматичний) і просторового моніторингу (ГІС та ДЗЗ). Це свідчить про те, що дослідження клімату потребує мультирівневої методології. Використовуються як традиційні інструменти (метеостанції, польові спостереження), так і високотехнологічні методи (супутникові дані, кліматичне моделювання). Це дає змогу охоплювати як локальні, так і глобальні аспекти проблеми.

Жоден підхід не є самодостатнім. Для отримання об’єктивної картини кліматичних змін і їх наслідків доцільно комбінувати методи з різних галузей науки.

Найперспективнішими є ГІС/ДЗЗ та моделювання, оскільки вони дозволяють швидко оновлювати дані, проводити масштабний моніторинг і прогнозувати наслідки.

Комплексний підхід є найпродуктивнішим для природоохоронних територій, особливо тих, що зазнали значного антропогенного впливу або мають високий науковий потенціал (як-от Чорнобильська зона).

У контексті територій зі складним екологічним статусом, таких як Чорнобильська зона відчуження, застосування міждисциплінарних підходів є не лише виправданим, а й необхідним. Поєднання геоінформаційного, екологічного і кліматологічного аналізу дозволяє оцінювати природну динаміку рослинного покриву в умовах обмеженої антропогенної активності. Це створює унікальні можливості для вивчення природної адаптації флори до змін клімату без втручання господарських факторів, тобто в умовах своєрідного природного експерименту. Отримані результати мають як наукову, так і прикладну цінність, зокрема для розробки стратегій збереження біорізноманіття, екологічної реабілітації та просторового планування [32].

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА РОЗПОДІЛ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

2.1. Геопросторові методи аналізу рослинного покриву: огляд сучасних підходів

У сучасній географічній, екологічній та природоохоронній практиці геопросторові методи аналізу набули надзвичайної актуальності. Це зумовлено стрімким розвитком супутникових технологій, зростанням обсягів відкритих даних, підвищенням точності дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і вдосконаленням алгоритмів геоінформаційної обробки. Геопросторові інструменти відіграють ключову роль у дослідженні просторово-часових процесів, які відбуваються у рослинному покриві під впливом змін клімату, антропогенних навантажень, деградації земель чи природних катастроф.

Особливо значущими ці методи є для віддалених або обмежених у доступі територій, таких як Чорнобильська зона відчуження, де проведення повноцінного наземного моніторингу ускладнене або неможливе. У таких умовах ГІС і ДЗЗ надають об’єктивну, регулярну і масштабовану інформацію про стан та динаміку екосистем.

Індекси вегетації (NDVI, EVI, SAVI) дозволяють кількісно оцінити ступінь активності фотосинтезу та щільність зеленого покриву [36].

Серед різноманітних вегетаційних показників найбільш поширеним є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Цей індекс являє собою поєднання коефіцієнтів відбиття поверхні у різних спектральних діапазонах, що дозволяє виокремити характерні особливості рослинного покриву, зокрема наявність зеленого листя. Принцип роботи NDVI базується на здатності рослин по-різному відбивати сонячне світло в

залежності від їх фізіологічного стану. Кожен індекс вегетації орієнтований на виявлення певних властивостей рослинності, проте саме NDVI отримав найбільше поширення завдяки своїй універсальності.

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс слугує кількісною характеристикою фотосинтетично активної біомаси. Завдяки своїй простоті та інформативності, NDVI широко використовується для аналізу стану рослинного покриву, моніторингу змін у екосистемах і вирішення задач дистанційного зондування. Формула для розрахунку NDVI має вигляд (2.1) [12]:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (2.1)$$

де NIR – амплітуда відбиття в ближній інфрачервоній області спектра,

RED – амплітуда відбиття в червоній області спектра.

Індекс покращеної вегетації EVI (Enhanced Vegetation Index) був розроблений як альтернатива NDVI з метою підвищення чутливості до рослинного покриву в регіонах з густою рослинністю та для зменшення впливу атмосферних перешкод і фону ґрунту.

На відміну від NDVI, який швидко насичується при високій густоті рослинності, EVI дозволяє отримувати точніші результати у таких умовах. Він враховує не лише відбиття у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах, але також включає синій спектральний канал для корекції атмосферних ефектів і впливу фону.

EVI краще відображає зміни у щільності рослинного покриву, особливо в лісових екосистемах та тропічних лісах, і широко використовується в екологічному моніторингу, сільському господарстві та супутниковому аналізі земної поверхні.

Формула обчислення EVI враховує кілька коригуючих коефіцієнтів і має вигляд:

$$EVI = G * \frac{(NIR-RED)}{(NIR+C_1*RED-C_2*BLUE+L)}, \quad (2.2)$$

де G – коефіцієнт масштабування,

C_1 та C_2 – коефіцієнти корекції атмосфери,

L – коефіцієнт згладжування,

NIR, RED, BLUE – відбиття в ближньому інфрачервоному, червоному та синьому діапазонах відповідно.

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) – застосовується на територіях із малим рослинним покривом, де велика частка ґрунту впливає на спектральні характеристики.

Індекс скоригованої на ґрунт вегетації SAVI був створений для покращення точності оцінки рослинності на територіях з помітним впливом ґрунтового фону. На відміну від NDVI, який може бути спотворений на ділянках із малим вегетаційним покриттям через домінування сигналу від ґрунту, SAVI вводить додатковий коригуючий коефіцієнт, що мінімізує цей вплив.

Індекс особливо ефективний при аналізі напівпустельних, сільськогосподарських або деградованих ландшафтів, де рослинність розріджена. SAVI надає більш стабільні результати в умовах, коли NDVI втрачає чутливість через варіації яскравості ґрунту [19].

Формула для обчислення SAVI виглядає так:

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)} * (1 + L)\ , \qquad (2.3)$$

де NIR і RED – відбиття у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах відповідно,

L – коефіцієнт корекції впливу ґрунту (зазвичай дорівнює 0,5).

Геоінформаційні системи (ГІС) відкривають широкі можливості для просторового аналізу структури та змін ландшафтів. Одним із найважливіших напрямів є створення цифрових карт типів рослинності, які відображають її видовий склад, просторове поширення, щільність, рівень антропогенного перетворення. Такі карти є основою для прийняття

управлінських рішень у сферах лісового, сільського господарства, охорони природи, екологічного моніторингу.

Процес картографування включає [27]:

- класифікацію супутникових знімків за спектральними характеристиками відбиття (візуальний, ближній ІЧ-діапазон);
- інтерпретацію ландшафтних одиниць (ліси, луки, болота, сільськогосподарські угіддя, пустелі тощо);
- оцінку фрагментації рослинного покриву (визначення середньої площі фрагментів, контурної складності, індексу зв’язності);
- ідентифікацію зон деградації або навпаки – реколонізації та природного відновлення.

Сучасні методи обробки дозволяють виконувати напівавтоматичну чи повністю автоматизовану класифікацію ландшафтних структур. Для цього використовуються класичні алгоритми кластеризації (k-means, ISODATA), класифікатори на основі машинного навчання (Random Forest, Support Vector Machine) та нейронні мережі та методи глибокого навчання – особливо ефективні для розпізнавання складних структур і змішаних покривів [37].

Також використовується метод об’єктно-орієнтованої класифікації, що враховує не лише спектральні характеристики, а й просторові, текстурні, топологічні ознаки (наприклад, форма ділянки, її розмір, суміжність з іншими типами покриву) [6].

Картографування ландшафтних структур важливе і в контексті оцінки антропогенного впливу. ГІС дозволяють порівнювати дані за різні роки (land use/land cover change detection), ідентифікувати тенденції урбанізації, лісозаготівлі, сільськогосподарського освоєння або навпаки – заповідання територій.

Для територій на кшталт Чорнобильської зони відчуження картографування є незамінним, оскільки дає змогу відстежувати природне відновлення екосистем, виявляти нові типи покриву, що

з’явилися після зникнення антропогенного тиску, а також оцінювати ступінь їх стабільності в умовах зміни клімату.

Часовий аналіз дає змогу оцінювати сезонні та багаторічні зміни рослинності, що особливо важливо для виявлення трендів деградації, відновлення фітоценозів, поширення інвазивних видів чи впливу екстремальних кліматичних подій.

За допомогою регулярних супутникових спостережень (Landsat, Sentinel, MODIS) можна визначити початок і тривалість вегетації, простежити зміни NDVI у часі, порівнювати річні аномалії та оцінити ефекти пожеж, посух, затоплень тощо.

Методи включають згладжування даних, трендовий аналіз, кластеризацію динаміки, кореляцію з кліматичними змінними. Особливо цінний time-series аналіз для моніторингу природних заповідників і зон обмеженого доступу – як-от Чорнобильська зона, де традиційні польові обстеження обмежені.

Інтеграція кліматичних змінних (температура, опади, посухи) із геопросторовими даними дозволяє виявляти зв’язки між кліматом і рослинним покривом, а також прогнозувати його зміну. Застосовуються як статистичні моделі (регресійний аналіз), так і моделі машинного навчання (Random Forest, нейромережі), що дозволяють враховувати складні залежності.

Особливе значення має використання сценаріїв RCP (Representative Concentration Pathways) – від помірного RCP2.6 до екстремального RCP8.5. Вони дають змогу моделювати можливі зміни флори під впливом майбутніх кліматичних умов.

У Чорнобильській зоні такі моделі допомагають оцінити не лише динаміку рослинності, а й потенційні ризики при взаємодії кліматичних і радіоекологічних факторів.

Моделювання – це ключ до екологічного прогнозування, планування природоохоронних дій і адаптації до змін клімату.

Геопросторові методи, зокрема використання індексу NBR (Normalized Burn Ratio), є ефективним інструментом для моніторингу природних катастроф, таких як лісові пожежі, урагани та вітровали. Індекс NBR розраховується на основі ближнього інфрачервоного (NIR) та середньоінфрачервоного (SWIR) діапазонів і дозволяє виявляти степінь пошкодження рослинності.

Порівняння NBR до та після події (ΔNBR) допомагає визначити межі вигорілих ділянок, оцінити інтенсивність пошкодження (від слабкого до повного знищення покриву), створити карти впливу для прийняття управлінських рішень.

Це особливо актуально для заповідників, лісових масивів та територій природно-заповідного фонду, де порушення рослинного покриву може призвести до втрати біорізноманіття, активації ерозійних процесів, а також поширення інвазивних видів на оголені площі.

У контексті Чорнобильської зони, пожежі становлять додаткову загрозу, оскільки сприяють повторному розсіюванню радіонуклідів із ґрунтів та рослинності в атмосферу. Тому регулярне супутникове спостереження з використанням NBR є критично важливим для забезпечення радіоекологічної безпеки та екологічного моніторингу [9].

Геоінформаційні системи дозволяють інтегрувати дані про рослинний покрив із різноманітними природними та антропогенними чинниками, що дає змогу здійснювати комплексну оцінку екологічних ризиків. Просторове накладання шарів, таких як джерела забруднення, радіоактивні аномалії, транспортна інфраструктура, гідрологічна мережа та рельєф, дозволяє виявити вразливі ділянки та зони потенційної деградації екосистем.

Такий підхід дає можливість прогнозувати ризики ерозії, зсувів, втрати біорізноманіття, оцінювати території під впливом урбанізації або інтенсивного землекористування, визначати екологічно пріоритетні зони для рекультивації, лісорозведення або охоронного статусу та планувати

зонування територій з урахуванням екологічної функціональності (буферні зони, ядра біорізноманіття, екологічні коридори) [25].

Особливо ефективним цей підхід є для складних і динамічних регіонів, таких як Чорнобильська зона, де присутні радіоекологічні, кліматичні та природні ризики одночасно. Застосування ГІС-аналізу дозволяє в реальному часі адаптувати стратегії управління до актуального стану екосистем, що є важливим для сталого природокористування та збереження довкілля.

Переваги геопросторових методів наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Переваги геопросторових методів

Перевага	Опис
Масштабність охоплення	Можливість аналізу від локального до глобального рівнів
Регулярність спостережень	Постійне оновлення даних дає змогу оперативно виявляти зміни
Об’єктивність і порівнянність	Незалежність від людського фактору, можливість порівняння даних між регіонами
Економічна ефективність	Зниження потреби у трудомістких польових дослідженнях
Інтеграція з іншими джерелами даних	Збагачення аналітики за рахунок кліматичних, ґрунтових, геоморфологічних шарів

Розвиток супутникових технологій, платформ дистанційного моніторингу (наприклад, Google Earth Engine, Sentinel Hub, Copernicus) та впровадження штучного інтелекту (нейромережі, класифікація на основі глибокого навчання) суттєво підвищують можливості геопросторового аналізу. У найближчому майбутньому прогнозується ще більша деталізація даних (до 1 м/піксель), автоматизація обробки та онлайн-моніторинг екосистем у реальному часі.

Сучасні алгоритми супутникової класифікації, зокрема розроблені Європейським космічним агентством (ЄКА), знаходять усе ширше застосування у дистанційному моніторингу екосистем. Вони дозволяють автоматизовано ідентифікувати об’єкти на знімках за їх спектральними характеристиками. Такий підхід, який передбачає навчання на наборах позначених зображень, дає змогу ефективно розпізнавати типи поверхні, зокрема водні об’єкти та рослинний покрив. Наприклад, при класифікації дна Каховського водосховища було виявлено, що площа активної рослинності у весняний період 2024 року зросла на 23 % у порівнянні з осінню 2023-го. Це свідчить про потенціал даного підходу до просторової оцінки динаміки екосистем унаслідок змін гідрологічних або кліматичних умов [38].

У контексті таких специфічних об’єктів, як Чорнобильська зона відчуження, геопросторові методи є не лише інструментом спостереження, а й основою для стратегічного планування екологічного відновлення, збереження біорізноманіття та міжнародного наукового співробітництва.

2.2. Приклади досліджень впливу змін клімату на рослинність у різних регіонах світу

Дослідження впливу кліматичних змін на рослинний покрив активно проводяться в усіх кліматичних зонах планети – від арктичної тундри до тропічних лісів, від пустель до гірських масивів. Ці дослідження базуються на супутниковому моніторингу, польових спостереженнях, аналізі NDVI та інших індексів вегетації, а також моделюванні сценаріїв зміни клімату. Результати демонструють високу просторову неоднорідність і різноманіття впливів – залежно від

природних умов, адаптаційного потенціалу флори та інтенсивності людського втручання [3].

Підвищення середньорічної температури в Арктиці спричинило явище, яке отримало назву “озеленення Арктики”. Воно проявляється у збільшенні біомаси та площі поширення рослинності, зокрема мохоподібних, трав’янистих і чагарникових видів, які раніше були рідкісними або взагалі не зустрічалися в умовах суворого тундрового клімату. Згідно з численними супутниковими дослідженнями, фіксується зростання індексу NDVI, що вказує на підвищення вегетаційної активності впродовж останніх трьох десятиліть.

Таке «озеленення» супроводжується поступовим витісненням холодостійких арктичних форм флори, зміною структури ґрунтового покриву, зокрема активізацією процесів відтавання вічної мерзлоти. Це, своєю чергою, призводить до вивільнення парникових газів (вуглекислого газу і метану), які тривалий час були заблоковані в мерзлому ґрунті. Таким чином, регіональні екологічні зміни можуть мати глобальні наслідки, оскільки посилюють ефект кліматичного потепління.

Цей процес є одним із найважливіших сигналів кліматичної трансформації, що потребує постійного спостереження та міжнародної наукової уваги, адже Арктика є чутливим індикатором глобальних змін у біосфері.

Країни Південної Європи (Іспанія, Італія, Греція, Португалія) стикаються з аридизацією клімату – тривалим і поступовим процесом зменшення зволоження, який супроводжується зростанням середньорічної температури, скороченням кількості опадів, а також збільшенням частоти й інтенсивності посух. Ці зміни особливо помітні у середземноморському регіоні, де волога зима і сухе літо раніше забезпечували стабільну сезонну вегетацію [1].

Унаслідок аридизації відбувається деградація природних лісів, зниження покриття багаторічною рослинністю, зменшення

продуктивності пасовищ і поступове спустелювання окремих територій. Додатково зростає ризик масштабних лісових пожеж, які завдають шкоди не лише екосистемам, а й інфраструктурі та населенню [35].

Аналіз супутникових знімків фіксує систематичне зниження індексу NDVI, що свідчить про втрату фітоактивності, ослаблення росту рослин і зменшення зеленої біомаси. У деяких регіонах помітне розширення оголених і деградованих ділянок, зменшення листяної площі лісів, зміщення лісової межі та скорочення вологолюбних видів. Все це змінює структуру та функціонування ландшафтів, знижує їхню екологічну стійкість і здатність до природного відновлення [10].

Кліматичні зміни в поєднанні з масштабною вирубкою лісів суттєво впливають на Амазонію – один із головних “легенів планети”, що відіграє ключову роль у регуляції глобального клімату. Зменшення площі суцільного лісу, зростання середніх температур і зниження рівня опадів, особливо у сухий сезон, спричиняють перебудову рослинного покриву. Спостерігається зниження домінування вологолюбних видів дерев і трав’янистих рослин, що є адаптованими до тривалого періоду зволоження.

Такі зміни ведуть до зниження здатності тропічних лісів поглинати вуглекислий газ, що послаблює роль Амазонії як вуглецевого поглинача. Водночас підвищується ризик незворотного переходу значних ділянок лісу до саваноподібного стану – менш стабільної та менш різноманітної екосистеми. Цей процес супроводжується підвищеною частотою пожеж, деградацією ґрунтів і втратою біорізноманіття.

Важливо зазначити, що навіть незначне перевищення критичних порогів температури чи вологості може стати «переломним моментом» для Амазонської екосистеми. Такі зміни не лише посилюють регіональні кліматичні аномалії, але й поглиблюють глобальну кліматичну кризу, впливаючи на циркуляцію вологи, атмосферні потоки та стабільність кліматичних систем.

Регіони Центральної Азії (Казахстан, Узбекистан, Туркменістан) вирізняються високою вразливістю до кліматичних змін, зумовленою як природними умовами (аридний клімат, обмежені водні ресурси), так і людською діяльністю – надмірним випасом худоби, іригацією, розорюванням степів. Упродовж останніх десятиліть спостерігається стійке зменшення кількості опадів, зростання середніх температур, а також зниження рівня ґрунтових вод. Ці чинники призвели до розширення зон напівпустель, виснаження земель і деградації природних степових екосистем [14].

На зміну природному різнотравному покриву приходять ксерофітні (сухолюбні) угруповання, переважно з малим екологічним потенціалом – як-от полини, солянки, стійкі до посухи злаки. Це суттєво знижує продуктивність пасовищ, спричиняє вітрову ерозію та погіршує мікрокліматичні умови. Унаслідок деградації рослинного покриву погіршується здатність територій зберігати вологу й підтримувати сталий біогеоценоз.

Аналіз супутникових знімків свідчить про стійке зниження NDVI протягом останніх 20 років, особливо в зонах інтенсивного землекористування. Просторовий аналіз демонструє тенденцію зміщення продуктивної рослинності на північ, у бік більш зволожених територій, що вказує на кліматичну трансформацію ландшафтів Центральної Азії.

У гірських районах США та Канади (Скелясті гори, Аппалачі, Каскадні гори) спостерігається підйом висотної межі лісів, що є типовою відповіддю екосистем на потепління. Рослинні види, адаптовані до нижчих температур, зміщують свої ареали вгору, де ще зберігаються прийнятні умови для існування. Така динаміка супроводжується змінами у видовому складі – в гірських екосистемах з’являються нові, теплолюбні види, які можуть конкурувати з аборигенними формами.

Окрім цього, фіксується зсув фенологічних фаз: раніше починається вегетаційний період, пришвидшується розвиток рослин,

подовжується сезон активного росту. Проте ці процеси не завжди є позитивними – порушення сезонних ритмів може призвести до асинхронності з життєвими циклами запилювачів чи іншої фауни, що негативно впливає на відтворення флори.

Одним із найсерйозніших наслідків є різке зростання частоти й масштабів лісових пожеж, особливо влітку. Посухи, високі температури й накопичення сухої біомаси створюють умови для швидкого поширення вогню. Пожежі не лише змінюють видовий склад, але й знижують здатність лісів до самовідновлення, особливо у високогірних умовах, де вегетаційні цикли уповільнені. Деякі території після пожеж переходять до ксерофітних або чагарникових формацій, що погіршує екологічну стійкість гірських ландшафтів.

Дослідження кліматичних змін та їхнього впливу на рослинність в Україні виявляють регіональні відмінності, зумовлені як географічним положенням, так і ландшафтною структурою країни.

Упродовж останніх десятиліть спостерігається:

- Зміщення лісостепової зони на північ – як реакція на потепління. Раніше характерні для південних регіонів степові формації поступово просуваються в бік Полісся, де відзначається зменшення площ вологолюбних лісових угруповань і збільшення кількості світлолюбних, посухостійких видів.
- Зниження рівня зволоження в степовій зоні, що особливо відчутно в південному сході України. Це призводить до деградації фітоценозів, скорочення площ лучних та заплавних екосистем, а також зниження врожайності природних кормових угідь.
- Зміни у фенології рослин, зокрема раніше початок вегетації, що спричиняє зміщення сезонних фаз розвитку – цвітіння, плодоношення. Водночас скорочується період активного росту влітку через дефіцит вологи та високі температури, що позначається на загальному фітобалансі екосистем.

– Зростання ризику природних пожеж, зокрема у заповідних територіях, таких як Поліський природний заповідник, Карпатський біосферний резерват, Чорнобильська зона. Пожежі призводять до втрати біорізноманіття, знищення лісової підстилки, порушення сукцесійних процесів та спрощення структури угруповань.

Загалом, зміни клімату формують нові виклики для природоохоронної діяльності та моніторингу стану рослинного покриву в Україні, вимагаючи адаптивних підходів і впровадження сучасних геопросторових технологій.

Ці приклади свідчать про глобальний характер кліматичних викликів, що змінюють екосистеми по всьому світу. Для ефективного реагування необхідно поєднувати результати локальних досліджень, супутникового моніторингу та ГІС-аналізу з довгостроковим стратегічним плануванням.

2.3. Застосування супутникових даних та ГІС для аналізу змін рослинного покриву

У сучасних умовах глобальних кліматичних змін, антропогенного навантаження та постійної трансформації природного середовища, супутникові технології та геоінформаційні системи (ГІС) стали незамінними інструментами для вивчення стану та динаміки рослинного покриву. Вони дозволяють отримувати об’єктивні, регулярні та масштабні дані, що є особливо важливо для регіонів із обмеженим доступом або високою екологічною чутливістю, таких як заповідники, охоронні зони, території після катастроф [33].

Супутникові дані та ГІС надають змогу не лише фіксувати зміни рослинності у часі й просторі, а й аналізувати взаємозв’язки з

кліматичними, ґрунтовими, геоморфологічними та соціальними факторами, що формують екологічну ситуацію. Завдяки цьому можна приймати науково обґрунтовані рішення щодо охорони природи, управління ресурсами та адаптації до кліматичних змін.

Основні переваги супутникових даних і потенціал ГІС-аналізу наведені у таблицях 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2

Основні переваги супутникових даних і ГІС

Перевага	Опис
Масштабність охоплення	Можливість аналізу як локальних, так і глобальних змін
Висока просторово-часова роздільність	Дозволяє бачити зміни в режимі сезону, року, десятиріччя
Періодичне оновлення інформації	Супутники (наприклад Sentinel-2) надають нові знімки кожні 5–10 днів
Об’єктивність	Дані не залежать від людського фактора, дозволяють точно порівнювати зміни між регіонами
Інтеграція з іншими джерелами	Дані клімату, рельєфу, землекористування, соціальної активності

Супутникові технології та геоінформаційні системи (ГІС) відкривають нові можливості для моніторингу стану природного середовища, особливо в контексті змін клімату та антропогенного впливу. Їх головні переваги – масштабність, висока точність, регулярність оновлення, об’єктивність і можливість інтеграції з іншими джерелами – роблять ці інструменти ключовими у сучасних екологічних дослідженнях. Застосування супутникових даних дозволяє своєчасно виявляти зміни рослинного покриву, прогнозувати екологічні ризики та приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо охорони довкілля та сталого природокористування.

Таблиця 2.3

Потенціал ГІС-аналізу та приклади застосування

Потенціал ГІС-аналізу	Приклади практичного застосування
Картографування змін рослинного покриву	Контроль зелених зон у містах, аналіз впливу забудови
Багатошарові аналітичні моделі	Оцінка ефективності природоохоронних заходів
Просторове виявлення ризиків	Моніторинг пожеж, ерозії, деградації ґрунтів
Зонування територій	Визначення ділянок для рекультивації або охоронного режиму

ГІС-аналіз є універсальним інструментом, який дозволяє не лише фіксувати просторові зміни у довкіллі, але й глибоко аналізувати взаємозв'язки між природними, соціальними та техногенними факторами. Таблиця демонструє, що можливості ГІС охоплюють як наукові дослідження, так і практичні завдання – від моніторингу рослинного покриву до зонування територій для охорони природи. Особливу цінність ці інструменти мають у контексті планування природоохоронних заходів, оцінки наслідків пожеж, деградації ландшафтів і сталого управління екосистемами. ГІС-технології забезпечують наукову обґрунтованість екологічних рішень, сприяючи адаптації до кліматичних викликів та збереженню біорізноманіття [31].

Особливо важливо використання ГІС і супутникових даних на територіях зі складним екологічним статусом, таких як Чорнобильська зона відчуження, де польові дослідження обмежені або небезпечні. Тут дистанційні методи дають можливість забезпечити тривалий екологічний нагляд, фіксувати природні зміни без прямого втручання людини, аналізувати сценарії зміни флори та підтримувати стратегічне планування охорони природи [40].

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОПРОСТОРОВИХ МЕТОДІВ НА ПРИКЛАДІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ

3.1. Загальна характеристика Чорнобильської зони

Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) – це територія на півночі України (рисунок 3.1), яка була штучно сформована внаслідок аварії на Чорнобильській атомній електростанції 26 квітня 1986 року. Її площа становить близько 2600 км², і вона охоплює частини Вишгородського та Іванківського районів Київської області. Центром зони є місто Чорнобиль, розташоване за 15 км на південний схід від зруйнованого енергоблоку №4. Основним природним водним об’єктом є річка Прип’ять, що перетинає зону із заходу на схід, відіграючи важливу роль у гідрологічному режимі території.



Рисунок 3.1 – Чорнобильська зона відчуження

Зона відчуження має багаторівневу систему обмеження доступу і умовно поділяється на декілька секторів за ступенем радіоактивного забруднення. Територія регулюється Державним агентством України з

управління зоною відчуження і є об’єктом багатофакторного екологічного моніторингу, включно з геопросторовими та дистанційними методами дослідження.

Чорнобильська зона розташована в межах Українського Полісся – регіону з помірно континентальним кліматом. Середньорічна температура становить близько +7 °C , із зимовими мінімумами до -15 °C і літніми максимумами понад +30 °C(рисунок 3.2). Середньорічна кількість опадів коливається в межах 550–650 мм, із максимумом у літній період (рисунок 3.2). У контексті сучасного глобального потепління, зафіксованого з кінця XIX ст., у регіоні спостерігаються поступове зростання середніх температур, зменшення кількості опадів і зростання частоти екстремальних погодних подій.

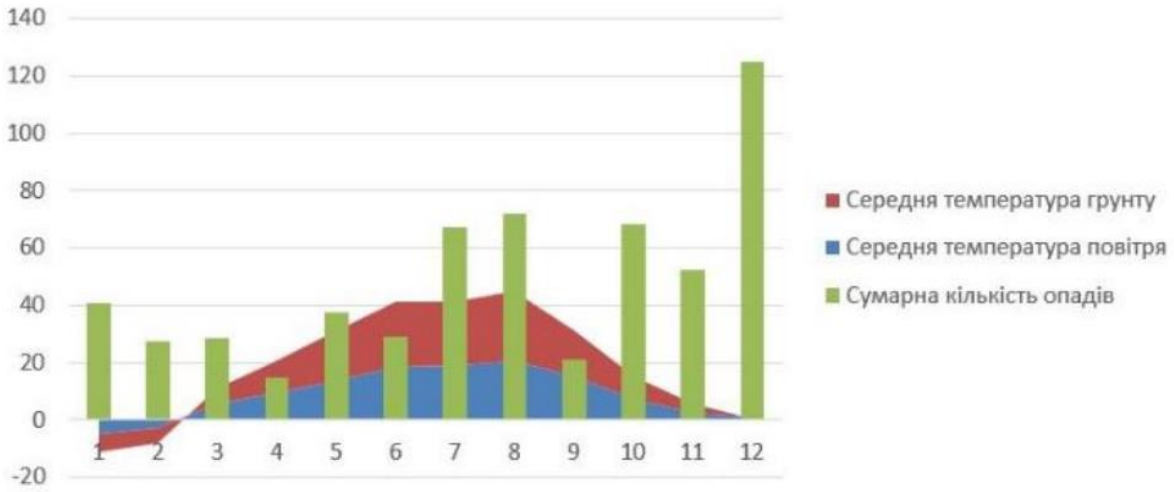


Рисунок 3.2 – Узагальнені дані середніх значень температури повітря та грунту і сумарна кількість опадів по місяцях [18].

Природна рослинність Чорнобильської зони представлена хвойно-листяними лісами, луками, болотами, а також вторинними фітоценозами, які формуються на місці покинутих сільськогосподарських угідь. За даними супутникових спостережень, зокрема NDVI-аналізу, спостерігається активне розширення лісових площ, особливо на деградованих антропогенних ландшафтах, що підтверджує процеси природної ренатуралізації [26].

Після техногенної катастрофи на ЧАЕС значна частина території зазнала забруднення радіонуклідами – переважно ізотопами цезію-137, стронцію-90 та плутонію-239. Найбільш забруднені зони, зокрема так званий «рудий ліс», стали об’єктами інтенсивних досліджень через екстремальні умови існування. Водночас, відсутність інтенсивного людського впливу створила унікальні умови для вивчення природних процесів відновлення екосистем, включно з адаптацією до змін клімату [28].

Сьогодні ландшафти зони являють собою мозаїку стабільних та динамічних екосистем. Просторовий аналіз за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) та супутникових даних демонструє активне відновлення рослинного покриву, зміну фітокомпозиції в напрямку ксерофітних і світлолюбних видів, а також ознаки деградації у зонах, де домінують екстремальні умови – посухи, пожежі або повторне радіоактивне забруднення.

Таким чином, Чорнобильська зона відчуження є унікальним об’єктом для вивчення просторових наслідків змін клімату на рослинний покрив в умовах пострадіаційного середовища. Комплексне поєднання кліматологічного аналізу, супутникового моніторингу та ГІС-моделювання дає змогу відстежувати динаміку цих змін у довготривалій перспективі [22].

3.2. Аналіз змін рослинного покриву в динаміці

Для дослідження просторово-часових змін рослинного покриву на території Чорнобильської зони відчуження було обрано репрезентативні часові зрізи, що охоплюють період із 1990 по 2024 рік. Цей проміжок є найбільш інформативним, оскільки охоплює етапи активного природного відновлення після зменшення впливу первинного радіаційного

забруднення, а також періоди, що збігаються з початком активних кліматичних трансформацій у регіоні [8].

Для детального аналізу були обрані ключові роки, що репрезентують кліматичні та екологічні зміни [23]:

- 1990 – початковий етап спостереження;
- 2010 – період активної ренатуралізації;
- 2020–2024 – фаза потепління, підвищення пожежонебезпеки та кліматичних екстремумів.

Ключовим інструментом для оцінки стану рослинності в дослідженні є NDVI – нормалізований диференційний індекс рослинності. Його обчислення здійснювалося на основі відкритих супутникових знімків Landsat 5/7/8 та Sentinel-2, які забезпечують високоточні та регулярні спостереження за поверхнею Землі.

Для поглибленої оцінки динаміки рослинного покриву Чорнобильської зони відчуження було проведено аналіз середньорічних трендів NDVI за різними типами земного покриву (таблиця 3.1). Враховуючи різноманіття фітоценозів у межах зони, трендовий аналіз дозволяє ідентифікувати не лише загальні тенденції, але й відмінності в реакції окремих типів рослинності на кліматичні зміни та пострадіаційні фактори.

Таблиця 3.1

Середнє значення статистично значущих NDVI з 1990 по 2024 рік для різних типів рослинного покриву

Тип покриву місцевості	**Середній тренд NDVI (рік$^{-1}$)**	**Площа (км²)**
Вічнозелені хвойні ліси	2.12×10^{-3}	44.7
Листопадні широколисті ліси	6.90×10^{-3}	47.2
Змішані ліси	5.56×10^{-3}	231.0
Савани	5.98×10^{-3}	24.7
Лісисті савани	6.85×10^{-3}	762.5

Продовження таблиці 3.1

Лугові екосистеми (пасовища)	4.85×10^{-3}	39.5
Орні землі (рілля)	-5.94×10^{-3}	3.2

У таблиці подано середні значення річного тренду NDVI (у розрахунку на рік) для основних типів рослинного покриву, виявлених у межах ЧЗВ, а також відповідні площі, які вони займають. Позитивні значення тренду свідчать про поступове зростання індексу, що може інтерпретуватись як ознака покращення вегетаційного стану, відновлення біомаси або природної ренатуралізації території. Натомість негативне значення, зафіксоване лише для орних земель, вказує на деградаційні процеси або втрату фітоактивності.

З аналізу видно, що найвищі темпи зростання NDVI спостерігаються у лісистих саванах (до 7.01×10^{-3} рік$^{-1}$), листяних та змішаних лісах, що підтверджує активне самовідновлення цих екосистем. Навпаки, сільськогосподарські угіддя в межах ЧЗВ, залишені без обробітку після евакуації, демонструють від'ємний тренд NDVI, що свідчить про поступову втрату рослинного покриву або заміну його на деградовані типи [5].

Зміни індексу NDVI у Чорнобильській зоні демонструють чітку тенденцію до зростання вегетаційної активності у період з 1990-х до початку 2010-х років (рисунок 3.4, 3.5). Це відповідає фазі природного відновлення біомаси на покинутих землях, що узгоджується з результатами геопросторового аналізу, наведеними в Розділі 2 [7].

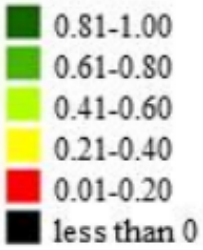


Рисунок 3.3 – Значення NDVI

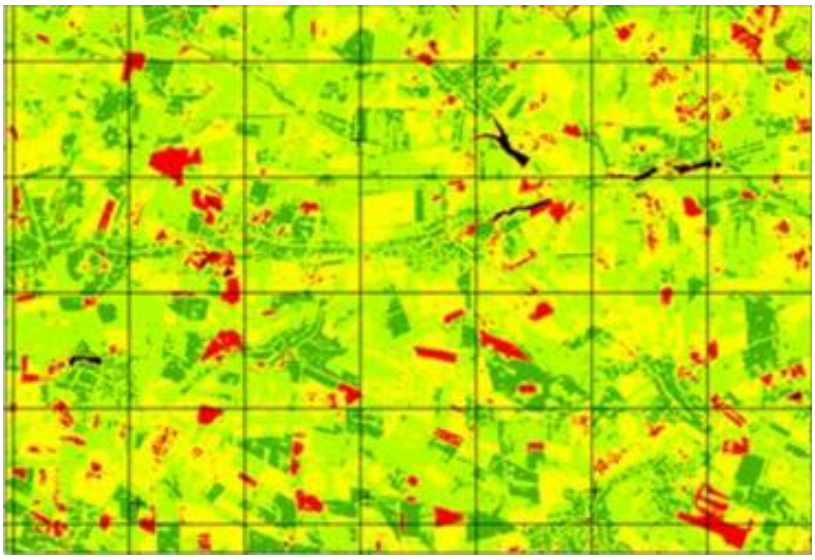


Рисунок 3.4 – Просторовий розподіл NDVI в 1990 р.

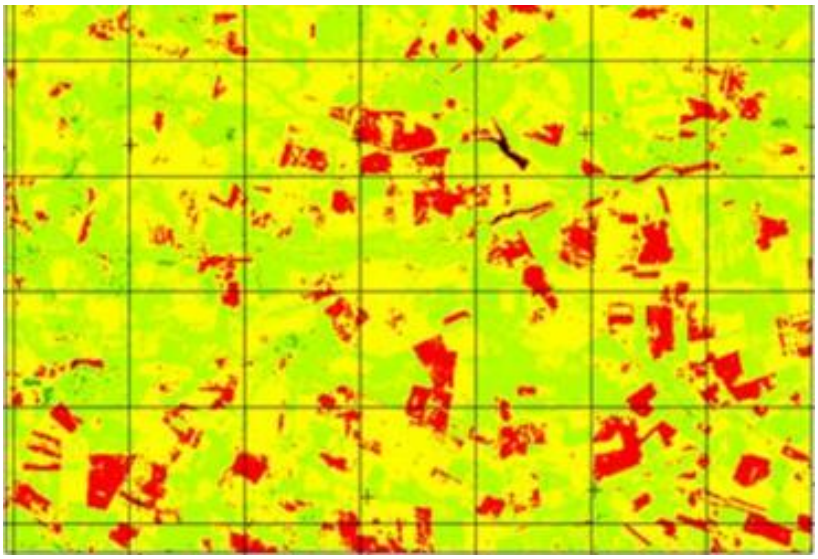


Рисунок 3.5 – Просторовий розподіл NDVI в 2010 р. [17]

Починаючи з 2015 року, в окремих ділянках зони фіксується локальне зниження NDVI, зокрема в районах, які постраждали від масштабних лісових пожеж (2015, 2018, 2020 рр.), що співвідноситься з результатами аналізу індексу NBR та інших температурно-залежних показників (рисунок 3.6).

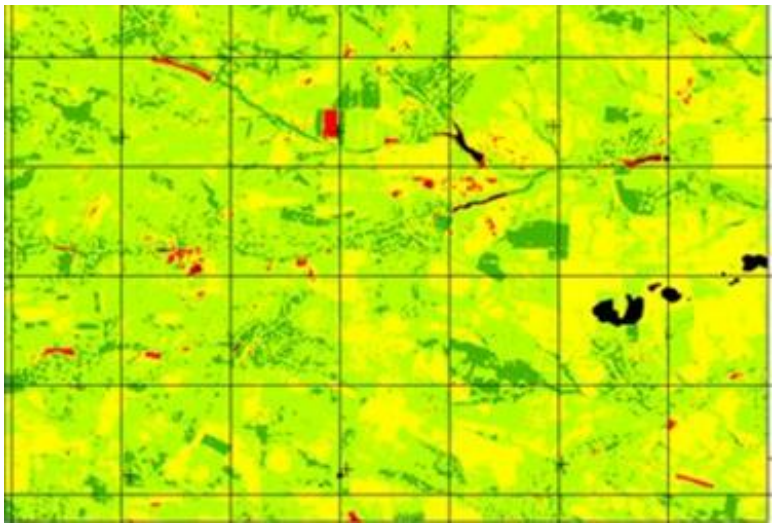


Рисунок 3.6 – Просторовий розподіл NDVI в 2020 р.

У квітні 2020 року на території Чорнобильської зони відчуження відбулася одна з найбільших лісових пожеж за останні десятиліття. За оцінками Державного агентства України з управління зоною відчуження, площа займання становила понад 11 500 гектарів, що включало значну частину лісових масивів, заплавних луків і ділянок із високим радіаційним фоном.

Аналіз супутникових знімків Sentinel-2 та індексу NBR дозволив точно визначити межі вигорілих територій. Постпожежна різниця (ΔNBR) вказала на високу інтенсивність пошкодження, особливо у центрально-західній частині зони. Ці ж зони у подальшому відзначались різким падінням NDVI, що зафіксовано вже у вегетаційний сезон 2020 року.

У багатьох з постраждалих ділянок, особливо в хвойних лісах, NDVI знизився більш ніж на 0.2 одиниці, що свідчить про повне або майже повне знищення фітомаси. Відновлення рослинного покриву на цих територіях залишається повільним і фрагментарним, як показують порівняння даних за 2020–2024 роки. У деяких ділянках навіть спостерігається вторинна деградація через ерозію ґрунтів, інвазію агресивних видів і повторне розсіювання радіонуклідів.

На рисунку 3.7 представлено порівняння NDVI до та після пожежі, що демонструє значні втрати рослинної біомаси.

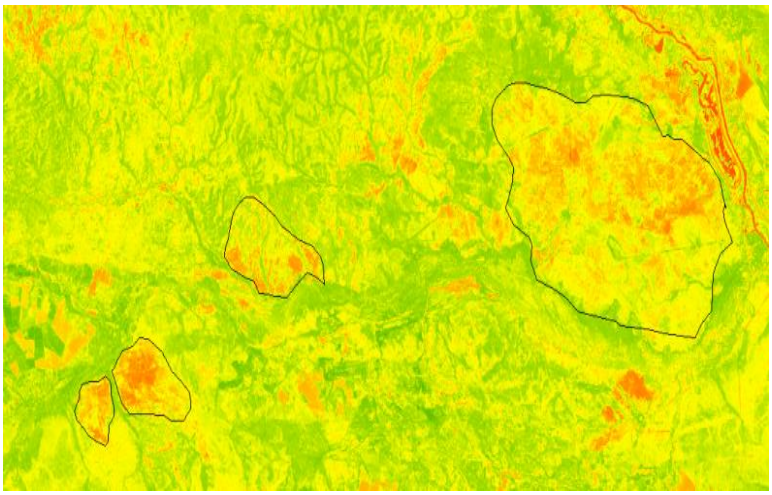


Рисунок 3.7 – Просторовий розподіл NDVI в 2024 р.

Результати NDVI-аналізу були візуалізовані за допомогою програмного забезпечення QGIS та Google Earth Engine, що дозволило створити серії тематичних карт. Кольорова шкала відображає ступінь активності фотосинтезу: від низьких значень NDVI (0.1–0.3), характерних для деградованих або вигорілих ділянок, до високих значень (>0.6), що вказують на густу, активну рослинність [16].

Порівняльні карти за 1990 2010, 2020, 2024 роки демонструють чітке розширення зелених зон – особливо навколо колишніх сільськогосподарських угідь, що перетворилися на лісові масиви. У зонах зі збереженим радіаційним навантаженням, навпаки, вегетаційна активність залишається нижчою за середньорегіональні показники.

За результатами багаторічного NDVI-моніторингу були ідентифіковані три ключові типи зон [29]:

- Зони активного зростання рослинності – території з високими та стабільно зростаючими значеннями NDVI, здебільшого представлені вторинними лісами та зарослими луками.
- Стабільні ділянки – регіони з помірною вегетаційною активністю, де зміни є незначними, що свідчить про стабілізацію локальних екосистем.

– Зони деградації – переважно території, уражені пожежами або підвищеним рівнем радіації, де NDVI демонструє спад або високі річні флуктуації. Такі ділянки є пріоритетними для подальшого моніторингу ризиків (ерозія, повторне радіоактивне забруднення, інвазія видів).

Отримані результати свідчать про високу просторову неоднорідність динаміки рослинного покриву в межах ЧЗВ. Вони підтверджують необхідність комплексного спостереження за екосистемами у контексті як змін клімату, так і радіоекологічного фону, що створює унікальні передумови для інтегрованого геоінформаційного аналізу – як зазначено в Розділі 2.

3.3. Сценарний аналіз майбутньої динаміки рослинного покриву Чорнобильської зони

Ураховуючи встановлені залежності між динамікою NDVI та кліматичними змінними (температурою й кількістю опадів), було здійснено сценарне прогнозування стану рослинного покриву Чорнобильської зони в найближчі десятиліття. Такий підхід базується на припущенні, що динаміка вегетаційного індексу є похідною від зміни кліматичних умов за відсутності значного антропогенного втручання, що робить ЧЗВ зручним природним полігоном для моделювання наслідків глобального потепління.

Для моделювання використовувалися кліматичні сценарії, розроблені Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (IPCC), а саме [20,41]:

– RCP 4.5 – сценарій помірного зростання температури із поступовим впровадженням заходів щодо зниження викидів парникових газів;

- RCP 8.5 – сценарій інтенсивного потепління у разі відсутності кліматичної політики, що передбачає постійне зростання викидів та глобальних температур.

Прогнозування проводилося шляхом екстраполяції багаторічних трендів NDVI (на основі даних за 1990–2024 рр.) із застосуванням регресійних функцій, які враховували:

- середньорічне зростання температури повітря на 0.04–0.06 °C;
- можливе скорочення кількості опадів у вегетаційний період (особливо у травні–липні);
- зміни амплітуди сезонних коливань NDVI;
- затримки у відновленні рослинності на деградованих ділянках, зокрема після пожеж.

У разі реалізації сценарію RCP 4.5 NDVI продовжуватиме зростати, особливо в стабільних екосистемах – змішаних та широколистих лісах, а також на лугових ділянках. Збільшення середньої температури повітря сприятиме подовженню вегетаційного сезону, а незначне зменшення опадів не стане критичним фактором. Очікується помірне підвищення NDVI приблизно на 0.015–0.02 одиниці до 2050 року.

У разі реалізації сценарію RCP 8.5 можливе короткочасне зростання NDVI до 2030–2035 років, однак надалі проглядається тенденція до зниження індексу. Це обумовлено посиленням теплових хвиль, частішими посухами та ймовірним збільшенням площ пожеж. Найвразливішими є піщані та легкосуглинкові ґрунти, а також покинуті сільськогосподарські землі, де відсутня захисна структура лісового покриву. Загальна втрата NDVI на таких ділянках може досягати 0.03–0.05 одиниць до 2050 року [15].

На рисунку 3.8 представлено графічне порівняння очікуваної динаміки NDVI за обома сценаріями. Видно, що навіть у разі помірного потепління рослинність зберігає потенціал до зростання, тоді як

інтенсивне потепління без пом’якшуючих заходів веде до ризиків вторинної деградації екосистем.

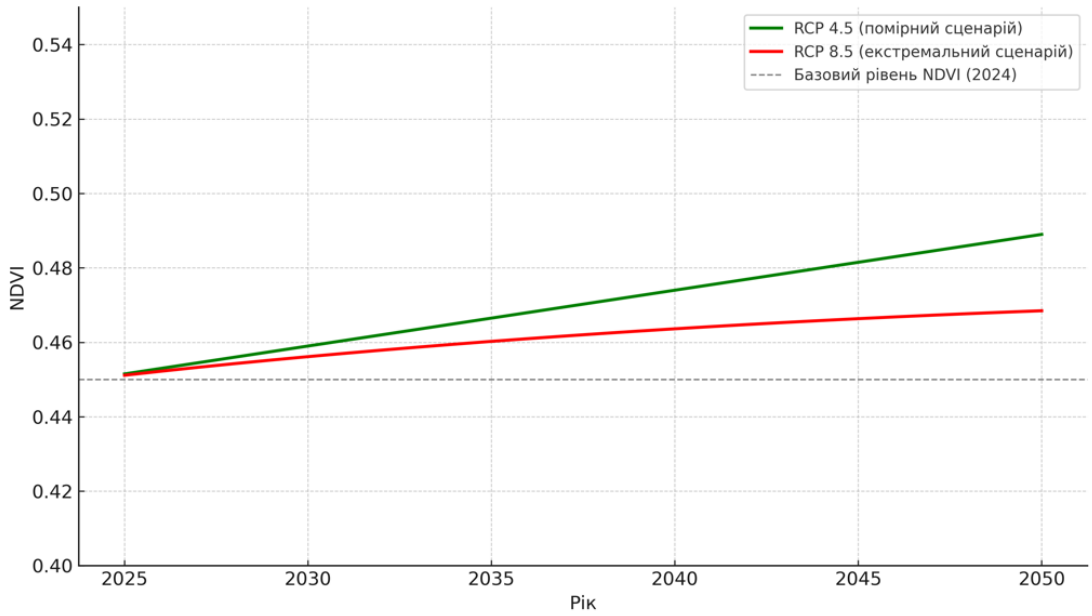


Рисунок 3.8 – Прогноз середнього NDVI для Чорнобильської зони до 2050 року

Таке прогнозування має важливе значення для стратегічного планування заходів з адаптації до змін клімату, збереження біорізноманіття та управління природними ресурсами на території ЧЗВ. Отримані результати підтверджують, що рослинний покрив зони є біосенситивним індикатором змін у кліматичній системі і потребує постійного супутникового моніторингу в поєднанні з моделями екосистемного реагування.

ВИСНОВКИ

В умовах глобальних кліматичних змін особливої актуальності набуває вивчення впливу кліматичних чинників на рослинний покрив, який є чутливим індикатором стану екосистем. У розділі 1 було показано, що зміни клімату в четвертинному періоді, а особливо у сучасному голоценовому та постіндустріальному етапах, суттєво трансформували ландшафтну структуру планети. В Україні ці зміни спричинили поступове зсування кліматичних зон, зміщення ареалів флори, порушення сезонної динаміки та зміни у типології рослинності.

У другому розділі розглянуто ключові методологічні інструменти, що дозволяють досліджувати ці трансформації – насамперед, геопросторові методи. Індекс NDVI, як базовий індикатор фотосинтетичної активності, у поєднанні з іншими індексами (EVI, SAVI, NBR), формує основу для вивчення просторово-часової динаміки рослинного покриву. Водночас було доведено, що саме інтеграція супутникових даних з кліматичними змінними, а також моделювання сценаріїв (наприклад, RCP 4.5 та RCP 8.5), дозволяє здійснювати прогностичний аналіз стану екосистем. Унікальність Чорнобильської зони відчуження полягає у відсутності антропогенного втручання, що робить її зручним природним полігоном для вивчення екологічних відповідей на зміну клімату.

Практична реалізація цього підходу була здійснена у третьому розділі. Аналіз супутникових даних за 1990–2024 роки засвідчив, що більшість типів рослинного покриву демонструють позитивний тренд NDVI, що вказує на процеси природної ренатуралізації. Водночас окремі ділянки, особливо постраждалі від лісових пожеж або з підвищеним радіаційним фоном, залишаються зонами деградації з низькими або нестабільними значеннями індексу.

Особливу увагу було приділено аналізу впливу лісової пожежі 2020 року, яка стала потужним природним стресором для лісових і лучних екосистем. Спостерігається чітке зниження NDVI у відповідних зонах, із подальшим уповільненим відновленням у наступні роки.

Сценарне прогнозування NDVI на період до 2050 року показало, що в разі реалізації помірного сценарію RCP 4.5 можливе збереження позитивної динаміки вегетації. Натомість екстремальний сценарій RCP 8.5 вказує на ризики деградації, особливо в чутливих типах ландшафтів. Це ще раз підкреслює важливість кліматичних факторів як детермінантів розвитку рослинного покриву.

Таким чином, дослідження доводить:

- високу ефективність супутникових методів (NDVI, NBR, ΔNBR) для моніторингу змін у рослинному покриві;
- наявність значущого статистичного зв’язку між NDVI та кліматичними параметрами (температура, опади);
- реальність сценарного прогнозування динаміки фітомаси у контексті кліматичних змін;
- практичну значущість Чорнобильської зони як «екологічної лабораторії» для аналізу природних процесів ренатуралізації в умовах пострадіаційного середовища.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, обґрунтування природоохоронних заходів та стратегічного планування адаптації до змін клімату на національному та регіональному рівнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ager A. A., Palaiologou P., Evers C. R., Day M. A., Ringo C., Short K. C. Wildfire issues in radioactive Chernobyl areas // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 433. P. 176–186.
2. Chernobyl Center for Nuclear Safety [Електронний ресурс]. URL: https://chnpp.gov.ua/
3. Copernicus Open Access Hub (Sentinel data) [Електронний ресурс]. URL: https://scihub.copernicus.eu/
4. ESA Climate Change Initiative [Електронний ресурс]. URL: https://climate.esa.int/
5. Euronews. What Chernobyl looks like now – in pictures. 2021. [Електронний ресурс]. URL: https://www.euronews.com/culture/2021/04/26/chernobyl-as-a-tourism-destination-what-is-it-like-in-pictures
6. FAO. Ukraine: Forests & climate adaptation. – Rome : FAO, 2020. 85 p. (FAO Forestry Working Paper; No. 14).
7. Google Earth Engine [Електронний ресурс]. URL: https://earthengine.google.com/
8. Harris S. An analysis of the affects of the 1986 Chernobyl nuclear disaster on surrounding vegetation within the exclusion zone using remotely sensed data. – 2009. – [Електронний ресурс]. URL: https://cricket.biol.sc.edu/chernobyl/papers/Harris-Chernobyl-NDVI.pdf
9. Huete A. R., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. MODIS vegetation indices overview // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83, No. 1–2. P. 195–213.
10. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. – Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. 142 p.
11. Kumar L., Mutanga O. Google Earth Engine: Usage and trends // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 10. P. 1509.
12. Land Viewer [Електронний ресурс]. URL: https://landviewer.com/

13. MODIS NDVI Data Portal [Електронний ресурс]. URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/

14. Modzelewska A., Jarocińska A. The vegetation condition changes near Chernobyl based on Landsat TM // *EARSeL Symposium Proceedings*. 2013. P. 637–639.

15. Myneni R. B., Williams D. L. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation // *Advances in Space Research*. 1994. Vol. 13, No. 11. P. 277–280.

16. NASA POWER Data Access Viewer [Електронний ресурс]. URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

17. NASA Worldview [Електронний ресурс]. URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov/

18. National Geographic: Chernobyl Nature [Електронний ресурс]. URL: https://www.nationalgeographic.com/environment/article/chernobyl

19. OpenForis Collect Earth [Електронний ресурс]. URL: https://openforis.org/tools/collect-earth/

20. Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J. M., Tucker C. J., Stenseth N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // *Trends in Ecology & Evolution*. 2005. Vol. 20, No. 9. P. 503–510.

21. Radiant Earth Foundation [Електронний ресурс]. URL: https://www.radiant.earth/

22. Sentinel Hub EO Browser [Електронний ресурс]. URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/

23. Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production // *International Journal of Remote Sensing*. 1986. Vol. 7, No. 11. P. 1395–1416.

24. UNEP GEO Data Portal [Електронний ресурс]. URL: https://geodata.grid.unep.ch/

25. USGS Earth Explorer [Електронний ресурс]. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/

26. Wang J., Rich P. M., Price K. P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24, No. 11. P. 2345–2364.

27. World Bank. Climate Resilience in Ukrainian Forestry. // Washington, D.C. : World Bank Group, 2022. – 112 p.

28. Wulder M. A., White J. C., Goward S. N., Masek J. G., Irons J. R., Herold M., Woodcock C. E. Continuity of Landsat observations: Short term considerations // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 185. P. 56–65.

29. Zhang S., Zhang Y., Zhang X., Miao C., Liu S., Liu J. NDVI and climate in shelter forests, China // *Journal of King Saud University – Science*. 2018. Vol. 30, No. 3. P. 288–295.

30. Zhang X., Liu L. NDVI trends in response to climate change in the Three-North Shelter Forest region, China // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 5765.

31. Бойченко С., Карамушка В., Кучма Т., Забарна О. Тенденції екологічних умов та клімату в Україні // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 9. 5664.

32. Герасименко Н. П. Вплив змін клімату на агроресурси Українського Полісся // *Agricultural and Resource Economics*. 2024. Vol. 10, No. 2. С. 5–17.

33. Дідук Ю. П. *Світ рослин України в аспекті зміни клімату*. Київ : Наук. думка, 2021. 254 с.

34. Іванишин О., Касіянчук М. Аналіз впливу змін клімату на рослинність Українських Карпат за допомогою NDVI // *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2022. Vol. 5, No. 2. С. 10–18.

35. Коваленко М. Дослідження впливу клімату на рослинний покрив Херсонської області // *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, No. 9. С. 212–218.

36. Кравцова В. І., Мойсієнко І. І. Зміни рослинності в Чорнобильській зоні відчуження // *Український ботанічний журнал*. 2020. Т. 77, № 3. С. 202–214.

37. Кучма Т., Веклич В. Оцінка NDVI та NDMI у парках м. Києва // *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23, No. 9. С. 212–218.

38. Молікевич, Р.С. Класифікація сцен ділянки дна Каховського водосховища за допомогою алгоритму ЄКА / Р. Молікевич // Катастрофа Каховського водосховища: рік «післязавтра» і перспектива майбутнього : зб. тез доповідей за матер. Міжнар. наук.-практ. конф., 06-07 червня 2024 р / [за ред. Д. С.

Мальчикової, О. Є. Ходосовцева, І. О. Пилипенка]. Херсон : Херсонський державний університет, 2024. С. 46-47.

39. Мойсієнко І. І., Суднік-Войціковська Б. Відновлення рослинності після пожеж у ЧЗВ // *International Journal of Radiation Biology*. 2023. Vol. 99, No. 1. С. 1–10.

40. Федонюк Т. П., Пивовар П. В. Просторова структура природних ландшафтів у Чорнобильській зоні відчуження // *Journal of Water and Land Development*. 2024. № 60. С. 77–88.

41. Швиденко А., Букша І., Лакіда П. Оцінка вразливості лісів України до змін клімату як основа для адаптації. –Рим : FAO, 2017. 96 с. (FAO Forestry Working Paper; No. 14).