

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка

Географічний факультет
Кафедра географії та методики її навчання

Кваліфікаційна робота
ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Спеціальність: 106 Географія
Освітньо-професійна програма «Географія»

Здобувача вищої освіти
освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»
КОРОЛЬ Роксолани Сергіївної

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
кандидат географічних наук, доцент
ТАРАНОВА Наталія Богданівна

РЕЦЕЗЕНТ:
кандидат географічних наук, доцент
ЗАСТАВЕЦЬКИЙ Тарас Богданович

Тернопіль – 2026

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню регіональних кліматичних змін із використанням геоінформаційних систем та методів просторового аналізу. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінювання сучасних проявів зміни клімату та їх впливу на природні й соціально-економічні системи. У роботі систематизовано теоретичні основи ГІС-моделювання кліматичних процесів, охарактеризовано основні джерела кліматичних і геопросторових даних, проаналізовано можливості застосування ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine у кліматичних дослідженнях. Особливу увагу приділено аналізу просторово-часових тенденцій температурних і гідрокліматичних змін, виявленню кліматичних аномалій та зон ризику, а також прогнозуванню можливих змін кліматичних умов до 2050 року. Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів дослідження для оцінювання кліматичних ризиків, планування адаптаційних заходів та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері сталого природокористування.

Ключові слова: ГІС-моделювання, кліматичні зміни, геоінформаційні системи, просторовий аналіз, дистанційне зондування Землі, кліматичні ризики, прогнозування, ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine.

Abstract

The qualification thesis is devoted to the study of regional climate change using geographic information systems and spatial analysis methods. The relevance of the research is determined by the need to assess current manifestations of climate change and their impact on natural and socio-economic systems. The paper systematizes the theoretical foundations of GIS-based climate modeling, characterizes the main sources of climate and geospatial data, and analyzes the possibilities of applying ArcGIS, QGIS, and Google Earth Engine in climate studies. Particular attention is paid to the analysis of spatial and temporal trends in temperature and hydroclimatic changes, the identification of climate anomalies and risk zones, and the forecasting of possible climate changes up to 2050. The practical significance of the study lies in the possibility of using the results for climate risk assessment, adaptation planning, and supporting decision-making in the field of sustainable natural resource management.

Key words: GIS modeling, climate change, geographic information systems, spatial analysis, remote sensing, climate risks, forecasting, ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН	6
1.1. Поняття, сутність і структура геоінформаційних систем	6
1.2. Сучасні підходи до моделювання кліматичних процесів	8
1.3. Роль ГІС у дослідженні просторово-часових закономірностей клімату....	11
1.4. Основні джерела кліматичних даних: супутникові, наземні та аналітичні.	14
1.5. Міжнародні та національні ініціативи у сфері моніторингу клімату	17
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН	22
2.1. Характеристика досліджуваного регіону та його кліматичних умов	22
2.2. Вибір і підготовка кліматичних та просторових даних	25
2.3. Використання програмних засобів ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine для моделювання кліматичних змін.....	29
2.4. Побудова баз даних і створення тематичних шарів кліматичних показників	38
2.5. Просторова візуалізація та інтерпретація кліматичних тенденцій	41
Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ЗАСОБАМИ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ	45
3.1. Просторово-часові тенденції температурних і гідрокліматичних змін в Україні	45
3.2. Виявлення кліматичних аномалій і зон ризику за результатами ГІС-моделювання	49
3.3. Регіональні сценарії кліматичних змін та їх прогнозування до 2050 року.	54
3.4. Використання результатів ГІС-аналізу у системі сталого природокористування	59
3.5. Практичні рекомендації для регіональних органів влади та освітніх установ	62
Висновки до розділу 3	67
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТКИ	77

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Кліматичні зміни є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Упродовж останніх десятиліть у різних регіонах світу, зокрема і в Україні, спостерігається підвищення середньорічної температури повітря, зміна режиму атмосферних опадів, збільшення частоти посух, паводків та інших небезпечних природних явищ. Такі процеси суттєво впливають на природні комплекси, сільське господарство, водні ресурси та умови життєдіяльності населення.

У сучасних умовах важливого значення набуває використання геоінформаційних систем (ГІС) для дослідження та аналізу кліматичних процесів. ГІС-технології дають можливість поєднувати статистичні, картографічні та супутникові дані, здійснювати просторовий аналіз кліматичних показників, виявляти території ризику та прогнозувати можливі зміни природного середовища.

Актуальність бакалаврської роботи полягає у необхідності дослідження регіональних кліматичних змін із використанням сучасних геоінформаційних технологій та методів просторового аналізу, що є важливим для здійснення екологічного моніторингу, раціонального природокористування та адаптації регіонів до змін клімату.

Об'єктом дослідження є регіональні кліматичні зміни та їх просторово-часові особливості.

Предметом дослідження є застосування геоінформаційних систем для аналізу та моделювання кліматичних змін.

Метою бакалаврської роботи є дослідження регіональних кліматичних змін із використанням геоінформаційних систем та методів просторового аналізу.

Для досягнення поставленої мети **визначено такі завдання:**

- проаналізувати теоретичні основи ГІС-моделювання кліматичних процесів;
- охарактеризувати джерела кліматичних і геопросторових даних;
- дослідити просторово-часові тенденції кліматичних змін;

- виконати картографування кліматичних показників засобами ГІС;
- визначити можливості використання ГІС-технологій для прогнозування кліматичних змін та обґрунтування адаптаційних заходів.

Методи дослідження. У роботі використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема аналіз, узагальнення, порівняння, статистичний, картографічний та геоінформаційний методи. Під час виконання роботи застосовано програмні засоби ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine. Для аналізу кліматичних показників використано відкриті кліматичні бази даних та супутникові ресурси NASA, NOAA, Copernicus і WorldClim.

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні сучасних підходів до використання геоінформаційних систем у дослідженні кліматичних змін та проведенні просторового аналізу кліматичних показників регіону.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання матеріалів дослідження органами місцевого самоврядування, природоохоронними установами та закладами освіти під час оцінки кліматичних ризиків, проведення екологічного моніторингу та в освітньому процесі.

Апробація результатів дослідження. Результати дослідження апробовано на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. За матеріалами роботи підготовлено дві публікації у формі тез доповідей, одна з яких опублікована у збірнику матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції «Advanced Technologies in Scientific Research» (Роттердам, Нідерланди, 2026). Окремі результати дослідження представлено на XXI International Scientific and Practical Conference «The Modern World and Scientific Research: Challenges, Forecasts, Solutions» та Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасна географічна освіта: інновації, виклики та перспективи розвитку» (Тернопіль, 2026).

Структура роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить таблиці, рисунки, тематичні карти та графічні матеріали.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ГІС- МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

1.1. Поняття, сутність і структура геоінформаційних систем

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій геоінформаційні системи (ГІС) стали важливим інструментом дослідження природних і суспільних процесів. Їх активно використовують у географії, екології, метеорології, природокористуванні та кліматичних дослідженнях [20, 21, 27, 39].

Геоінформаційна система – це інформаційна система, призначена для збору, зберігання, обробки, аналізу та відображення просторових даних. Основною особливістю ГІС є поєднання картографічної інформації з різними статистичними та природничими показниками у межах єдиного цифрового середовища [11; 21; 22].

Сучасні геоінформаційні системи дають можливість не лише створювати електронні карти, а й здійснювати аналіз просторових закономірностей, досліджувати природні процеси та моделювати можливі зміни навколишнього середовища. Особливе значення ГІС мають у дослідженнях кліматичних змін, оскільки дозволяють поєднувати метеорологічні спостереження, супутникові дані та результати кліматичних моделей [7; 8; 20].

Основними складовими геоінформаційної системи є:

- апаратне забезпечення;
- програмне забезпечення;
- бази даних;
- методи аналізу інформації;
- користувачі системи.

Апаратне забезпечення включає комп'ютери, сервери, GPS-приймачі та інші технічні засоби, необхідні для роботи з геопросторовими даними. Програмне забезпечення забезпечує створення, обробку та візуалізацію

картографічної інформації. Найбільш поширеними програмними продуктами у сфері ГІС є ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine [21; 29; 41].

Важливим елементом ГІС є база даних, яка містить просторову та атрибутивну інформацію. Просторові дані визначають географічне положення об'єктів, а атрибутивні – їх кількісні та якісні характеристики. У кліматичних дослідженнях такими показниками можуть бути температура повітря, кількість опадів, вологість, швидкість вітру та інші метеорологічні параметри [20; 33; 45].

У геоінформаційних системах використовують два основні типи моделей даних – векторну та растрову. Векторна модель застосовується для відображення окремих об'єктів у вигляді точок, ліній і полігонів. Растрова модель представлена у вигляді сітки пікселів і найчастіше використовується під час аналізу супутникових знімків та кліматичних показників [21; 27; 43].

Сучасні ГІС активно інтегруються із супутниковими системами дистанційного зондування Землі та міжнародними кліматичними платформами NASA, NOAA, Copernicus і WorldClim [7; 8; 52; 58]. Це дозволяє оперативно отримувати великі обсяги просторової інформації про стан навколишнього середовища та зміни клімату.

Особливо важливим є використання ГІС у процесі моделювання кліматичних змін. За допомогою геоінформаційних систем можна аналізувати просторово-часові тенденції температури повітря та атмосферних опадів, виявляти кліматичні аномалії та прогнозувати можливі зміни природного середовища [6; 14; 16].

Таким чином, геоінформаційні системи є важливим інструментом сучасних кліматичних досліджень. Їх використання забезпечує ефективний аналіз просторових даних, підвищує точність досліджень та сприяє прогнозуванню регіональних кліматичних змін.

1.2. Сучасні підходи до моделювання кліматичних процесів

Сучасні дослідження клімату базуються на використанні математичних, статистичних та геоінформаційних методів аналізу, що дають змогу оцінювати сучасний стан кліматичної системи та прогнозувати її можливі зміни [6, 10, 16].

Зростання кількості кліматичних аномалій, підвищення середньорічної температури повітря та зростання частоти й інтенсивності екстремальних гідрометеорологічних явищ зумовлюють необхідність прогнозування можливих змін клімату та оцінки їхнього впливу на природне середовище і господарську діяльність населення [6; 10; 16].

Моделювання кліматичних процесів передбачає дослідження взаємодії атмосфери, гідросфери, рослинного покриву та антропогенних чинників. Сучасні моделі дозволяють аналізувати зміни температури повітря, атмосферних опадів, циркуляції повітряних мас та інших кліматичних показників.

У сучасних кліматичних дослідженнях використовують кілька основних підходів до моделювання кліматичних процесів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Основні підходи до моделювання кліматичних процесів

Підхід до моделювання	Характеристика	Переваги	Недоліки
Статистичні методи аналізу кліматичних даних	Аналіз багаторічних кліматичних рядів	Простота аналізу	Залежність від повноти даних
ГІС-моделювання	Поєднання просторових і кліматичних даних	Візуалізація просторових змін	Потребує якісних геоданих
Глобальні кліматичні моделі (GCM)	Аналіз клімату на глобальному рівні	Можливість довгострокових прогнозів	Низька деталізація
Регіональні кліматичні моделі (RCM)	Моделювання для окремих територій	Вища точність регіональних прогнозів	Значні обчислювальні ресурси
Супутникове моделювання	Використання даних дистанційного зондування	Велике територіальне охоплення	Вплив атмосферних перешкод

Джерело: складено автором на основі [6; 7; 10; 16; 20]

Одними з найбільш поширених є глобальні кліматичні моделі (Global Climate Models – GCM), які використовуються для аналізу кліматичних змін на глобальному рівні. Такі моделі застосовуються Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (IPCC) для оцінки сценаріїв глобального потепління та прогнозування можливих змін клімату у майбутньому [6; 14].

Для детальнішого аналізу кліматичних процесів на окремих територіях використовують регіональні кліматичні моделі (Regional Climate Models – RCM). Вони дозволяють досліджувати локальні зміни температури повітря, режиму атмосферних опадів та частоти екстремальних погодних явищ [20; 34].

У сучасних кліматичних дослідженнях важливу роль відіграють геоінформаційні системи та технології дистанційного зондування Землі. Інтеграція ГІС-технологій із супутниковими даними, отриманими з платформ NASA, NOAA та Copernicus, забезпечує оперативний моніторинг стану навколишнього середовища, аналіз просторово-часових тенденцій і виявлення регіональних проявів кліматичних змін [7, 8, 9].

Для аналізу кліматичних показників також широко використовують статистичні методи дослідження. Вони базуються на аналізі багаторічних рядів метеорологічних спостережень і дозволяють виявляти тенденції зміни температури повітря, атмосферних опадів та інших кліматичних характеристик [17; 29].

Сучасні підходи до моделювання кліматичних процесів активно інтегруються з цифровими геоінформаційними платформами.

Найбільш поширеними програмними засобами є ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine та SAGA GIS, які використовуються для створення тематичних карт, просторового аналізу та візуалізації кліматичних змін.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика ГІС-платформ у кліматичних дослідженнях

Програмне забезпечення	Основне призначення	Переваги	Недоліки
ArcGIS	Просторовий аналіз і картографування	Висока функціональність	Комерційна ліцензія
QGIS	Відкрита ГІС-платформа	Безкоштовне використання	Менша кількість модулів
Google Earth Engine	Аналіз супутникових даних	Робота з великими обсягами даних	Потребує навичок програмування
SAGA GIS	Геостатистичний аналіз	Потужні аналітичні функції	Складніший інтерфейс

Джерело: складено автором на основі [21; 27; 29; 41; 55]

Таким чином, сучасні підходи до моделювання кліматичних процесів поєднують статистичні, геоінформаційні та супутникові методи дослідження. Використання ГІС-технологій та кліматичних моделей дозволяє ефективно аналізувати просторово-часові зміни клімату, виявляти території підвищеного ризику та прогнозувати можливі зміни природного середовища.



Рис. 1.1. Основні напрями використання ГІС у кліматичних дослідженнях

1.3. Роль ГІС у дослідженні просторово-часових закономірностей клімату

У сучасних кліматичних дослідженнях геоінформаційні системи є одним із ключових інструментів збору, обробки, аналізу та візуалізації просторово-часових даних, необхідних для вивчення закономірностей функціонування кліматичної системи [18, 19, 23, 35].

Активний розвиток ГІС-технологій значно розширив можливості дослідження кліматичних процесів, дозволивши інтегрувати різноманітні джерела інформації в єдину інформаційно-аналітичну систему [18, 19, 23, 35].

Особливого значення геоінформаційні системи набули у вивченні просторово-часових закономірностей клімату. Кліматичні процеси характеризуються складною територіальною диференціацією, що потребує використання сучасних методів просторового аналізу. За допомогою ГІС здійснюється оцінювання змін температурного режиму, аналіз розподілу атмосферних опадів, виявлення зон підвищеного кліматичного ризику та моделювання можливих змін природного середовища.

Однією з головних переваг ГІС є можливість поєднання різних типів інформації – метеорологічних спостережень, супутникових знімків, цифрових моделей рельєфу, статистичних матеріалів та кліматичних баз даних. Це забезпечує комплексний аналіз кліматичних процесів у просторовому та часовому аспектах [20; 39; 50].

Використання геоінформаційних систем дозволяє створювати тематичні карти кліматичних показників, аналізувати багаторічні тенденції зміни температури повітря, кількості атмосферних опадів, вологості, тривалості вегетаційного періоду та інших природних параметрів. ГІС також забезпечують можливість проведення просторової інтерполяції кліматичних даних, що особливо важливо для територій із недостатньою кількістю метеорологічних станцій.

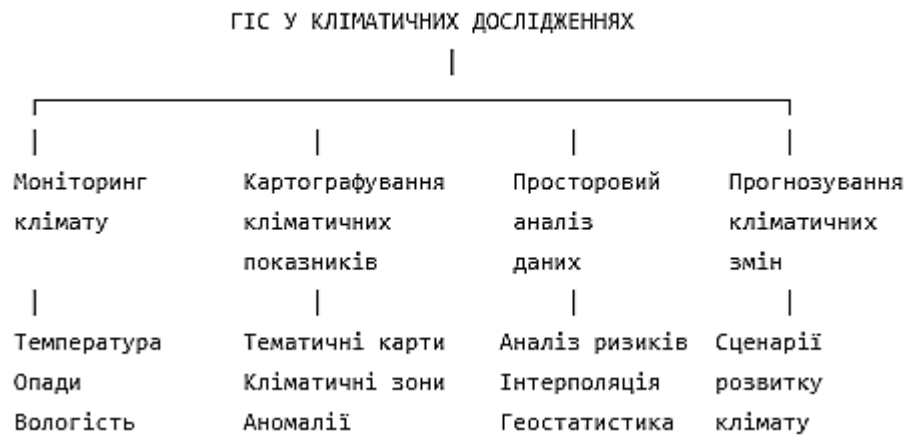


Рис. 1.2. Основні напрями використання ГІС у кліматичних дослідженнях

Джерело: складено автором на основі [20; 39; 52]

Як видно з рис. 1.2, використання ГІС у кліматичних дослідженнях охоплює всі основні етапи роботи з кліматичною інформацією – від збору та інтеграції даних до побудови прогнозних моделей і створення тематичних карт. Особливого значення набувають можливості просторового аналізу та моделювання, які дозволяють оцінювати сучасні кліматичні тенденції та прогнозувати їхній розвиток у майбутньому.

Важливе значення у кліматичних дослідженнях має інтеграція ГІС із технологіями дистанційного зондування Землі.

Дані дистанційного зондування Землі, отримані з платформ NASA, NOAA та Copernicus, забезпечують оперативний моніторинг температурних аномалій, змін рослинного покриву, вологості ґрунтів, характеристик атмосферного середовища та інших показників, що використовуються у кліматичних дослідженнях [7, 8, 9].

ГІС-технології активно використовуються для створення моделей просторового розподілу кліматичних показників. Просторове моделювання дозволяє виявляти закономірності зміни клімату в межах окремих регіонів, аналізувати вплив рельєфу, водних об'єктів та антропогенного навантаження на кліматичні процеси.

Таблиця 1.3

Основні можливості ГІС у дослідженні кліматичних процесів

Напрямок використання	Характеристика	Практичне значення
Моніторинг клімату	Аналіз багаторічних кліматичних даних	Виявлення тенденцій зміни клімату
Тематичне картографування	Створення карт температури, опадів, ризиків	Просторова візуалізація процесів
Геостатистичний аналіз	Просторова інтерполяція та аналіз даних	Побудова кліматичних моделей
Аналіз супутникових даних	Обробка даних дистанційного зондування	Моніторинг природного середовища
Прогнозування	Побудова сценаріїв кліматичних змін	Оцінювання можливих ризиків

Джерело: складено автором на основі [7; 20; 39; 50; 54]

Одним із найважливіших напрямів застосування ГІС є прогнозування кліматичних змін. Використання просторових моделей дозволяє оцінити можливі сценарії зміни температури повітря, кількості атмосферних опадів та частоти екстремальних погодних явищ у майбутньому. Це має важливе значення для планування природокористування, розвитку сільського господарства, управління водними ресурсами та формування адаптаційної політики [6; 14; 17].

У сучасних умовах геоінформаційні системи також активно використовуються у системі екологічного моніторингу. Поєднання кліматичних моделей із цифровими картографічними даними дозволяє оперативно оцінювати екологічний стан територій та прогнозувати можливі наслідки змін клімату для природних комплексів.

Таким чином, геоінформаційні системи є одним із ключових інструментів сучасних кліматичних досліджень. Їх використання забезпечує можливість комплексного аналізу просторово-часових закономірностей клімату, створення прогнозних моделей та формування науково обґрунтованих підходів до адаптації регіонів до сучасних кліматичних змін.

1.4. Основні джерела кліматичних даних: супутникові, наземні та аналітичні

Ефективність дослідження кліматичних процесів значною мірою залежить від якості та достовірності інформаційної бази. У сучасних кліматичних дослідженнях використовуються різноманітні джерела даних, які дозволяють здійснювати моніторинг стану атмосфери, аналізувати просторово-часові зміни кліматичних показників та проводити прогнозування можливих змін природного середовища [4, 7, 8, 9, 11].

Основними джерелами кліматичної інформації є наземні метеорологічні спостереження, супутникові дані дистанційного зондування Землі, глобальні кліматичні бази даних та результати математичного моделювання кліматичних процесів. Поєднання цих джерел у межах геоінформаційних систем забезпечує можливість комплексного аналізу кліматичних змін на глобальному, регіональному та локальному рівнях.

Традиційною основою кліматичних досліджень залишаються дані метеорологічних станцій. Наземні спостереження забезпечують отримання інформації про температуру повітря, атмосферний тиск, кількість опадів, швидкість вітру, вологість та інші метеорологічні показники. Саме багаторічні ряди спостережень дозволяють аналізувати тенденції зміни клімату та виявляти кліматичні аномалії [34; 38; 46].

В Україні важливу роль у зборі кліматичних даних відіграє Український гідрометеорологічний центр, який здійснює постійний моніторинг атмосферних процесів і формує офіційні кліматичні бази даних. Значення наземних спостережень полягає у високій точності метеорологічної інформації, однак суттєвим недоліком є нерівномірність розміщення метеостанцій, особливо у гірських та малодоступних районах.

У зв'язку з цим особливого значення набули технології дистанційного зондування Землі. Супутникові системи NASA, NOAA, Copernicus та інші міжнародні програми дозволяють отримувати оперативну інформацію про стан

атмосфери, поверхневу температуру, хмарність, рослинний покрив, вологість ґрунтів та інші компоненти природного середовища [7; 8; 9].

Супутникові дані мають низку переваг порівняно з традиційними методами спостереження. Насамперед це велике територіальне охоплення, висока оперативність оновлення інформації та можливість моніторингу важкодоступних територій. Особливо активно супутникові дані використовуються у процесах ГІС-моделювання та створення тематичних кліматичних карт.

Таблиця 1.4

Основні джерела кліматичних даних для ГІС-моделювання

Джерело даних	Тип інформації	Основне призначення
Метеорологічні станції	Температура, опади, вологість	Аналіз багаторічних кліматичних рядів
NASA Earth Observatory	Температурні аномалії, стан атмосфери	Супутниковий моніторинг клімату
NOAA	Атмосферні та океанічні процеси	Глобальний кліматичний аналіз
Copernicus Climate Data Store	Кліматичні сценарії та супутникові дані	Просторове моделювання
WorldClim	Глобальні кліматичні растрові дані	Побудова кліматичних карт
IPCC	Сценарії кліматичних змін (SSP, RCP), оцінки ризиків	Наукове обґрунтування прогнозів кліматичних змін

Джерело: складено автором на основі [6; 7; 8; 9; 11; 17]

У сучасних дослідженнях важливе місце займають глобальні кліматичні бази даних. Однією з найпоширеніших є база WorldClim, яка містить растрові кліматичні показники високої просторової деталізації. Такі бази даних активно використовуються для побудови цифрових моделей клімату, аналізу природних ризиків та прогнозування екологічних змін.

Значний внесок у розвиток кліматичних досліджень здійснює Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC), яка формує міжнародні сценарії глобальних кліматичних змін та оцінює можливі наслідки глобального потепління [6; 14]. Матеріали IPCC використовуються як наукова основа для створення кліматичних моделей і прогнозів.

Важливим напрямом сучасних досліджень є використання аналітичних та статистичних джерел інформації. До них належать результати наукових досліджень, державні кліматичні звіти, аналітичні доповіді міжнародних організацій та електронні кліматичні ресурси. Такі джерела дозволяють оцінювати тенденції кліматичних змін, аналізувати ризики та розробляти адаптаційні заходи.

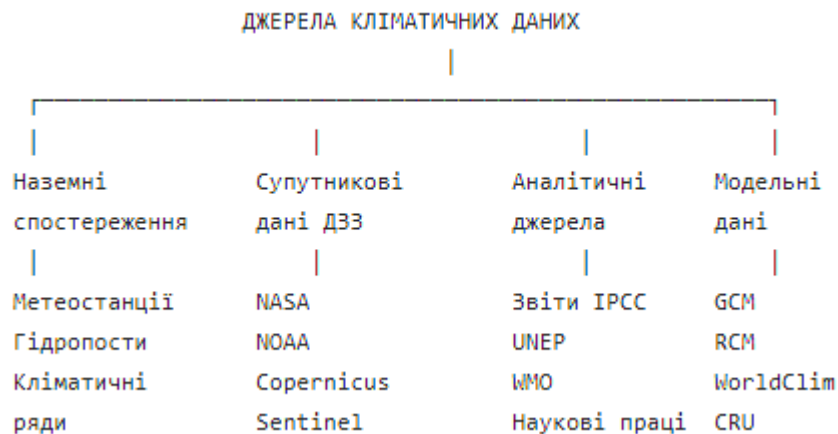


Рис. 1.3. Класифікація основних джерел кліматичних даних

Джерело: складено автором на основі [6; 7; 8; 9; 17; 42]

Сучасні геоінформаційні системи дозволяють інтегрувати різні типи кліматичних даних у межах єдиного цифрового середовища. Це забезпечує можливість комплексного аналізу кліматичних процесів, створення тематичних карт, виявлення просторових закономірностей та побудови прогнозних моделей.

Таким чином, сучасні джерела кліматичних даних формують основу для ефективного дослідження кліматичних змін та розвитку геоінформаційного моделювання. Поєднання наземних спостережень, супутникових ресурсів, глобальних кліматичних баз та аналітичних матеріалів забезпечує високий рівень достовірності й комплексності кліматичних досліджень.

1.5. Міжнародні та національні ініціативи у сфері моніторингу клімату

У сучасних умовах зміна клімату розглядається світовою спільнотою як одна з найважливіших глобальних проблем, що потребує міжнародної співпраці, постійного моніторингу та впровадження комплексної кліматичної політики. Саме тому упродовж останніх десятиліть сформовано систему міжнародних та національних організацій, програм і нормативних документів, спрямованих на дослідження кліматичних процесів, оцінювання екологічних ризиків та адаптацію до сучасних кліматичних змін [2, 6, 13, 14, 17].

Однією з ключових міжнародних структур у сфері дослідження кліматичних змін є Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC), створена у 1988 році Всесвітньою метеорологічною організацією (WMO) та Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP). Основним завданням IPCC є узагальнення сучасних наукових знань про зміну клімату, оцінювання її наслідків та розроблення сценаріїв майбутніх кліматичних змін [6, 14].

Важливу роль у системі глобального кліматичного моніторингу відіграє Всесвітня метеорологічна організація (WMO), яка координує міжнародні метеорологічні спостереження, забезпечує обмін кліматичною інформацією та здійснює оцінювання стану атмосфери. Саме WMO формує міжнародні стандарти метеорологічних спостережень і забезпечує функціонування глобальної системи кліматичного моніторингу [17].

Суттєве значення у сфері дослідження кліматичних змін мають також програми NASA, NOAA та Copernicus. Ці організації забезпечують отримання супутникових даних дистанційного зондування Землі, що використовуються для аналізу температурних аномалій, змін рослинного покриву, вологості ґрунтів та інших кліматичних показників [7; 8; 9].

Таблиця 1.5

**Основні міжнародні організації та програми у сфері моніторингу
клімату**

Організація / програма	Основний напрям діяльності	Значення для кліматичних досліджень
IPCC	Оцінювання глобальних кліматичних змін	Формування міжнародних кліматичних сценаріїв
WMO	Глобальний метеорологічний моніторинг	Аналіз атмосферних процесів
UNEP	Екологічна політика та клімат	Розроблення екологічних програм
NASA	Супутниковий моніторинг Землі	Отримання кліматичних даних
NOAA	Дослідження атмосфери та океану	Глобальний аналіз клімату
Copernicus	Моніторинг навколишнього середовища	Аналіз супутникової інформації
UNFCCC	Міжнародна кліматична політика	Координація кліматичних угод

Джерело: складено автором на основі [2; 6; 8; 9; 13; 14; 17]

Важливим міжнародним документом у сфері кліматичної політики є Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (UNFCCC), головною метою якої є стабілізація концентрації парникових газів в атмосфері та запобігання небезпечному антропогенному впливу на кліматичну систему. У межах цієї конвенції країни світу розробляють національні плани адаптації та скорочення викидів парникових газів [14].

Європейський Союз активно реалізує політику кліматичної нейтральності через програму European Green Deal, яка передбачає скорочення викидів парникових газів, розвиток екологічно безпечних технологій та вдосконалення системи екологічного моніторингу [2; 3].

В Україні питання моніторингу кліматичних змін та адаптації до них регулюються низкою нормативно-правових документів. Основними серед них є Закони України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів», а також

Концепція реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року [31; 32; 33; 55; 56].

Важливу роль у реалізації кліматичної політики України відіграє Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, яке координує виконання міжнародних кліматичних зобов'язань держави та здійснює формування національної екологічної політики [42].

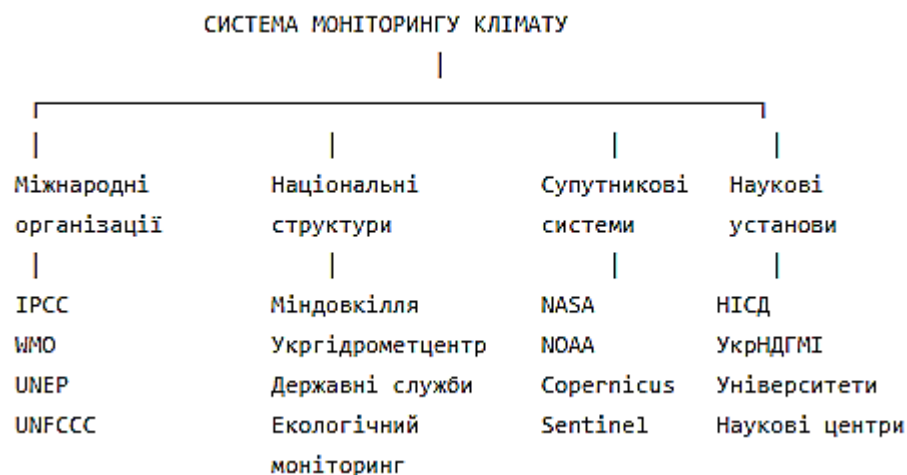


Рис. 1.4. Система моніторингу кліматичних змін

Джерело: складено автором на основі [2; 6; 8; 14; 17; 42]

На сучасному етапі розвитку науки важливим напрямом є інтеграція міжнародних кліматичних програм із геоінформаційними технологіями. Використання супутникових ресурсів, цифрових кліматичних моделей та відкритих баз геоданих дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу природного середовища та оперативність отримання кліматичної інформації.

Таким чином, міжнародні та національні ініціативи у сфері моніторингу клімату формують основу сучасної системи дослідження кліматичних змін. Їх діяльність спрямована на забезпечення наукового аналізу кліматичних процесів, формування адаптаційної політики та підвищення екологічної безпеки в умовах сучасних глобальних викликів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У результаті проведеного теоретико-методологічного аналізу встановлено, що геоінформаційні системи є одним із найбільш ефективних інструментів сучасних кліматичних досліджень. Їх використання забезпечує можливість збору, зберігання, обробки, аналізу та візуалізації значних обсягів просторової інформації, необхідної для дослідження кліматичних процесів та їх територіальних проявів.

З'ясовано, що сучасні підходи до моделювання кліматичних процесів ґрунтуються на поєднанні статистичних методів аналізу, геоінформаційних технологій, супутникового моніторингу та кліматичних моделей. Використання глобальних і регіональних кліматичних моделей дозволяє оцінювати сучасний стан кліматичної системи, аналізувати просторово-часові тенденції її змін та прогнозувати можливі сценарії розвитку кліматичних процесів у майбутньому.

Встановлено, що геоінформаційні системи відіграють важливу роль у дослідженні просторово-часових закономірностей клімату. Завдяки інтеграції різномірних джерел інформації ГІС забезпечують можливість проведення комплексного аналізу кліматичних показників, створення тематичних карт, виявлення кліматичних аномалій, оцінювання територіальних ризиків та побудови прогнозних моделей.

Досліджено основні джерела кліматичних даних, серед яких особливе значення мають наземні метеорологічні спостереження, супутникові дані дистанційного зондування Землі, глобальні кліматичні бази даних та результати кліматичного моделювання. Встановлено, що поєднання даних метеостанцій із супутниковими ресурсами NASA, NOAA, Copernicus, WorldClim та іншими відкритими платформами забезпечує високий рівень достовірності та просторової деталізації кліматичних досліджень.

Проаналізовано діяльність міжнародних і національних організацій у сфері моніторингу кліматичних змін. Визначено, що сучасна система кліматичного моніторингу базується на співпраці таких організацій, як IPCC,

WMO, UNEP, NASA, NOAA, Copernicus та національних установ, що забезпечують збір, аналіз та поширення кліматичної інформації. Їх діяльність спрямована на вдосконалення системи спостережень за станом клімату, розроблення сценаріїв майбутніх змін та формування адаптаційної політики.

Отже, проведений аналіз теоретичних засад ГІС-моделювання підтверджує доцільність використання геоінформаційних технологій для дослідження регіональних кліматичних змін. Теоретичні положення, розглянуті у першому розділі, стали науково-методичною основою для подальшого формування бази кліматичних і геопросторових даних, виконання ГІС-аналізу та моделювання просторових проявів кліматичних змін на території України у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

2.1. Характеристика досліджуваного регіону та його кліматичних умов

Досліджуваною територією у роботі є Україна, яка характеризується значною різноманітністю природних умов та кліматичних особливостей. Географічне положення держави в межах помірною кліматичного поясу, особливості атмосферної циркуляції, рельєфу та підстильної поверхні зумовлюють формування різних кліматичних умов у межах окремих регіонів країни [6, 17].

Україна розташована у східній частині Європи та займає площу 603,7 тис. км². Територія держави простягається із заходу на схід майже на 1316 км, а з півночі на південь – на 893 км. Значна протяжність території та різноманітність природних умов сприяють формуванню виражених просторових відмінностей кліматичних показників [6].

Клімат України переважно помірно континентальний. Ступінь континентальності зростає із заходу на схід, що пов'язано зі зменшенням впливу вологих атлантичних повітряних мас. Найбільший вплив Атлантики відчувається у західних областях країни, де спостерігаються вищі показники зволоження та менш контрастний температурний режим. У східних і південних регіонах переважають більш посушливі умови та вищі річні амплітуди температур повітря [17, 26].

Особливий вплив на формування клімату мають рельєф та великі водні об'єкти. Українські Карпати виступають природним бар'єром на шляху повітряних мас, що сприяє збільшенню кількості атмосферних опадів та формуванню висотної кліматичної поясності. На півдні кліматичні умови зазнають впливу Чорного та Азовського морів, які пом'якшують температурний режим і впливають на розподіл опадів [6].

Температурний режим території України характеризується чіткою сезонністю. Середні температури січня змінюються від близько -8°C на північному сході до 0°C і вище на південному узбережжі. У липні середні температури становлять від $+18^{\circ}\text{C}$ у західних областях до $+23^{\circ}\text{C}$ у степовій зоні півдня країни. В останні десятиліття спостерігається стійка тенденція до підвищення середньорічної температури повітря, що є одним із проявів сучасних кліматичних змін [17, 32, 34].

Розподіл атмосферних опадів територією України також має виражені регіональні особливості. Найбільша кількість опадів характерна для Українських Карпат, де їх річна сума перевищує 1000-1400 мм. На рівнинній частині країни річна кількість опадів поступово зменшується із заходу на схід і з північного заходу на південний схід. Найменші показники зволоження спостерігаються у степових районах Причорномор'я та Приазов'я [17, 26].

Сучасні дослідження свідчать про посилення проявів кліматичних змін на території України. До основних тенденцій належать підвищення середньорічної температури повітря, збільшення тривалості теплого періоду року, зміна режиму атмосферних опадів, зростання частоти хвиль тепла, посух, сильних злив та інших екстремальних погодних явищ [23, 32, 33, 34, 51, 64].

Для аналізу просторових особливостей клімату та їх змін доцільним є використання геоінформаційних технологій. ГІС забезпечують можливість інтеграції даних метеорологічних спостережень, супутникової інформації, цифрових моделей рельєфу та кліматичних баз даних у межах єдиного інформаційного середовища. Це дозволяє здійснювати просторовий аналіз кліматичних процесів, виявляти регіональні відмінності та прогнозувати можливі зміни природного середовища [21, 22, 28, 55].

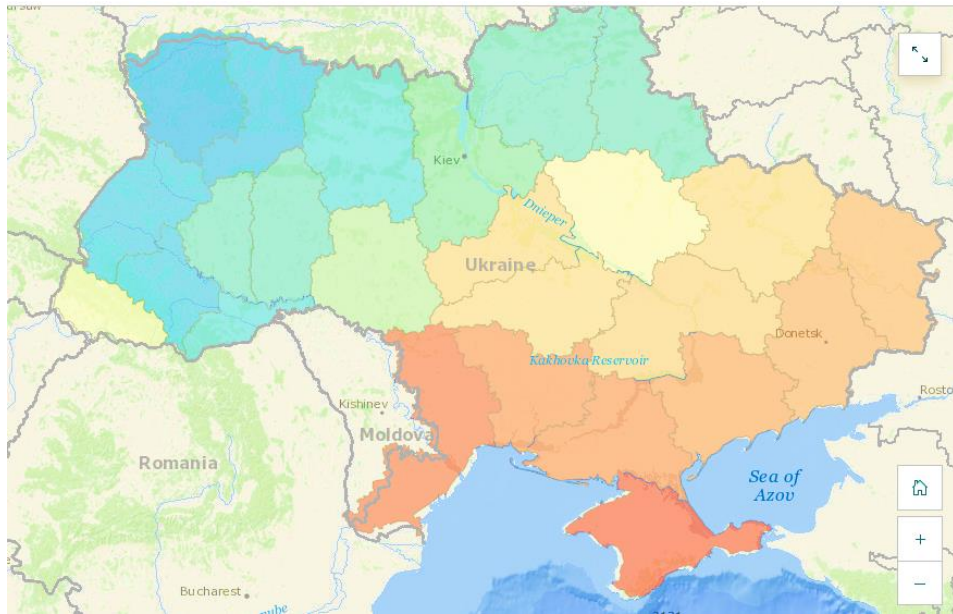


Рис. 2.1. Кліматичне районування території України

Джерело: складено автором на основі [6, 17, 23]

Як видно з рис. 2.1, територія України характеризується значною просторовою диференціацією кліматичних умов. Західні області відзначаються більш вологим кліматом і меншими температурними контрастами, тоді як для південних та східних регіонів характерними є вищі температури повітря та дефіцит атмосферного зволоження. Відмінності кліматичних умов між окремими регіонами визначають необхідність застосування геоінформаційних технологій для дослідження сучасних кліматичних змін та їх територіальних проявів.

Отже, територія України характеризується значною різноманітністю кліматичних умов, що обумовлено особливостями географічного положення, рельєфу, атмосферної циркуляції та впливом водних об'єктів. Просторові відмінності температурного режиму, зволоження та проявів екстремальних погодних явищ створюють підґрунтя для застосування ГІС-технологій з метою аналізу й моделювання регіональних кліматичних змін.

2.2. Вибір і підготовка кліматичних та просторових даних

Якість результатів ГІС-моделювання значною мірою залежить від достовірності та повноти вихідних даних. Для дослідження регіональних кліматичних змін на території України використовувалися кліматичні, геопросторові та статистичні дані, отримані з відкритих міжнародних і національних джерел. Вибір інформаційної бази здійснювався з урахуванням її доступності, актуальності, просторової деталізації та можливості використання в геоінформаційних системах [21, 22, 43, 44].

Основу дослідження становили кліматичні дані, що характеризують температурний режим, кількість атмосферних опадів та інші показники кліматичної системи. Для аналізу сучасних кліматичних тенденцій використовувалися відкриті набори даних міжнародних кліматичних платформ WorldClim, Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service), NASA Earth Observatory та NOAA [43, 44, 52, 53, 54, 65].

База WorldClim містить глобальні кліматичні дані у растровому форматі з високою просторовою роздільною здатністю, що дозволяє здійснювати аналіз просторового розподілу температури повітря та атмосферних опадів. Дані цієї платформи широко використовуються для кліматичного моделювання, екологічних досліджень та оцінювання впливу змін клімату на природні комплекси [65].

Для уточнення сучасних кліматичних тенденцій використовувалися матеріали Copernicus Climate Change Service та Climate Data Store, які забезпечують доступ до глобальних і регіональних кліматичних наборів даних, результатів кліматичного моделювання та сценаріїв майбутніх змін клімату [43, 44]. Додатковим джерелом інформації стали дані NASA та NOAA, що містять результати супутникових спостережень за температурними аномаліями, атмосферними процесами та станом навколишнього середовища [52, 53, 54].

Важливим джерелом просторової інформації для дослідження кліматичних змін є дані дистанційного зондування Землі. Супутникові місії Sentinel-2, Landsat

8-9 та MODIS забезпечують регулярне отримання інформації про стан земної поверхні, рослинного покриву, температури поверхні, вологості ґрунтів та інших природних компонентів. Використання таких даних дозволяє аналізувати просторові особливості прояву кліматичних змін та оцінювати їх вплив на природні комплекси й господарську діяльність населення.



Рис. 2.2. Супутниковий знімок території м. Тернополя та прилеглих територій за даними Sentinel-2

Джерело: сформовано автором за допомогою Sentinel Hub EO Browser на основі даних Sentinel-2

На рис. 2.2 представлено супутниковий знімок території м. Тернополя та його околиць, отриманий за допомогою сервісу Sentinel Hub EO Browser. Знімок відображає просторову структуру території, включаючи урбанізовані ділянки міста, сільськогосподарські угіддя, природні екосистеми та водні об'єкти. Чітко простежується акваторія Тернопільського ставу, яка є важливим природним елементом міського середовища та впливає на формування локальних мікрокліматичних особливостей.

Використання супутникових даних дозволяє здійснювати оперативний моніторинг змін земного покриву, аналізувати стан рослинності, оцінювати рівень урбанізації території та досліджувати просторові особливості прояву

кліматичних змін. Дані дистанційного зондування Землі широко використовуються у сучасних геоінформаційних дослідженнях для створення тематичних карт, розрахунку індексів рослинності та оцінювання екологічного стану територій [43; 44; 45; 50; 57].

Поряд із кліматичними показниками використовувалися просторові дані, необхідні для геоінформаційного аналізу. До них належали адміністративні межі України та її областей, цифрові моделі рельєфу, гідрографічна мережа, межі природних зон і дані дистанційного зондування Землі. Використання просторових даних дозволило оцінити територіальні особливості прояву кліматичних змін та виконати їх картографічну візуалізацію [21, 27, 39].

Перед використанням у середовищі ГІС усі дані проходили попередню підготовку. На цьому етапі здійснювалися перевірка повноти інформації, усунення технічних помилок, приведення даних до єдиної системи координат, перетворення форматів файлів та узгодження просторової прив'язки даних. Особлива увага приділялася сумісності кліматичних і геопросторових наборів даних для подальшого аналізу та моделювання [21, 22, 29].

Таблиця 2.1

**Основні джерела даних, використані для ГІС-моделювання
кліматичних змін**

Джерело даних	Тип даних	Призначення
WorldClim	Растрові кліматичні дані	Аналіз температури та опадів
Climate Data Store (Copernicus)	Кліматичні набори даних і сценарії	Оцінювання кліматичних тенденцій
NASA Earth Observatory	Супутникові дані	Моніторинг кліматичних змін
NOAA	Атмосферні та океанічні дані	Аналіз кліматичних процесів
Дані дистанційного зондування Землі	Просторові дані	Картографування та аналіз території
Адміністративні межі України	Векторні дані	Просторовий аналіз та візуалізація

Джерело: складено автором на основі [21, 43, 44, 52, 54, 65]

Важливим етапом підготовки інформації було створення єдиної бази геоданих, що містила кліматичні показники та просторові характеристики території України. Формування такої бази забезпечило можливість подальшого виконання просторового аналізу, побудови тематичних карт і моделювання регіональних кліматичних змін [21, 28].

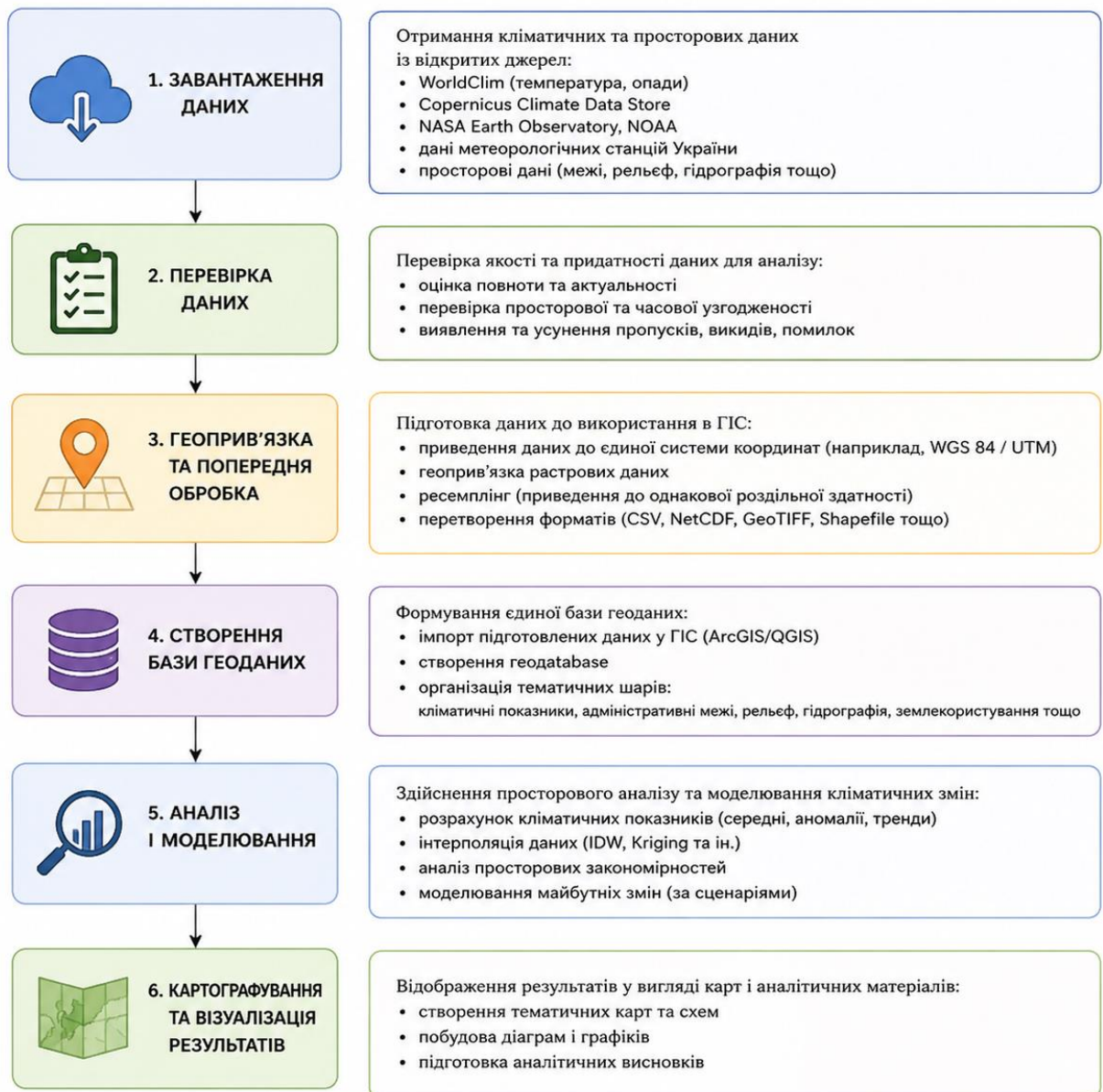


Рис. 2.3. Етапи підготовки даних для ГІС-моделювання регіональних кліматичних змін

Джерело: складено автором

Як показано на рис. 2.3, підготовка даних для ГІС-моделювання кліматичних змін є багатоетапним процесом, який передбачає збір вихідної інформації з різних джерел, перевірку її якості та повноти, попередню обробку і приведення до єдиного формату. Важливими етапами є геоприв'язка даних, формування бази геоданих та створення тематичних інформаційних шарів. Після цього здійснюється просторовий аналіз і моделювання кліматичних показників із використанням геоінформаційних технологій. Завершальним етапом є візуалізація результатів у вигляді тематичних карт, схем і просторових моделей, що дозволяє наочно відобразити особливості регіональних кліматичних змін та їх територіальну диференціацію.

Отже, для проведення ГІС-моделювання регіональних кліматичних змін було сформовано комплексну інформаційну базу, яка поєднує кліматичні, супутникові та геопросторові дані. Використання різномірних джерел інформації забезпечило можливість виконання просторового аналізу кліматичних показників, виявлення регіональних особливостей їх змін та створення картографічних моделей для території України.

2.3. Використання програмних засобів ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine для моделювання кліматичних змін

Одним із ключових етапів дослідження регіональних кліматичних змін є використання сучасних геоінформаційних технологій, які забезпечують обробку, аналіз та візуалізацію великих масивів просторових даних. Для виконання дослідження використовувалися програмні засоби ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine, що дозволяють працювати з кліматичними, картографічними та супутниковими даними в межах єдиного інформаційного середовища [21, 22, 41, 50, 56].

Важливими інструментами сучасного ГІС-моделювання є вебгеоінформаційні платформи та сервіси дистанційного зондування Землі, які забезпечують доступ до багаторічних архівів супутникових даних і тематичних

картографічних шарів. Такі ресурси дозволяють аналізувати структуру земного покриття, зміни землекористування та потенційну вразливість територій до кліматичних змін.



Рис. 2.4. Перегляд легенди шару Sentinel-2 10 m Land Use/Land Cover Time Series у середовищі веб-ГІС

Джерело: сформовано автором на основі сервісу Copernicus Global Land Service

Шар Sentinel-2 10 m Land Use/Land Cover Time Series містить інформацію про сучасну структуру земного покриття з просторовою роздільною здатністю 10 м. За допомогою легенди шару здійснюється класифікація території за основними категоріями землекористування та земного покриття, зокрема водними об'єктами, лісами, сільськогосподарськими угіддями, забудованими територіями, відкритими ґрунтами та іншими типами поверхні. Такі дані широко використовуються для оцінювання впливу змін землекористування на природне середовище та аналізу взаємозв'язків між кліматичними процесами й антропогенними перетвореннями території [45; 50; 57].

Програмний комплекс ArcGIS належить до професійних геоінформаційних систем і широко застосовується для виконання просторового аналізу, створення тематичних карт та моделювання природних процесів. У межах дослідження ArcGIS використовувався для роботи з векторними і растровими даними, побудови тематичних карт кліматичних показників, аналізу просторових закономірностей їх розподілу та візуалізації результатів моделювання [21, 41].

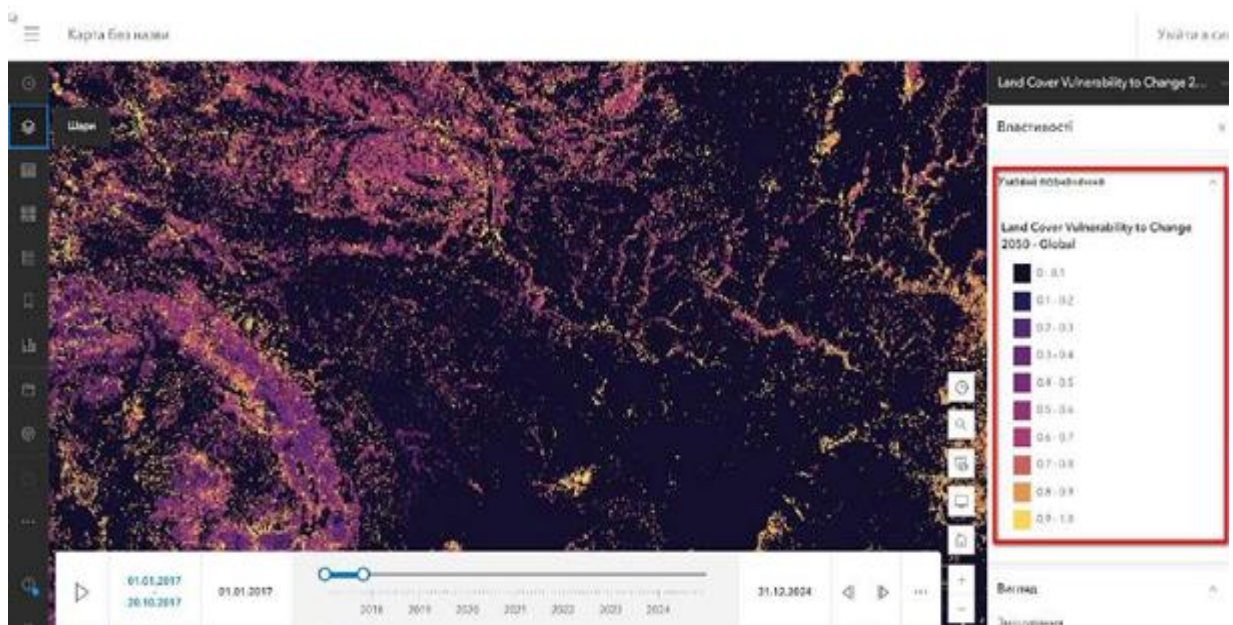


Рис. 2.5. Перегляд легенди шару Land Cover Vulnerability to Change 2050 – Global

Джерело: сформовано автором на основі глобальної моделі прогнозування змін земного покриву

Для оцінювання можливих майбутніх змін земного покриву використовуються прогнозні тематичні шари. Одним із таких є Land Cover Vulnerability to Change 2050 – Global, який відображає просторовий розподіл вразливості територій до змін землекористування до 2050 року. Значення показника варіюють від низького до високого рівня вразливості та дозволяють визначати території, де можуть відбутися найбільш суттєві трансформації природного середовища під впливом кліматичних та антропогенних чинників. Використання подібних картографічних матеріалів є важливим елементом

прогнозування регіональних кліматичних змін і планування адаптаційних заходів [44; 45; 50; 57].

Одним із найбільш поширених відкритих програмних продуктів у сфері геоінформаційних технологій є QGIS. Його перевагами є безкоштовне використання, підтримка великої кількості форматів геоданих та можливість виконання просторового аналізу за допомогою додаткових модулів. У даному дослідженні QGIS застосовувався для підготовки просторових шарів, візуалізації кліматичних показників, роботи з атрибутивними таблицями та створення картографічних матеріалів [21, 22, 56].

Важливе місце у сучасних кліматичних дослідженнях посідає платформа Google Earth Engine, яка надає доступ до великих архівів супутникових даних та забезпечує їх обробку в хмарному середовищі. Платформа містить дані супутникових місій Landsat, Sentinel, MODIS та інших джерел дистанційного зондування Землі. Використання Google Earth Engine дозволяє оперативно отримувати просторову інформацію про стан природного середовища та аналізувати зміни кліматичних показників на різних територіальних рівнях [45, 50, 57, 62].

Для виконання просторового аналізу кліматичних показників та роботи із супутниковими даними також використовувалися інструменти платформи Copernicus Browser, яка забезпечує доступ до архівів супутникових спостережень програми Copernicus. Платформа дозволяє здійснювати пошук, візуалізацію та аналіз даних дистанційного зондування Землі, а також працювати з тематичними шарами, що характеризують стан атмосфери, земного покриву та окремих компонентів навколишнього середовища.

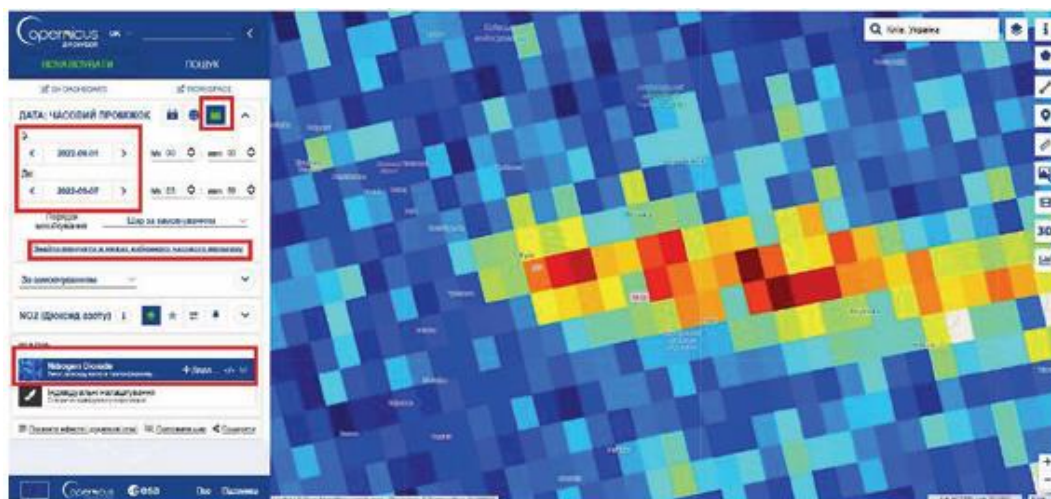


Рис. 2.6. Вибір часового проміжку для відображення середньої концентрації діоксиду азоту (NO₂) у середовищі Copernicus Browser

Джерело: сформовано автором за допомогою сервісу Copernicus Browser

На рис. 2.6 представлено інтерфейс налаштування часових параметрів для відображення середньої концентрації діоксиду азоту (NO₂). Однією з важливих переваг платформи є можливість вибору довільного часового інтервалу для аналізу супутникових даних. Це дозволяє здійснювати моніторинг змін атмосферного середовища в різні сезони року, порівнювати багаторічні тенденції та оцінювати просторові особливості розподілу забруднювальних речовин. Аналіз таких показників є важливим під час дослідження впливу урбанізації та антропогенного навантаження на стан атмосферного повітря.

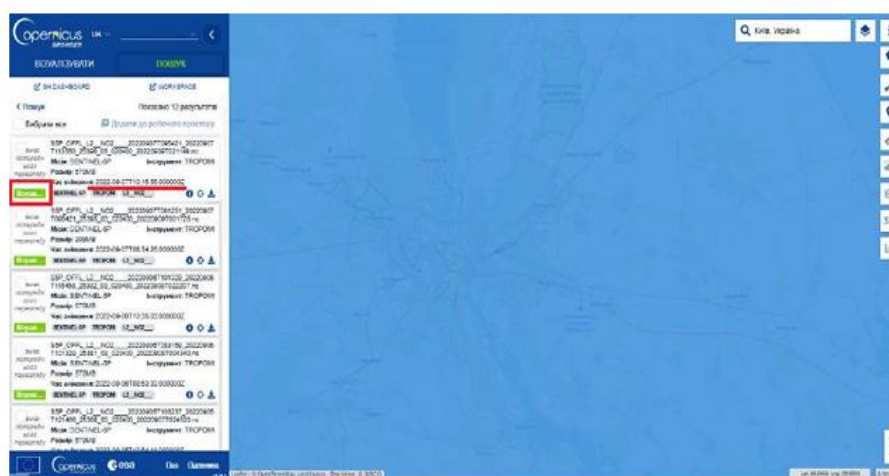


Рис. 2.7. Перелік доступних супутникових знімків у сервісі Copernicus Browser

Джерело: сформовано автором за допомогою сервісу Copernicus Browser

Платформа Copernicus Browser забезпечує доступ до великого архіву супутникових даних Sentinel, що дозволяє проводити ретроспективний аналіз змін природного середовища. Як видно з рис. 2.7, користувач має можливість обирати знімки за датою зйомки, рівнем обробки даних, відсотком хмарності та іншими характеристиками. Наявність багаторічних архівів даних створює можливість для аналізу просторово-часової динаміки кліматичних процесів та виявлення довготривалих тенденцій змін природного середовища.

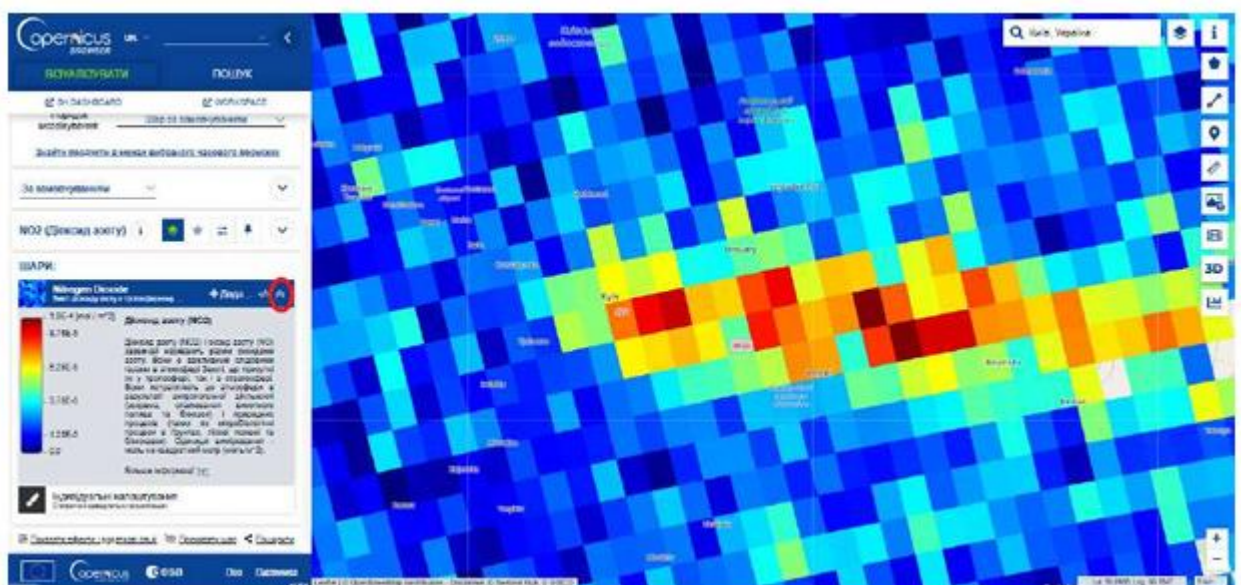


Рис. 2.8. Відкриття кольорової шкали та додаткової інформації про концентрацію діоксиду азоту (NO₂)

Джерело: сформовано автором за допомогою сервісу Copernicus Browser

Для коректної інтерпретації супутникових даних важливе значення має використання тематичних легенд і кольорових шкал. На рис. 2.8 показано приклад відображення просторового розподілу концентрації діоксиду азоту за допомогою градієнтної шкали кольорів. Темні та сині відтінки характеризують території з нижчими значеннями показника, тоді як жовті, помаранчеві та червоні кольори відображають ділянки з підвищеним рівнем концентрації забруднювальної речовини. Подібний підхід дозволяє швидко виявляти території

екологічного ризику та оцінювати вплив антропогенних факторів на стан атмосферного повітря.

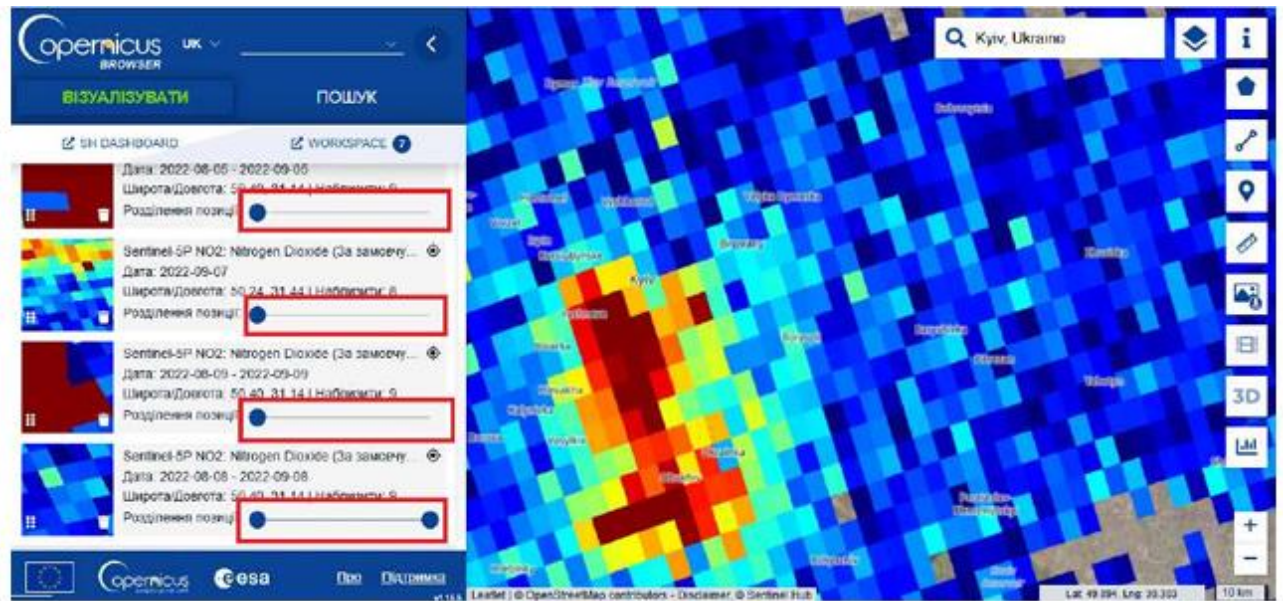


Рис. 2.9. Результат накладання супутникових знімків за різні дати під час порівняльного аналізу

Джерело: сформовано автором за допомогою сервісу Copernicus Browser.

Однією з важливих функцій сучасних геоінформаційних платформ є можливість порівняння супутникових знімків, отриманих у різні часові періоди. На рис. 2.9 представлено приклад накладання супутникових даних за різні дати спостережень. Такий підхід дозволяє виявляти зміни земного покриття, аналізувати динаміку розвитку урбанізованих територій, оцінювати зміни рослинності та відстежувати прояви кліматичних змін. Порівняльний аналіз супутникових знімків є одним із найефективніших інструментів моніторингу довкілля та просторового аналізу природних процесів.

Отже, використання платформ Copernicus Browser та Google Earth Engine значно розширює можливості сучасних геоінформаційних досліджень. Поєднання супутникових даних із можливостями ArcGIS і QGIS забезпечує комплексний аналіз просторових закономірностей кліматичних змін, підвищує

достовірність отриманих результатів та сприяє створенню ефективних моделей оцінювання стану природного середовища.

У процесі дослідження зазначені програмні засоби використовувалися комплексно. Google Earth Engine забезпечував доступ до супутникових даних та їх попередню обробку, тоді як ArcGIS і QGIS застосовувалися для створення баз геоданих, виконання просторового аналізу та побудови тематичних карт. Поєднання можливостей цих програмних продуктів дозволило підвищити ефективність обробки інформації та забезпечити наочне відображення результатів дослідження [21, 41, 50, 56].

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика програмних засобів, використаних у дослідженні

Програмний засіб	Основне призначення	Використання у дослідженні
ArcGIS	Просторовий аналіз та картографування	Створення тематичних карт і аналіз кліматичних показників
QGIS	Робота з геопросторовими даними	Підготовка просторових шарів та візуалізація результатів
Google Earth Engine	Обробка супутникових даних	Отримання та попередня обробка даних дистанційного зондування

Джерело: складено автором на основі [21, 41, 50, 56]

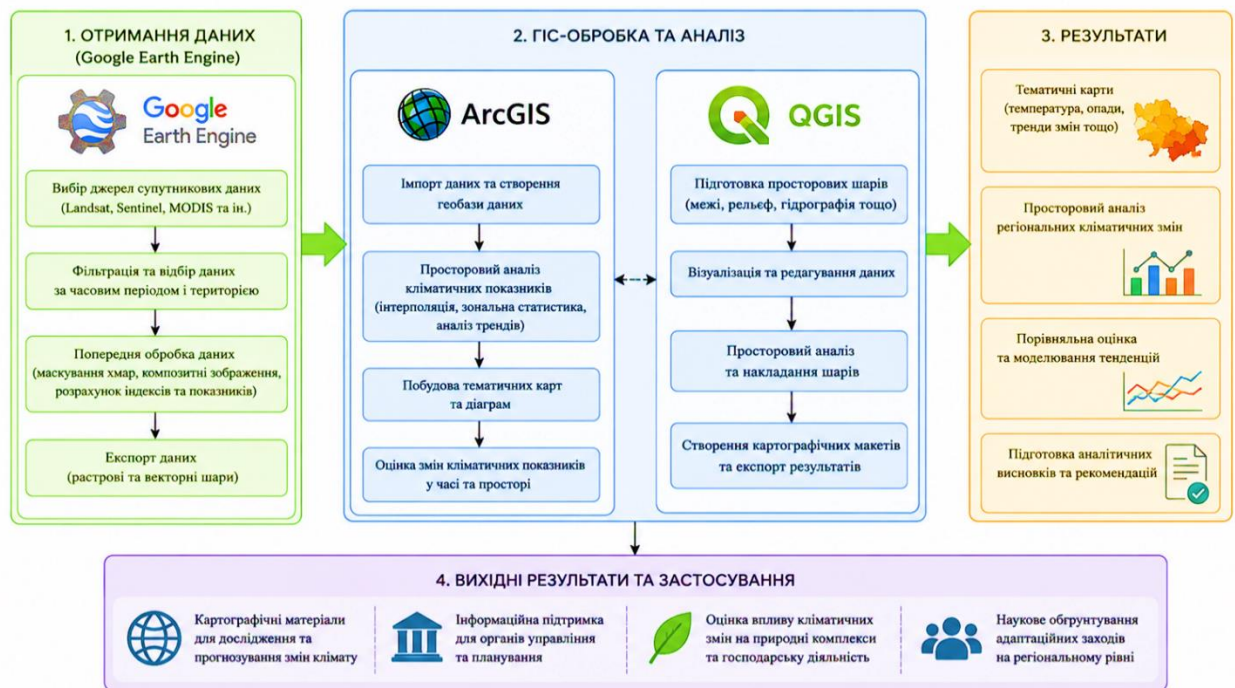


Рис. 2.10. Схема використання ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine у процесі ГІС-моделювання кліматичних змін

Джерело: складено автором

Як показано на рис. 2.10, процес ГІС-моделювання кліматичних змін передбачає послідовне використання різних програмних засобів. На початковому етапі здійснюється отримання та попередня обробка супутникових даних у середовищі Google Earth Engine. Надалі підготовлені дані інтегруються у геоінформаційні системи ArcGIS і QGIS, де виконуються просторовий аналіз, створення тематичних шарів та картографічна візуалізація результатів дослідження.

Отже, використання програмних засобів ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine забезпечило можливість комплексної роботи з кліматичними та просторовими даними, проведення їх аналізу та візуалізації. Поєднання функціональних можливостей зазначених платформ створює ефективне середовище для дослідження регіональних кліматичних змін та їх просторових проявів на території України.

2.4. Побудова баз даних і створення тематичних шарів кліматичних показників

Одним із важливих етапів ГІС-моделювання регіональних кліматичних змін є формування бази геоданих та створення тематичних шарів, які забезпечують можливість просторового аналізу кліматичних показників. База геоданих являє собою впорядковану систему взаємопов'язаних просторових і атрибутивних даних, що використовуються для зберігання, обробки та подальшого аналізу інформації в геоінформаційному середовищі [21, 22, 27].

У межах дослідження було сформовано єдину базу геоданих, до складу якої увійшли кліматичні, картографічні та допоміжні просторові дані. Основними джерелами інформації стали кліматичні набори даних WorldClim, Climate Data Store (Copernicus), супутникові матеріали NASA та NOAA, а також цифрові картографічні матеріали території України [43, 44, 52, 54, 65].

На першому етапі здійснювалася підготовка вихідних даних. Растрові кліматичні показники температури повітря та атмосферних опадів були приведені до єдиної системи координат та узгоджені за просторовою роздільною здатністю. Векторні дані адміністративно-територіального устрою України були використані як основа для просторової прив'язки кліматичної інформації [21, 29].

Після формування бази геоданих було створено тематичні шари, що відображають окремі кліматичні характеристики території України. До основних тематичних шарів належали:

- середньорічна температура повітря;
- середня температура найтеплішого місяця;
- середня температура найхолоднішого місяця;
- річна кількість атмосферних опадів;
- просторовий розподіл температурних аномалій;
- територіальні відмінності зволоження;
- регіональні особливості сучасних кліматичних змін.

Тематичні шари створювалися шляхом поєднання кліматичних показників із просторовими даними в середовищі ArcGIS та QGIS. Для відображення просторових закономірностей використовувалися методи класифікації даних, просторового узагальнення та картографічної візуалізації [21, 22, 41, 56].

Особлива увага приділялася створенню карт температурного режиму та атмосферних опадів, оскільки саме ці показники найбільш повно характеризують сучасні кліматичні зміни. Побудовані тематичні шари дали змогу виявити регіональні відмінності кліматичних умов та визначити території з найбільш вираженими проявами кліматичних трансформацій [17, 32, 33, 34].

Для забезпечення коректності подальшого аналізу всі тематичні шари були структуровані у межах єдиної геоінформаційної бази даних. Це забезпечило можливість виконання просторових запитів, порівняння кліматичних показників між окремими регіонами та проведення комплексного ГІС-аналізу.

Таблиця 2.3

Основні тематичні шари, створені в процесі дослідження

Тематичний шар	Тип даних	Призначення
Середньорічна температура повітря	Растровий	Аналіз температурного режиму
Атмосферні опади	Растровий	Оцінка просторового розподілу опадів
Температурні аномалії	Растровий	Виявлення регіональних відмінностей
Адміністративні межі України	Векторний	Просторова прив'язка даних
Гідрографічна мережа	Векторний	Аналіз природних чинників
Рельєф території	Растровий	Оцінка впливу висоти місцевості

Джерело: складено автором на основі [21, 22, 43, 44, 65]

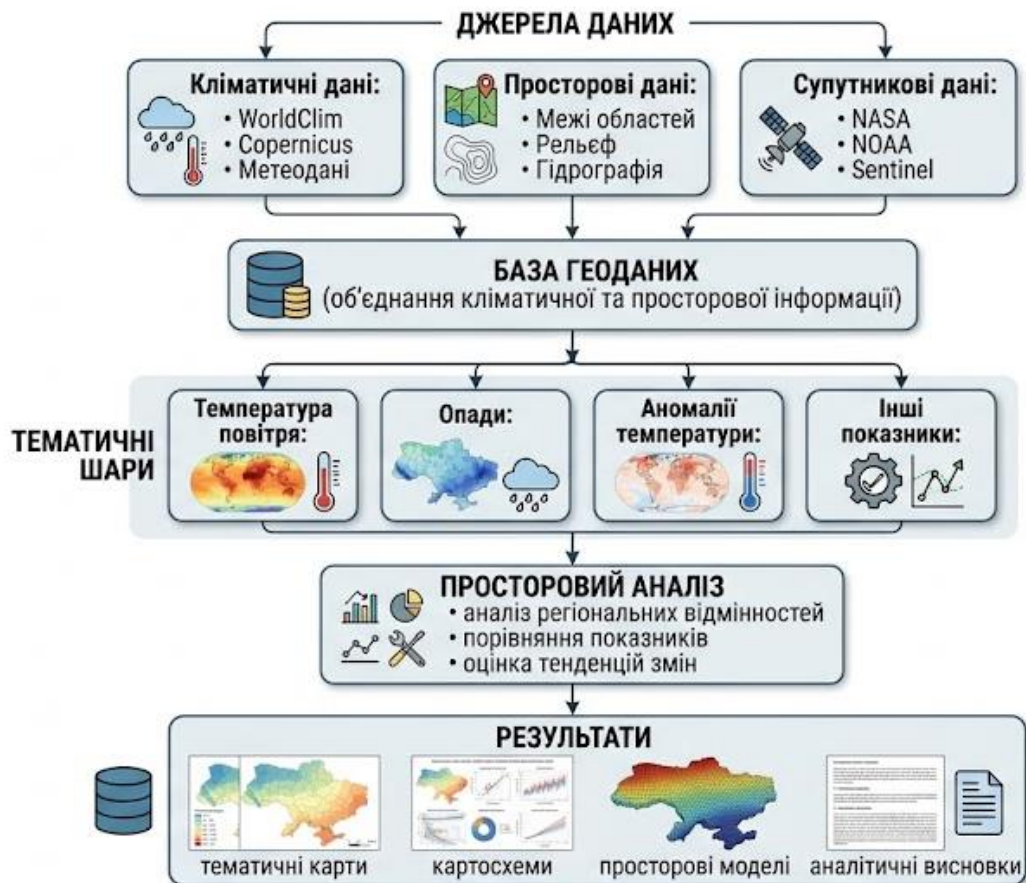


Рис. 2.7. Структура бази геоданих для моделювання регіональних кліматичних змін

Джерело: складено автором

Як показано на рис. 2.7, база геоданих формується шляхом інтеграції кліматичних, просторових та супутникових даних у єдиному геоінформаційному середовищі. На основі сформованої бази створюються тематичні шари кліматичних показників, які використовуються для проведення просторового аналізу та побудови картографічних моделей регіональних кліматичних змін. Результатом такої роботи є створення тематичних карт, картосхем та аналітичних матеріалів, необхідних для оцінки сучасних кліматичних тенденцій на території України.

2.5. Просторова візуалізація та інтерпретація кліматичних тенденцій

Одним із ключових етапів ГІС-моделювання кліматичних змін є просторова візуалізація результатів дослідження. Використання геоінформаційних систем дає можливість відобразити просторовий розподіл кліматичних показників у вигляді тематичних карт, картограм, картосхем та інших картографічних матеріалів. Візуалізація сприяє виявленню територіальних відмінностей кліматичних умов, аналізу просторових закономірностей та оцінці сучасних тенденцій зміни клімату [21, 22, 27].

У процесі дослідження просторова візуалізація здійснювалася на основі кліматичних та геопросторових даних, інтегрованих у середовище геоінформаційних систем. Для відображення кліматичних характеристик використовувалися тематичні шари температури повітря, атмосферних опадів, температурних аномалій та інших показників, що характеризують сучасний стан кліматичної системи [21, 29, 43].

Важливим інструментом візуалізації є тематичне картографування, яке дозволяє відображати територіальні особливості поширення кліматичних явищ та процесів. Тематичні карти дають змогу не лише представити результати аналізу в наочній формі, а й виявити регіони з подібними кліматичними характеристиками, простежити зміни показників у просторі та визначити території з найбільш вираженими проявами кліматичних змін [21, 22].

Для інтерпретації кліматичних тенденцій використовувалися результати просторового аналізу та картографічного моделювання. Порівняння тематичних шарів дозволило оцінити особливості розподілу температури повітря та атмосферних опадів у межах різних регіонів України. Особлива увага приділялася виявленню територій із підвищеними темпами потепління, змінами режиму зволоження та проявами кліматичних аномалій [17, 23, 32, 34].

Застосування ГІС-технологій забезпечує можливість поєднання картографічної інформації з аналітичними матеріалами та статистичними даними. Це дозволяє не лише відображати сучасний стан кліматичних показників, але й аналізувати їх зміни у часовому аспекті. Просторово-часовий

підхід є особливо важливим для дослідження регіональних кліматичних змін та оцінювання їхнього впливу на природні й соціально-економічні системи [20, 32, 35].

У результаті просторової візуалізації формується комплекс картографічних матеріалів, які можуть використовуватися для наукових досліджень, екологічного моніторингу, територіального планування та розроблення адаптаційних заходів до змін клімату. Візуалізація результатів також сприяє підвищенню доступності інформації та покращує сприйняття складних кліматичних процесів [23, 26, 55].



Рис. 2.8. Основні етапи просторової візуалізації кліматичних тенденцій

Джерело: складено автором

Як показано на рис. 2.8, процес просторової візуалізації включає підготовку кліматичних даних, створення тематичних шарів, виконання просторового аналізу, картографічне відображення результатів та їх подальшу інтерпретацію. Такий підхід забезпечує можливість комплексного дослідження кліматичних змін та виявлення їх територіальних особливостей.

Отже, просторова візуалізація є важливою складовою ГІС-моделювання кліматичних змін. Вона забезпечує наочне представлення результатів аналізу, сприяє виявленню просторових закономірностей та дозволяє більш обґрунтовано оцінювати сучасні кліматичні тенденції на території України.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі досліджено інформаційно-аналітичні основи та методичні підходи до ГІС-моделювання регіональних кліматичних змін на території України. Встановлено, що територія держави характеризується значною просторовою неоднорідністю кліматичних умов, що обумовлено особливостями географічного положення, рельєфу, атмосферної циркуляції та впливом водних об'єктів. Аналіз кліматичних характеристик засвідчив наявність виражених регіональних відмінностей температурного режиму та зволоження, що створює передумови для застосування геоінформаційних технологій у дослідженні кліматичних процесів.

Сформовано інформаційну базу дослідження, до складу якої увійшли кліматичні, супутникові та геопросторові дані. Основними джерелами інформації стали міжнародні кліматичні платформи WorldClim, Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service), NASA Earth Observatory, NOAA, а також матеріали дистанційного зондування Землі, отримані із супутникових систем Sentinel-2, Landsat та MODIS. Використання різнорідних джерел даних забезпечило достатній рівень повноти, достовірності та просторової деталізації інформації для проведення подальшого аналізу.

Установлено, що ефективність ГІС-моделювання значною мірою залежить від якості попередньої підготовки даних. У процесі дослідження виконано перевірку, систематизацію та уніфікацію інформації, приведення її до єдиної системи координат, геоприв'язку та формування інтегрованої бази геоданих. Це забезпечило коректне поєднання кліматичних і просторових показників та створило основу для подальшого моделювання.

Проаналізовано функціональні можливості сучасних геоінформаційних платформ ArcGIS, QGIS та Google Earth Engine. Встановлено, що використання зазначених програмних засобів дозволяє ефективно здійснювати збір, обробку, аналіз і візуалізацію кліматичних даних. Особливо важливим є застосування Google Earth Engine для роботи з великими архівами супутникової інформації та

сервісів Copernicus Browser і Sentinel Hub EO Browser для отримання та аналізу даних дистанційного зондування Землі.

У ході роботи сформовано структуру бази геоданих та створено тематичні шари, що відображають основні кліматичні показники, природні умови та територіальні особливості України. Побудовані тематичні шари забезпечили можливість проведення просторового аналізу, виявлення регіональних відмінностей та подальшого картографування кліматичних процесів.

Важливим результатом дослідження стало опрацювання підходів до просторової візуалізації кліматичних показників. Використання тематичних карт, супутникових знімків та геоінформаційних моделей дозволило наочно відобразити територіальну диференціацію кліматичних характеристик і створити інформаційну основу для аналізу сучасних кліматичних змін.

Отже, у другому розділі сформовано комплексне інформаційно-аналітичне забезпечення дослідження, яке стало основою для виконання просторового аналізу, виявлення кліматичних тенденцій, оцінювання регіональних ризиків та побудови прогнозних моделей кліматичних змін, що розглядаються у третьому розділі роботи.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ЗАСОБАМИ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

3.1. Просторово-часові тенденції температурних і гідрокліматичних змін у регіоні

Кліматичні зміни належать до найважливіших глобальних екологічних проблем сучасності та суттєво впливають на функціонування природних і соціально-економічних систем. Протягом останніх десятиліть на території України спостерігаються помітні зміни основних кліматичних показників, які проявляються у підвищенні температури повітря, трансформації режиму атмосферних опадів, збільшенні частоти екстремальних погодних явищ та зміні умов зволоження.

Просторово-часовий аналіз цих процесів дозволяє виявити особливості їх прояву в різних регіонах країни та оцінити можливі наслідки для природного середовища і господарської діяльності населення [17, 23, 26, 32, 34, 51, 64].

Одним із найбільш очевидних проявів сучасних кліматичних змін є підвищення температури повітря.

Аналіз динаміки середньорічної температури в Україні за період 1975–2025 рр. свідчить про стійку тенденцію до потепління (рис. 3.1).

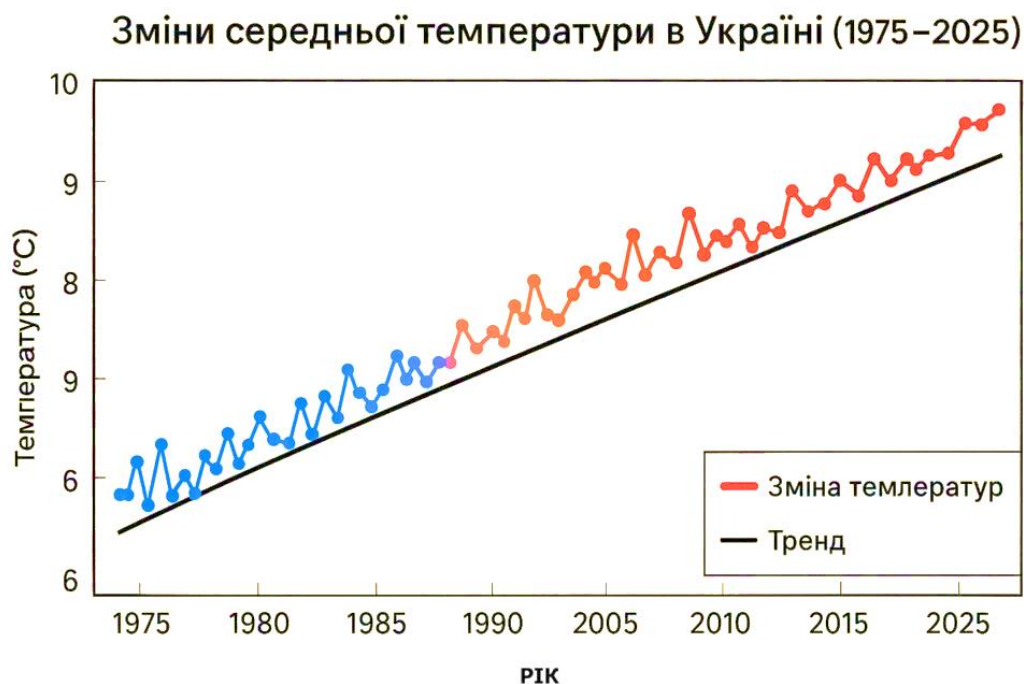
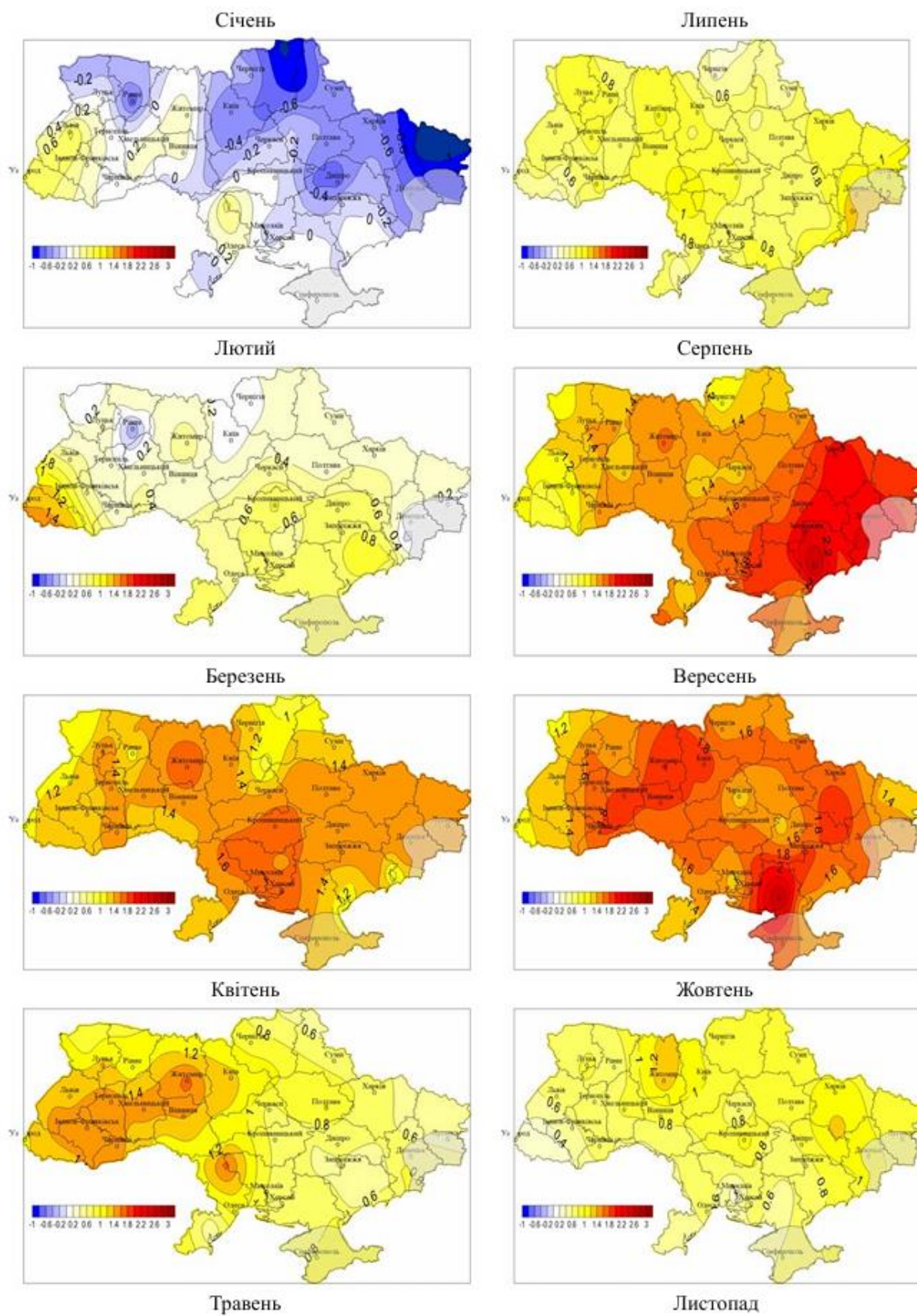


Рис. 3.1. Динаміка середньорічної температури повітря в Україні у 1975-2025 рр.

Джерело: складено автором на основі [32, 34, 51, 64]

Як видно з рис. 3.1, протягом останніх п'яти десятиліть середньорічна температура повітря в Україні поступово зростала. Якщо у другій половині 1970-х років середні температурні показники становили близько 6-6,5 °С, то у 2020-х роках вони наближаються до 9,5-10 °С. Лінія тренду підтверджує стійку тенденцію до потепління, яка особливо посилилася після 1990-х років. Отримані результати узгоджуються із сучасними дослідженнями кліматичних змін в Україні та світі [17, 32, 34].

Для більш детального аналізу було досліджено просторові особливості зміни середньомісячної температури повітря на території України (рис. 3.2).



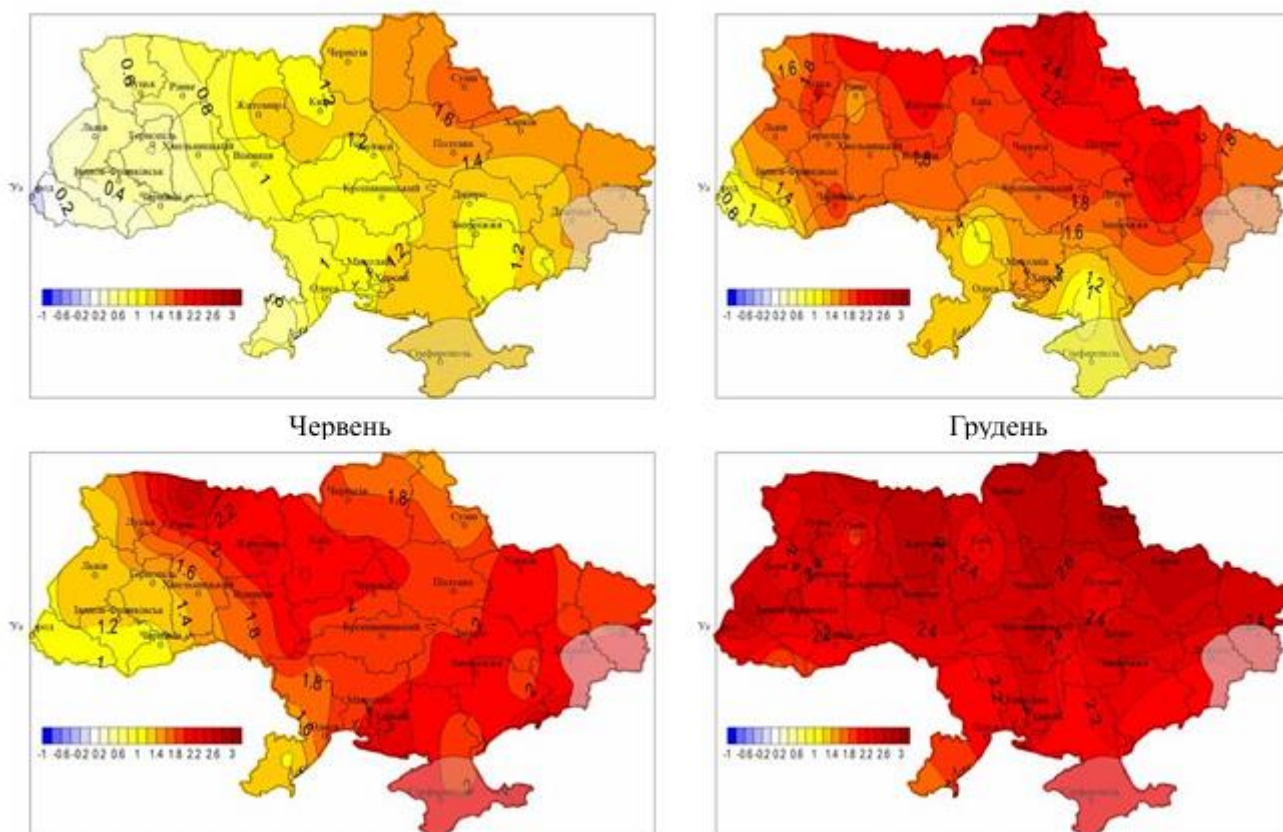


Рис. 3.2. Просторовий розподіл змін середньомісячної температури повітря на території України

Джерело: складено автором на основі [20, 32, 34]

Аналіз картографічних матеріалів свідчить про суттєву регіональну диференціацію температурних змін. Найменші зміни температури характерні для окремих західних та північно-західних областей України, де вплив атлантичних повітряних мас частково стримує темпи потепління. Натомість найбільш інтенсивне підвищення температури спостерігається у східних, південно-східних та південних регіонах держави.

Особливо помітними є зміни температурного режиму у літній період. Найвищі значення температурних аномалій простежуються у липні та серпні, коли в окремих регіонах приріст температури перевищує 2 °С. Значне потепління також спостерігається у зимові місяці, насамперед у грудні, що свідчить про помітну трансформацію сезонного ходу температури повітря.

Поряд зі змінами температурного режиму на території України відбуваються зміни гідрокліматичних умов. В окремих регіонах спостерігається збільшення нерівномірності випадання атмосферних опадів, зростає частота тривалих бездощових періодів та інтенсивних зливових опадів. Найбільш вразливими до проявів посушливості залишаються південні та південно-східні області України, де підвищення температури супроводжується зростанням випаровуваності та дефіцитом вологи [17, 26, 33].

Отримані результати свідчать про суттєву трансформацію кліматичних умов на території України. Основними проявами сучасних кліматичних змін є підвищення температури повітря, посилення територіальних контрастів температурного режиму та зміна умов зволоження. Виявлені просторово-часові закономірності є важливою основою для подальшого ГІС-моделювання та прогнозування регіональних кліматичних змін.

3.2. Виявлення кліматичних аномалій і зон ризику за результатами ГІС-моделювання

Одним із найважливіших напрямів сучасних кліматичних досліджень є виявлення просторових особливостей прояву кліматичних аномалій та визначення територій, найбільш уразливих до негативних наслідків зміни клімату. Застосування геоінформаційних технологій дозволяє не лише аналізувати багаторічні ряди кліматичних спостережень, але й виявляти закономірності просторового поширення температурних і гідрокліматичних змін, оцінювати рівень ризику для окремих регіонів та прогнозувати можливі наслідки подальших кліматичних трансформацій [17, 20, 21, 32, 34].

У сучасних умовах кліматичними аномаліями вважаються суттєві відхилення кліматичних показників від багаторічних середніх значень. Найчастіше вони проявляються у вигляді тривалих хвиль тепла, аномально високих або низьких температур, дефіциту чи надлишку атмосферних опадів, посух, паводків та інших екстремальних гідрометеорологічних явищ. Частота

виникнення таких явищ в Україні протягом останніх десятиліть помітно зросла, що підтверджується як результатами метеорологічних спостережень, так і висновками міжнародних кліматичних організацій [17, 51, 64].

Проведений аналіз динаміки середньорічної температури повітря у різних регіонах України показав наявність стійкої тенденції до потепління на всій території держави. Разом з тим темпи підвищення температури є неоднаковими, що свідчить про просторову диференціацію кліматичних змін.

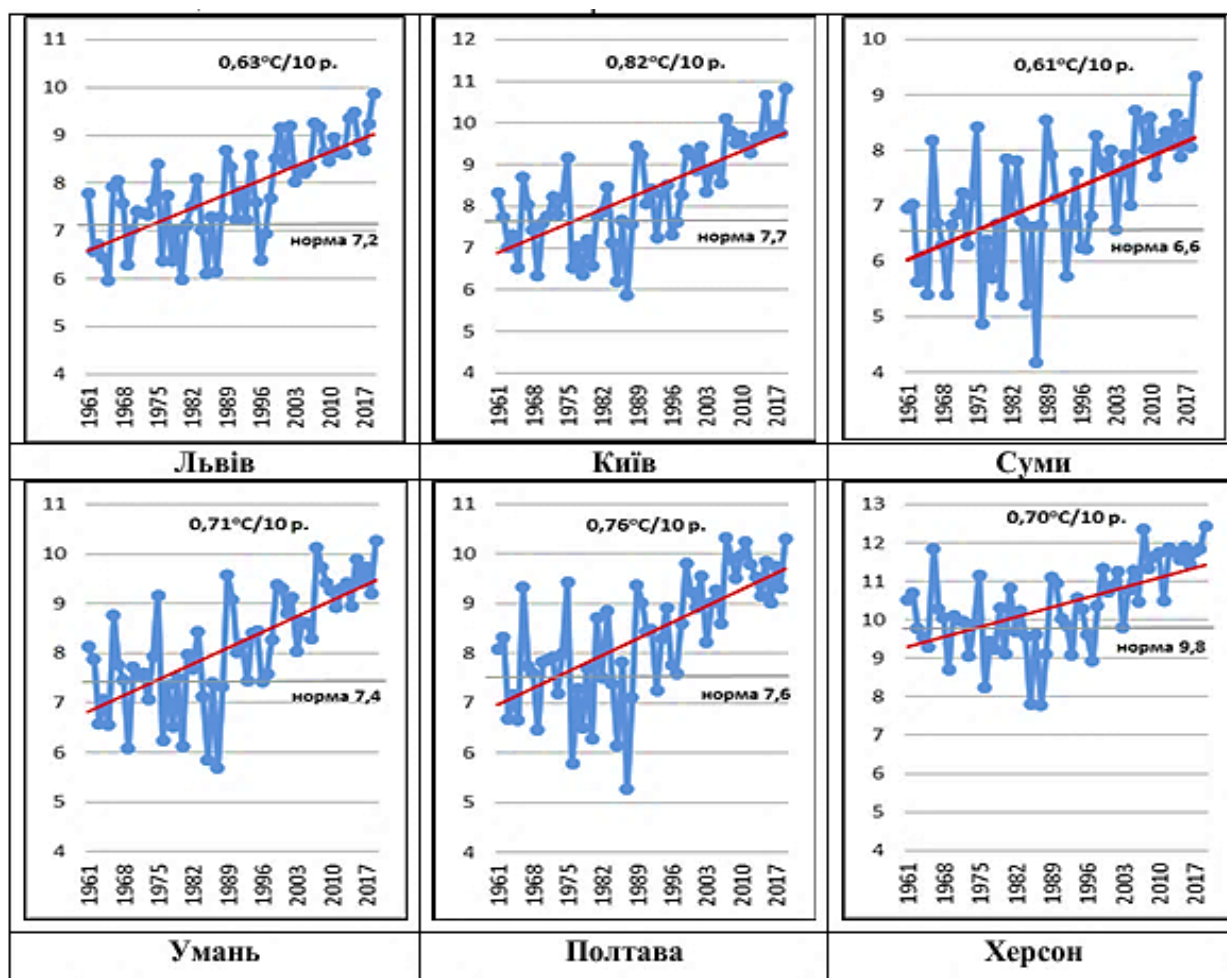


Рис. 3.3. Динаміка середньорічної температури повітря за 1961–2019 рр. у регіонах України

Джерело: складено за матеріалами [20, 34]

Як видно з рис. 3.3, найбільш інтенсивне підвищення температури повітря спостерігається у центральних та східних регіонах України. Зокрема, у Києві темпи потепління становлять близько $0,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 років, у Полтаві – $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 років, в Умані – $0,71\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 років. Для Львова та Сум також характерна позитивна тенденція, однак темпи підвищення температури дещо нижчі. Отримані результати свідчать про загальнодержавний характер процесів потепління, проте інтенсивність цих змін залежить від фізико-географічних особливостей окремих регіонів.

Одним із наслідків підвищення температури є зростання частоти виникнення температурних аномалій. Особливо це стосується літнього періоду, коли спостерігається збільшення кількості днів із максимальною температурою понад $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найбільш вразливими до таких змін є степові та лісостепові регіони України, де високі температури поєднуються з недостатнім зволоженням та значною випаровуваністю. Для оцінки можливих майбутніх змін було проаналізовано прогностні сценарії зміни температурного режиму та атмосферних опадів на території України.

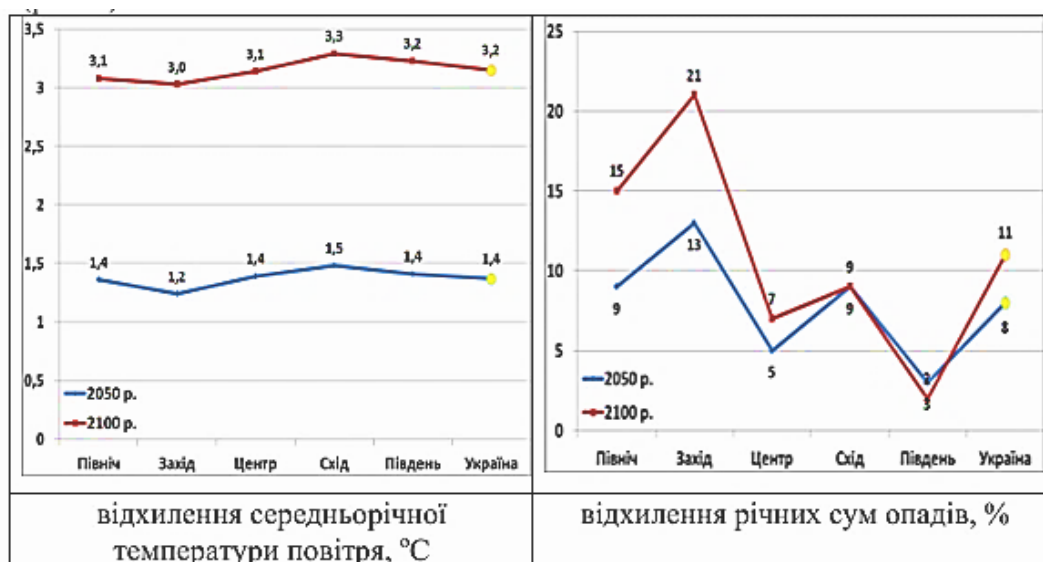


Рис. 3.4. Регіональний прогност змін температури повітря та атмосферних опадів на території України до 2050 та 2100 років

Джерело: складено за матеріалами Українського гідрометеорологічного інституту [17]

Прогнозні розрахунки свідчать про подальше підвищення середньорічної температури повітря в усіх регіонах України. До 2050 року очікується зростання температури приблизно на 1,2-1,5 °С відносно кліматичної норми 1991-2010 рр., тоді як до кінця ХХІ століття це підвищення може перевищити 3 °С. Найбільш інтенсивне потепління прогнозується для східних та південних областей, які вже сьогодні характеризуються підвищеним рівнем кліматичного ризику.

Водночас зміни торкнуться і режиму атмосферних опадів. Загальна річна кількість опадів може залишатися відносно стабільною або навіть дещо збільшуватися у західних регіонах, проте їх сезонний розподіл ставатиме дедалі нерівномірнішим. Зростатиме частота інтенсивних зливових опадів, тоді як тривалість бездошових періодів у літній сезон збільшуватиметься.

Одним із важливих показників оцінки кліматичних ризиків є кліматичний водний баланс, який характеризує співвідношення між надходженням вологи та її витратами через випаровування.

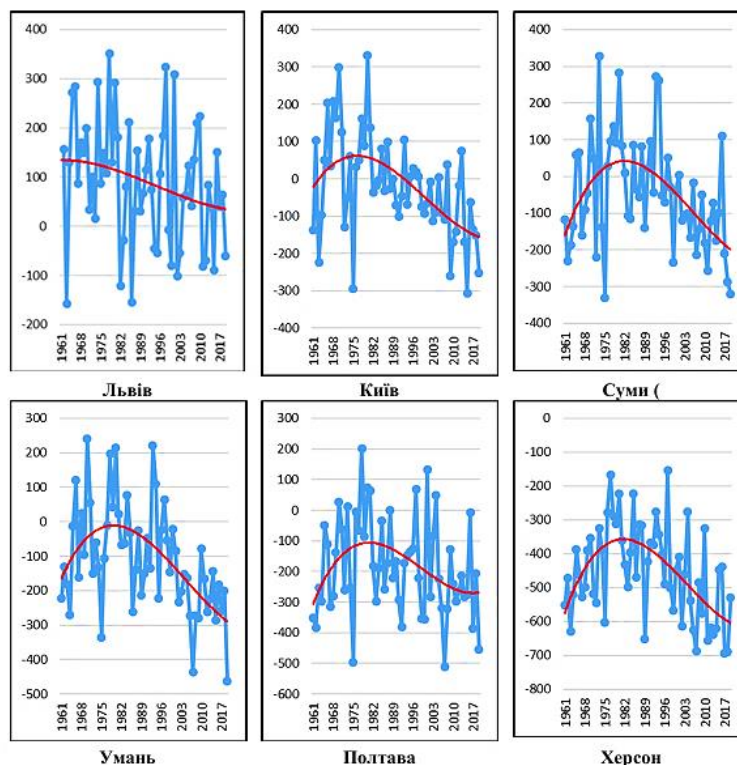


Рис. 3.5. Динаміка річного кліматичного водного балансу за 1961–2019 рр. у регіонах України

Джерело: складено за матеріалами [17, 20]

Результати аналізу показують, що у більшості регіонів України спостерігається тенденція до зменшення кліматичного водного балансу. Найбільш суттєві зміни характерні для південних областей, де поєднання високих температур та недостатньої кількості опадів призводить до формування дефіциту вологи. Подібні процеси є характерною ознакою аридизації клімату та можуть негативно впливати на продуктивність агроландшафтів, стан природних екосистем і водних ресурсів.

Важливим підтвердженням зазначених тенденцій є результати аналізу просторового розподілу природного вологозабезпечення території України.

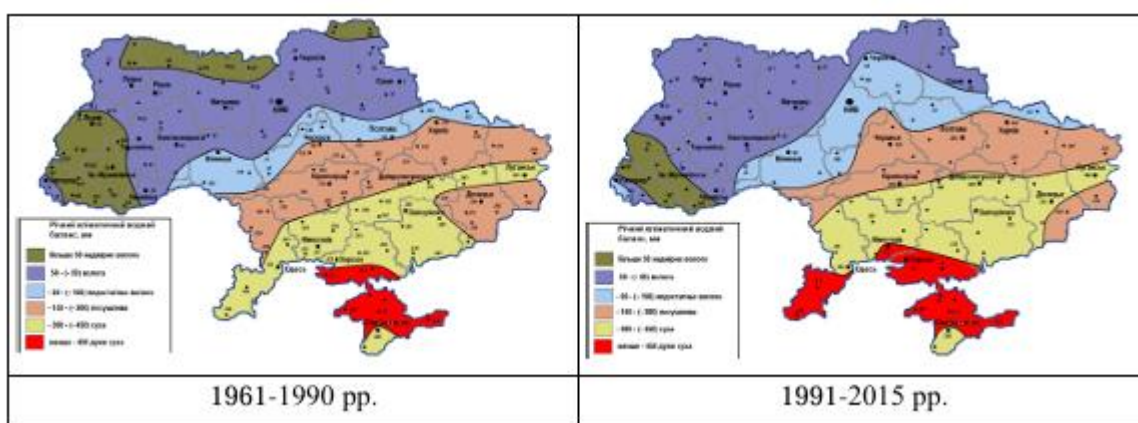


Рис. 3.6. Оцінка та зонування умов природного вологозабезпечення території України у 1961-1990 та 1991-2015 рр.

Джерело: складено за матеріалами [17, 20]

Порівняння карт свідчить про поступове розширення територій із недостатнім рівнем природного зволоження. Особливо помітними такі зміни є у степовій зоні України, де площі посушливих територій збільшуються в напрямку на північ. У центральних областях також спостерігається погіршення умов вологозабезпечення, тоді як західні регіони та Українські Карпати залишаються найбільш забезпеченими вологою територіями держави.

На основі проведеного аналізу та результатів ГІС-моделювання можна виділити кілька зон кліматичного ризику. До зони високого ризику належать південні та південно-східні області України, де поєднуються високі темпи

потепління, дефіцит атмосферної вологи, зростання випаровуваності та висока ймовірність виникнення посух. До зони підвищеного ризику належать центральні області, для яких характерне інтенсивне підвищення температури повітря та поступове погіршення умов природного зволоження. Західні області та Карпатський регіон наразі залишаються відносно стійкими до негативних проявів сучасних кліматичних змін, хоча й тут спостерігаються ознаки потепління та зростання повторюваності екстремальних погодних явищ.

Отже, результати ГІС-моделювання підтверджують наявність суттєвої просторової неоднорідності кліматичних змін на території України. Найбільш уразливими до негативних наслідків сучасного потепління є степові та лісостепові регіони, де посилюються процеси аридизації, зростає дефіцит водних ресурсів та підвищується ризик виникнення екстремальних природних явищ. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення системи кліматичного моніторингу, розроблення адаптаційних заходів та планування регіонального розвитку в умовах зміни клімату.

3.3. Регіональні сценарії кліматичних змін та їх прогнозування до 2050 року

Прогнозування майбутніх кліматичних змін є одним із ключових напрямів сучасних кліматичних досліджень, оскільки дозволяє оцінити можливі трансформації природного середовища та підготувати науково обґрунтовані адаптаційні заходи. На основі результатів кліматичного моделювання, даних багаторічних метеорологічних спостережень та геоінформаційного аналізу встановлено, що на території України у першій половині XXI століття збережеться тенденція до підвищення температури повітря, зміни режиму атмосферних опадів і погіршення умов природного вологозабезпечення [17, 23, 26, 51, 64].

Сучасні кліматичні сценарії свідчать про те, що до 2050 року середньорічна температура повітря на території України зростатиме в усіх природно-кліматичних зонах. Очікується, що середнє підвищення температури становитиме близько 1,2-1,5 °C відносно кліматичної норми 1991-2010 рр. При

цьому найбільш інтенсивні зміни прогнозуються у східних, центральних та південних регіонах держави, де вже сьогодні спостерігаються найвищі темпи потепління [17, 34].

Поряд із температурними змінами прогнозуються суттєві трансформації режиму атмосферних опадів та умов вологозабезпечення. Особливістю майбутніх змін стане не стільки зменшення загальної річної кількості опадів, скільки зміна їх сезонного розподілу та зростання нерівномірності випадання. У літній період збільшуватиметься тривалість посушливих інтервалів, тоді як окремі опади матимуть більш інтенсивний характер. Такі процеси сприятимуть підвищенню ризику виникнення посух, деградації ґрунтів та зниженню ефективності природного зволоження території [17, 26].

Таблиця 3.2

Відносні площі зон України з різним рівнем вологозабезпечення у сучасних та прогнозних кліматичних умовах

Зони зволоження	1990 р.			2015 р.			Прогноз на 2050 р.			Прогноз на 2100 р.		
	% до загальної території	рілля		% до загальної території	рілля		% до загальної території	рілля		% до загальної території	рілля	
		млн.га	%		млн.га	%		млн.га	%		млн.га	%
Надмірно волога	12	2,3	7	4	0,7	2	4	0,7	2	2	0,2	1
Волога	32	8,1	26	30	7,0	22	22	4,8	15	10	1,6	5
Недостатньо волога	10	3,4	11	16	4,8	16	18	5,0	16	17	4,3	14
Посушлива	23	8,5	27	20	7,1	23	18	6,1	20	16	4,4	14
Суха	19	7,4	24	22	8,7	28	20	7,3	24	17	5,8	19
Дуже суха	4	1,5	5	8	2,9	9	18	7,2	23	38	14,7	47
Потреба в додатковому зволоженні	46	17,3	56	50	18,7	60	56	20,6	67	71	24,9	80

Джерело: складено за матеріалами [17]

Для оцінки майбутніх змін умов природного вологозабезпечення було проаналізовано прогнозні дані щодо трансформації площ зон з різним рівнем зволоження на території України.

Аналіз прогнозних показників свідчить про поступове скорочення площ територій із достатнім та надмірним рівнем природного зволоження. Якщо у 2015 році зони достатнього зволоження охоплювали близько 30 % території України, то до 2050 року їх площа може зменшитися приблизно до 22 %. Водночас площа посушливих, сухих та дуже сухих територій продовжить збільшуватися.

Особливо показовим є прогнозоване зростання площ дуже сухих територій. До середини XXI століття вони можуть охоплювати майже чверть площі держави, що свідчить про подальше посилення процесів аридизації клімату. Одночасно зростатиме частка орних земель, які потребуватимуть додаткового зволоження для забезпечення стабільного ведення сільського господарства.

Просторовий розподіл прогнозованих змін умов вологозабезпечення представлено на рис. 3.9.

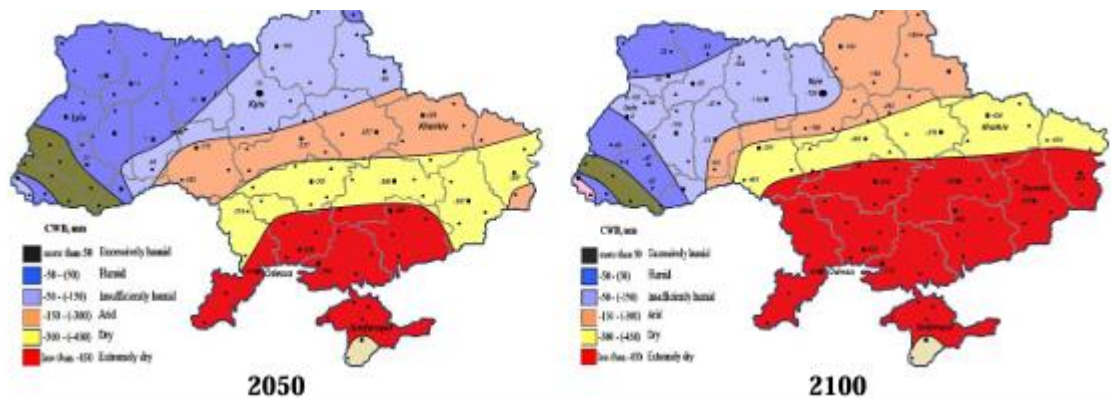


Рис. 3.9. Середньостроковий та довгостроковий прогноз умов вологозабезпечення території України за річним кліматичним водним балансом

Джерело: складено за матеріалами [17]

Як видно з рис. 3.9, вже до 2050 року найбільш несприятливі зміни очікуються у степовій зоні України. Значна частина південних областей характеризуватиметься дуже низькими показниками кліматичного водного балансу, що свідчить про дефіцит природного зволоження.

Найвищий рівень ризику прогнозується для Херсонської, Запорізької, Миколаївської та Одеської областей, де процеси аридизації можуть набути особливо вираженого характеру.

Важливим чинником формування регіональної кліматичної вразливості є забезпеченість території водними ресурсами.

В умовах підвищення температури повітря та зростання випаровуваності значення цього показника постійно зростає.

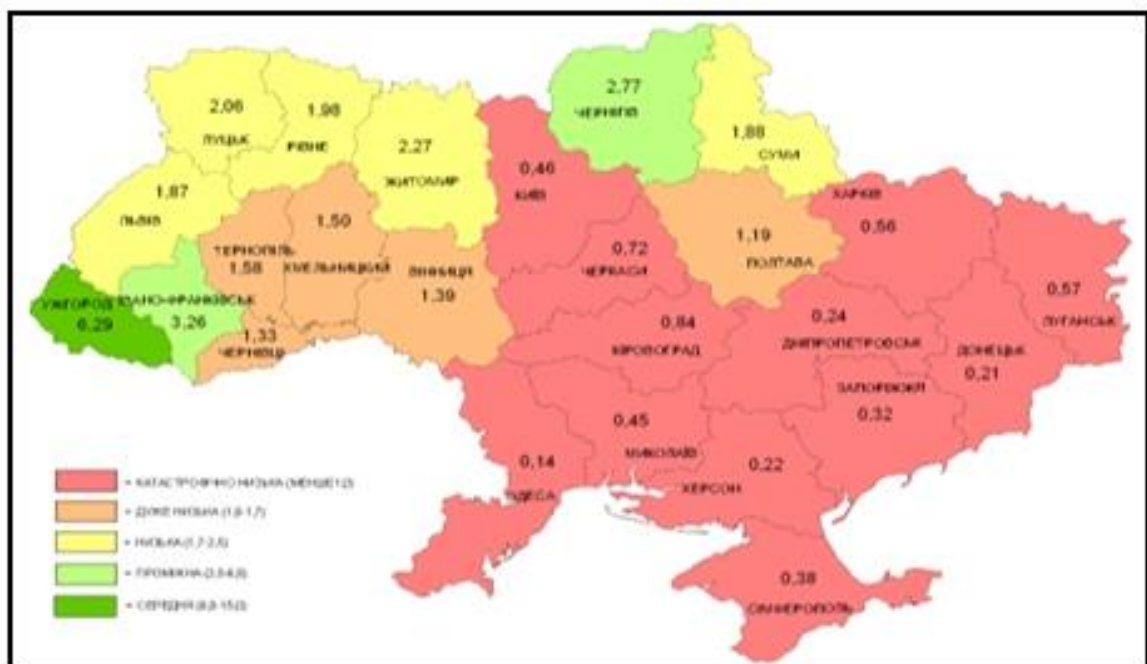


Рис. 3.10. Забезпеченість регіонів України місцевими водними ресурсами, тис. м³/рік на одну особу

Джерело: складено за матеріалами [17; 63]

Результати аналізу свідчать про значну територіальну нерівномірність водозабезпечення. Найвищі показники характерні для західних областей України, насамперед Закарпатської, Івано-Франківської, Чернівецької та

Волинської. Значні запаси місцевих водних ресурсів формуються також у Карпатському регіоні, де кліматичні умови залишаються відносно сприятливими.

Натомість найнижчий рівень водозабезпеченості спостерігається у південних та східних областях. У Херсонській, Запорізькій, Донецькій, Луганській і Миколаївській областях обсяги місцевих водних ресурсів є недостатніми для компенсації зростаючого водоспоживання. За умов подальшого потепління та скорочення природного зволоження ці регіони можуть зіткнутися з поглибленням водогосподарських проблем.

На основі проведеного аналізу можна виділити **три основні сценарії регіональних кліматичних змін до 2050 року**.

Перший сценарій характерний для південних областей України та передбачає значне посилення посушливості, зростання дефіциту водних ресурсів та підвищення частоти посух.

Другий сценарій охоплює центральні та східні регіони, де поряд із підвищенням температури повітря прогнозується збільшення повторюваності екстремальних погодних явищ.

Третій сценарій притаманний західним областям та Карпатському регіону, де, незважаючи на загальне потепління, зберігатимуться відносно сприятливі умови природного зволоження та водозабезпечення.

Отже, результати прогнозування свідчать про подальше посилення кліматичних змін на території України до 2050 року. Найбільш уразливими залишатимуться південні та східні регіони держави, для яких характерне поєднання високих темпів потепління, погіршення умов вологозабезпечення та обмеженості водних ресурсів. Використання геоінформаційних технологій дозволяє своєчасно виявляти такі тенденції та формувати наукову основу для розроблення регіональних заходів адаптації до зміни клімату.

3.4. Використання результатів ГІС-аналізу у системі сталого природокористування

В умовах сучасних кліматичних змін особливого значення набуває впровадження принципів сталого природокористування, які передбачають раціональне використання природних ресурсів, збереження екологічної рівноваги та забезпечення потреб суспільства без погіршення можливостей майбутніх поколінь. Одним із найефективніших інструментів підтримки прийняття управлінських рішень у цій сфері є геоінформаційні системи, які дозволяють здійснювати комплексний аналіз природних процесів та оцінювати наслідки зміни клімату на різних територіальних рівнях [21, 22, 29, 55].

Результати ГІС-аналізу кліматичних змін можуть бути використані для виявлення територій підвищеного екологічного ризику, прогнозування можливих змін природних умов та розроблення адаптаційних заходів. Завдяки поєднанню просторових, кліматичних та соціально-економічних даних ГІС забезпечують можливість комплексного оцінювання стану природного середовища та ефективного управління природними ресурсами.

Одним із найважливіших напрямів використання результатів ГІС-моделювання є управління водними ресурсами. Проведений аналіз показав, що значна частина південних і східних регіонів України характеризується низьким рівнем природного вологозабезпечення та обмеженими запасами місцевих водних ресурсів. У таких умовах ГІС-технології дозволяють здійснювати моніторинг водних ресурсів, оцінювати рівень водного дефіциту та визначати території, які потребують першочергового впровадження водоощадних технологій [17, 23, 63].

Не менш важливим є застосування результатів ГІС-аналізу у сфері сільського господарства. Підвищення температури повітря, зміни режиму атмосферних опадів та посилення процесів аридизації можуть суттєво впливати на продуктивність агроландшафтів. Використання геоінформаційних технологій дозволяє оцінювати агрокліматичний потенціал територій, прогнозувати ризики

виникнення посух та оптимізувати розміщення сільськогосподарських культур відповідно до сучасних кліматичних умов [17, 26, 33, 48].

Важливе значення результати ГІС-моделювання мають і для системи екологічного моніторингу. Просторовий аналіз кліматичних показників дозволяє своєчасно виявляти території з підвищеним ризиком деградації земель, виснаження водних ресурсів, поширення ерозійних процесів та інших негативних природних явищ. Це створює основу для розроблення ефективних природоохоронних заходів та підвищення екологічної безпеки регіонів [23, 35, 47].

Одним із перспективних напрямів є використання ГІС-технологій у сфері територіального планування. Просторові моделі кліматичних змін дозволяють враховувати можливі ризики під час розроблення стратегій регіонального розвитку, схем планування територій та програм адаптації до зміни клімату. Особливо актуальним це є для регіонів, які характеризуються високою вразливістю до посух, дефіциту водних ресурсів або екстремальних погодних явищ [23, 31, 46].

Результати ГІС-аналізу можуть бути використані також для вдосконалення системи управління природно-заповідним фондом та збереження біорізноманіття. Зміна кліматичних умов може призводити до трансформації природних екосистем, зміни ареалів поширення окремих видів рослин і тварин та зростання антропогенного навантаження на природні комплекси. Геоінформаційні технології дають можливість здійснювати просторовий моніторинг таких процесів та прогнозувати можливі зміни стану природних екосистем [47, 59, 60].

На основі результатів проведеного дослідження можна визначити основні напрями використання ГІС-технологій у системі сталого природокористування:

- моніторинг кліматичних змін та природних ресурсів;
- оцінювання ризиків посух і дефіциту водних ресурсів;
- оптимізація використання земельних ресурсів;
- підтримка адаптації сільського господарства до зміни клімату;

- прогнозування екологічних ризиків;
- забезпечення екологічно обґрунтованого територіального планування;
- підтримка природоохоронної діяльності та збереження біорізноманіття.

Таблиця 3.3

Основні напрями використання результатів ГІС-аналізу у системі сталого природокористування

Сфера природокористування	Виявлені кліматичні зміни	Можливі наслідки	Рекомендовані адаптаційні заходи
Водне господарство	Зменшення вологозабезпечення, зростання випаровуваності	Дефіцит водних ресурсів	Раціональне водокористування, модернізація систем водопостачання
Сільське господарство	Підвищення температури повітря, збільшення частоти посух	Зниження врожайності, деградація ґрунтів	Впровадження посухостійких культур, розвиток зрошення
Лісове господарство	Зростання температурних аномалій	Підвищення пожежної небезпеки, поширення шкідників	Створення систем моніторингу та раннього попередження
Урбанізовані території	Формування «островів тепла»	Погіршення мікрокліматичних умов	Озеленення територій, розвиток зеленої інфраструктури

Джерело: складено автором на основі результатів дослідження та джерел [17; 21; 23; 26; 33; 55]

Таким чином, результати ГІС-аналізу кліматичних змін є важливим інформаційним ресурсом для забезпечення сталого природокористування. Використання геоінформаційних технологій сприяє підвищенню ефективності управління природними ресурсами, своєчасному виявленню екологічних ризиків та розробленню науково обґрунтованих заходів адаптації до сучасних кліматичних змін. В умовах посилення глобального потепління значення таких досліджень для України буде постійно зростати.

3.5. Практичні рекомендації для регіональних органів влади та освітніх установ

Результати проведеного ГІС-моделювання регіональних кліматичних змін свідчать про наявність стійких тенденцій до підвищення температури повітря, погіршення умов природного вологозабезпечення, збільшення частоти екстремальних погодних явищ та посилення територіальної диференціації кліматичних ризиків. Встановлено, що найбільш вразливими до негативних наслідків зміни клімату є південні, південно-східні та окремі центральні регіони України, де поєднуються високі темпи потепління, дефіцит атмосферної вологи та обмеженість місцевих водних ресурсів. У зв'язку з цим особливого значення набуває впровадження комплексу адаптаційних заходів на регіональному рівні.

Одним із головних напрямів діяльності регіональних органів влади повинно стати вдосконалення системи моніторингу кліматичних змін та оцінювання кліматичних ризиків. Використання геоінформаційних систем дозволяє здійснювати постійний контроль за змінами температурного режиму, режиму атмосферних опадів, станом водних ресурсів та іншими показниками навколишнього середовища. Отримані дані можуть бути використані для своєчасного виявлення негативних тенденцій і прийняття управлінських рішень щодо мінімізації їх наслідків.

Важливим напрямом є інтеграція результатів кліматичних досліджень у регіональні стратегії розвитку територій. Під час розроблення програм

соціально-економічного розвитку доцільно враховувати прогнозовані зміни кліматичних умов, особливо в регіонах із підвищеним рівнем кліматичної вразливості. Це дозволить підвищити ефективність управління природними ресурсами та зменшити ризики для населення й господарства.

Особливу увагу необхідно приділяти водним ресурсам, які в умовах потепління стають одним із найважливіших чинників сталого розвитку територій. Для регіонів із недостатнім рівнем вологозабезпечення доцільним є впровадження сучасних водозберігаючих технологій, реконструкція застарілих систем водопостачання та водовідведення, а також створення програм комплексного управління водними ресурсами. Значну роль можуть відігравати заходи зі збереження малих річок, відновлення природних водно-болотних угідь та покращення екологічного стану водозбірних басейнів.

У сфері сільського господарства результати ГІС-моделювання можуть використовуватися для оптимізації структури землекористування та адаптації аграрного виробництва до нових кліматичних умов. Враховуючи прогнозоване збільшення площ посушливих територій, доцільно розширювати використання посухостійких сортів сільськогосподарських культур, впроваджувати технології точного землеробства, удосконалювати системи зрошення та підвищувати ефективність використання ґрунтової вологи. Такі заходи сприятимуть підвищенню стійкості аграрного сектору до кліматичних викликів.

Важливим напрямом адаптації є розвиток екологічно збалансованого лісокористування. В умовах підвищення температури повітря та збільшення тривалості посушливих періодів зростає ризик виникнення лісових пожеж, поширення шкідників та деградації лісових екосистем. Для мінімізації цих ризиків доцільно розширювати системи дистанційного моніторингу лісів, впроваджувати сучасні методи оцінювання пожежної небезпеки та здійснювати лісовідновлювальні заходи.

Окремої уваги потребують урбанізовані території, де наслідки кліматичних змін проявляються особливо інтенсивно. У великих містах спостерігається формування так званих «островів тепла», які спричиняють додаткове підвищення

температури повітря. Для зменшення негативного впливу цього явища доцільно збільшувати площі зелених насаджень, розвивати міську зелену інфраструктуру, впроваджувати енергоефективні технології будівництва та використовувати екологічно безпечні матеріали під час благоустрою територій.

Значну роль у формуванні адаптаційної політики відіграють заклади освіти. Саме система освіти забезпечує підготовку майбутніх фахівців, здатних працювати в умовах сучасних кліматичних викликів. У зв'язку з цим доцільним є розширення змісту навчальних програм шляхом включення питань зміни клімату, кліматичної безпеки, сталого розвитку та геоінформаційних технологій.

У закладах загальної середньої освіти рекомендовано ширше використовувати цифрові карти, геоінформаційні системи, супутникові знімки та інтерактивні геоінформаційні ресурси під час вивчення географії, природничих наук та екології. Це сприятиме формуванню просторового мислення учнів та розвитку навичок роботи з сучасними геоінформаційними технологіями.

Для закладів вищої освіти актуальним є вдосконалення освітніх програм шляхом посилення підготовки у сфері геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, кліматології, екологічного моніторингу та аналізу просторових даних. Важливим напрямом є залучення студентів до виконання наукових досліджень, присвячених оцінюванню наслідків кліматичних змін на регіональному рівні.

Перспективним напрямом є створення на базі закладів вищої освіти регіональних геоінформаційних центрів моніторингу кліматичних змін, які могли б забезпечувати збір, обробку та поширення актуальної інформації про стан навколишнього середовища. Такі центри можуть стати важливою ланкою співпраці між науковими установами, органами влади та громадськістю.

Для узагальнення основних результатів дослідження та практичних напрямів їх використання сформовано таблицю 3.4.

Важливим напрямом реалізації адаптаційних заходів є активне використання технологій дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем у процесі прийняття управлінських рішень. Сучасні супутникові дані

Sentinel, Landsat та інші відкриті джерела інформації дозволяють оперативно отримувати відомості про зміни земного покриву, стан рослинності, динаміку водних ресурсів, розвиток посушливих процесів та прояви екстремальних природних явищ. Використання таких даних у поєднанні з ГІС-технологіями забезпечує можливість створення систем раннього попередження про несприятливі кліматичні явища та підвищує ефективність екологічного моніторингу на регіональному рівні.

Особливо перспективним є застосування геоінформаційних технологій у процесі просторового планування територій. Результати ГІС-моделювання можуть використовуватися під час розроблення схем планування громад, стратегій регіонального розвитку, програм охорони довкілля та заходів із підвищення кліматичної стійкості населених пунктів. Просторовий аналіз дозволяє виявляти території з підвищеним рівнем кліматичного ризику, визначати пріоритетні напрями природоохоронної діяльності та обґрунтовувати заходи щодо адаптації господарства до нових кліматичних умов.

Не менш важливим є залучення громадськості до процесів моніторингу та адаптації до кліматичних змін. Відкриті геоінформаційні платформи та вебкартографічні сервіси створюють можливість широкого доступу населення до актуальної екологічної та кліматичної інформації. Це сприяє підвищенню рівня екологічної свідомості, формуванню відповідального ставлення до використання природних ресурсів та підтримці заходів, спрямованих на зменшення негативних наслідків зміни клімату.

Крім того, результати проведеного дослідження підтверджують необхідність розвитку міжвідомчої співпраці між органами державної влади, місцевого самоврядування, науковими установами, закладами освіти та природоохоронними організаціями. Лише комплексний підхід до використання геоінформаційних технологій, кліматичних даних і результатів дистанційного зондування Землі дозволить забезпечити ефективне управління природними ресурсами та реалізацію довгострокової політики адаптації до кліматичних змін в Україні.

Таблиця 3.4

**Практичні рекомендації щодо використання результатів ГС-
моделювання кліматичних змін**

Сфера впровадження	Основні рекомендації	Очікуваний результат
Регіональне управління	Врахування кліматичних ризиків у стратегіях розвитку територій	Підвищення адаптаційної спроможності регіонів
Водне господарство	Раціональне використання водних ресурсів та модернізація водогосподарської інфраструктури	Зменшення дефіциту води
Сільське господарство	Впровадження адаптивних технологій землеробства та посухостійких культур	Підвищення стійкості аграрного виробництва
Лісове господарство	Моніторинг пожежної небезпеки та відновлення лісових екосистем	Збереження лісових ресурсів
Урбанізовані території	Розвиток зеленої інфраструктури та енергоефективного будівництва	Покращення міського середовища
Екологічний моніторинг	Використання ГС і ДЗЗ для спостереження за станом довкілля	Підвищення ефективності природоохоронних заходів
Заклади освіти	Інтеграція ГС-технологій та кліматичної тематики в освітній процес	Формування екологічної та цифрової компетентності

Джерело: складено автором на основі результатів дослідження та джерел [17; 21; 23; 26; 33; 55]

Отже, результати проведеного ГС-аналізу можуть бути ефективно використані для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері природокористування, екологічної безпеки, водного та сільського господарства, територіального планування й освіти. Впровадження запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню адаптаційної спроможності регіонів України до сучасних кліматичних змін та забезпеченню принципів сталого розвитку.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі виконано просторовий аналіз сучасних кліматичних змін на території України із застосуванням геоінформаційних технологій та результатів кліматичного моделювання. Проведене дослідження дозволило виявити основні просторово-часові тенденції змін температурного режиму та показників вологозабезпечення, а також оцінити можливі наслідки цих процесів для природного середовища й господарської діяльності населення.

Установлено стійку тенденцію до підвищення середньорічної температури повітря на всій території України. Найбільш інтенсивне потепління спостерігається у південних, східних та центральних регіонах держави, де темпи зростання температури перевищують середньоукраїнські показники. Аналіз картографічних матеріалів засвідчив, що підвищення температури має виражений просторовий характер і супроводжується збільшенням частоти температурних аномалій та екстремальних погодних явищ.

Дослідження гідрокліматичних показників показало погіршення умов природного вологозабезпечення на значній частині території України. Виявлено тенденцію до поступового розширення площ недостатньо зволжених, посушливих і сухих територій, що особливо характерно для степової та лісостепової зон. Водночас спостерігається скорочення площ із надмірним та достатнім зволоженням, що свідчить про посилення ризиків дефіциту водних ресурсів у майбутньому.

За результатами ГІС-аналізу встановлено основні території підвищеного кліматичного ризику. До них належать насамперед південні та південно-східні області України, де поєднуються високі темпи потепління, зниження природного вологозабезпечення та обмеженість місцевих водних ресурсів. Отримані результати підтверджують необхідність посилення заходів адаптації до зміни клімату саме в цих регіонах.

На основі аналізу прогнозних сценаріїв до 2050 року визначено подальше зростання температури повітря та збільшення площ територій, що

потребуватимуть додаткового зволоження. Очікується посилення посушливості клімату, особливо у степових районах, що може негативно вплинути на аграрне виробництво, водне господарство та функціонування природних екосистем. Прогнозні оцінки свідчать про необхідність упровадження довгострокових адаптаційних заходів у сфері природокористування та регіонального розвитку.

Встановлено, що геоінформаційні системи є ефективним інструментом моніторингу, аналізу та прогнозування кліматичних змін. Їх використання забезпечує можливість інтеграції різномірних джерел даних, проведення просторового аналізу, створення тематичних карт та виявлення територій із підвищеним рівнем кліматичних ризиків. Це значно підвищує обґрунтованість управлінських рішень у сфері природокористування, екологічної безпеки та територіального планування.

На основі результатів дослідження розроблено практичні рекомендації для регіональних органів влади, природоохоронних установ та закладів освіти, спрямовані на підвищення адаптаційної спроможності територій до сучасних кліматичних змін. Особливе значення мають заходи щодо раціонального використання водних ресурсів, адаптації сільського господарства до нових кліматичних умов, розвитку систем екологічного моніторингу та впровадження геоінформаційних технологій у навчальний процес.

Отже, результати проведеного ГІС-моделювання підтверджують наявність суттєвих регіональних проявів сучасних кліматичних змін на території України та свідчать про доцільність широкого використання геоінформаційних технологій для оцінювання, прогнозування та управління кліматичними ризиками в умовах сталого розвитку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено особливості застосування геоінформаційних систем для моделювання регіональних кліматичних змін на території України. Актуальність дослідження обумовлена посиленням проявів сучасних кліматичних змін, необхідністю оцінювання їх просторових закономірностей та потребою у впровадженні ефективних адаптаційних заходів на регіональному рівні.

У процесі дослідження проаналізовано теоретико-методологічні засади ГІС-моделювання кліматичних процесів. Встановлено, що геоінформаційні системи є ефективним інструментом збору, обробки, аналізу та візуалізації просторових даних, а їх використання значно розширює можливості дослідження кліматичних змін. З'ясовано, що сучасні підходи до моделювання клімату базуються на комплексному використанні статистичних методів, кліматичних моделей, геоінформаційних технологій та засобів дистанційного зондування Землі.

Охарактеризовано основні джерела кліматичних і геопросторових даних, що використовуються для дослідження змін клімату. Встановлено, що найбільш інформативними є дані метеорологічних спостережень, супутникові матеріали дистанційного зондування Землі, глобальні кліматичні бази даних WorldClim, Copernicus Climate Data Store, NASA Earth Observatory та NOAA. Поєднання різних джерел інформації забезпечує високий рівень достовірності та просторової деталізації результатів дослідження. Сформовано інформаційно-аналітичну базу дослідження, яка об'єднала кліматичні, картографічні та супутникові дані. Проведено їх підготовку, геоприв'язку, систематизацію та інтеграцію в єдиному геоінформаційному середовищі. Для виконання просторового аналізу використано програмні засоби ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine та сервіси Copernicus Browser, що забезпечили можливість обробки великих масивів просторової інформації та створення тематичних карт.

У результаті просторово-часового аналізу встановлено стійку тенденцію до підвищення середньорічної температури повітря на території України. Виявлено,

що найвищі темпи потепління характерні для південних, східних та центральних регіонів держави. Одночасно спостерігається погіршення умов природного вологозабезпечення, збільшення площ посушливих і сухих територій та зростання ризику дефіциту водних ресурсів.

За результатами ГІС-моделювання виявлено території з підвищеним рівнем кліматичного ризику. Найбільш уразливими до негативних наслідків кліматичних змін є південні та південно-східні регіони України, де поєднуються високі темпи зростання температури повітря, недостатнє вологозабезпечення та обмеженість місцевих водних ресурсів. Проведений аналіз підтвердив необхідність розроблення регіонально орієнтованих адаптаційних заходів.

На основі аналізу прогнозних сценаріїв до 2050 року встановлено ймовірність подальшого посилення процесів потепління та аридизації клімату. Очікується збільшення площ територій, що потребуватимуть додаткового зволоження, а також посилення впливу кліматичних змін на аграрне виробництво, водне господарство, природні екосистеми та урбанізовані території.

Обґрунтовано можливості використання результатів ГІС-аналізу у сфері сталого природокористування, територіального планування, управління водними ресурсами, розвитку аграрного сектору та екологічного моніторингу. Розроблено практичні рекомендації для регіональних органів влади та закладів освіти щодо використання геоінформаційних технологій для оцінювання кліматичних ризиків, підвищення адаптаційної спроможності територій та вдосконалення екологічної освіти.

Таким чином, мету дослідження досягнуто, а поставлені завдання виконано. Отримані результати підтвердили ефективність використання геоінформаційних систем для аналізу та прогнозування регіональних кліматичних змін. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування результатів дослідження для оцінювання кліматичних ризиків, підтримки управлінських рішень та забезпечення сталого розвитку територій України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Атлас історії культури Волинської області / відп. ред. Ф. В. Зузук. Луцьк : Вежа, 2008. 112 с.
2. Байтеряков О. І., Собецька Т. Ю. Загальні підходи до формування картографічної культури у фізико-географічних курсах шкільної географії. Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Педагогіка. 2020. Вип. 1 (28). С. 100–106.
3. Бревус С. М., Паламачук Л. Б. Використання ГІС як освітнього інструменту в Київській Малій академії наук. Вісник геодезії та картографії. 2014. № 4 (91). С. 45–47.
4. Гаврилюк Л. О., Строкань С. В., Губіна І. С. та ін. Сучасні технології у викладанні географії та екології. Київ : Нова школа, 2019. 210 с.
5. Гененко І. А., Серпіліна М. А. Актуальність використання ГІС-технологій на уроках географії. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2010. Вип. 12. С. 24–26.
6. Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол. : О. М. Маринич та ін. Київ : Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 1993. Т. 3. 480 с.
7. Геращенко А. П. Використання ІКТ на уроках географії на прикладі тестових програм для перевірки знань учнів. Інформаційні технології і засоби навчання. 2014. Т. 41, № 3. С. 151–159. URL: [ІТЗН Archive](#) (дата звернення: 13.05.2026).
8. Геращенко С. Ф. Використання сучасних інноваційних і інформаційних технологій на уроках географії. Географія. 2015. № 3–4. С. 3–13.
9. Гришко С. В., Прохорова Л. А., Непша О. В. Роль і значення геоінформаційних систем в екологізації шкільного курсу географії. Наукове сьогодні: стан та перспективи регіональних досліджень. Мелітополь : МДПУ, 2021. С. 25–29.
10. Гусліста А. В., Подопрігора Н. В. Розвиток дослідницьких умінь учнів у навчанні природничих дисциплін. Тернопіль, 2020. С. 55–59.

11. Даценко Л. М. Викладання основ геоінформаційних систем і технологій у старших класах закладів загальної середньої освіти. Київ : ДНВП «Картографія», 2010. С. 260–263.
12. Даценко Л. М. Основи геоінформаційних систем та технологій у шкільних курсах за кордоном. Часопис картографії. 2011. Вип. 1. С. 197–205.
13. Державний стандарт базової і повної загальної середньої освіти. URL: [Законодавство України](#) (дата звернення: 13.05.2026).
14. Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів». URL: [Закон України 377-20](#) (дата звернення: 13.05.2026).
15. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». URL: [Закон України 1264-12](#) (дата звернення: 13.05.2026).
16. Закон України «Про регулювання господарської діяльності з озоноруйнівними речовинами та фторованими парниковими газами». URL: [Закон України 376-20](#) (дата звернення: 13.05.2026).
17. Іванюта С. П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації : аналіт. доп. Київ : НІСД, 2020. 110 с.
18. Капустін В. Г. ГІС-технології як інноваційний засіб розвитку географічної освіти. Педагогічна освіта. 2009. № 3. С. 68–76.
19. Кобернік С. Г. Методика викладання географії в школі. Київ : Стафед-2, 2012. 320 с.
20. Краківська С. В., Паламарчук Л. В., Шедеменко І. П., Гнатюк Н. В. Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (РЕМО). Наукові праці УкрНДГМІ. 2008. № 257. С. 60–65.
21. Купач Т. Г., Гринюк О. Ю. Географічні інформаційні системи: практичне застосування у географічних дослідженнях. Київ : ФОП Кравченко Я. О., 2021. 101 с.
22. Лаврик О. Д. Геоінформаційні технології в географії : навч. посіб. Умань : ФОП Жовтий О. О., 2014. 120 с.

23. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національний звіт про кліматичну політику та адаптацію до зміни клімату. Київ, 2024. URL: [Міністерство захисту довкілля України](#) (дата звернення: 13.05.2026).
24. Модельна навчальна програма «Географія. 6–9 класи». Київ : МОН України, 2022.
25. Навчальна програма з географії (рівень стандарту) для 10–11 класів закладів загальної середньої освіти : наказ МОН України № 698 від 03.08.2022 р.
26. Національний інститут стратегічних досліджень. Адаптація до кліматичних змін в Україні: політика, виклики, рішення. Київ : НІСД, 2023. 148 с.
27. Основи геоінформатики : навч. посіб. / за ред. О. О. Світличного. Суми : Університетська книга, 2006. 295 с.
28. Перспективи розвитку геоінформаційних технологій в умовах змін клімату : матер. міжнар. наук.-практ. конф. Одеса : Олді+, 2023. 179 с.
29. Проценко Ю. В. Геоінформаційні системи в екології : метод. рекомендації. Київ, 2018. 130 с.
30. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2017 р. № 878-р «Про затвердження плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року». URL: [КМУ 878-р](#) (дата звернення: 13.05.2026).
31. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 7 грудня 2016 р. № 932-р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату». URL: [КМУ 932-р](#) (дата звернення: 13.05.2026).
32. Таранова Н. Б., Кусяк М. А. Кліматичні виклики сталого розвитку територій України: температурні аномалії літа 2024 року як фактор формування адаптаційної політики. Сталі розумні міста та території: європейський досвід та можливості для України у повоєнний період : матер. міжнар. наук.-практ. конф. Луцьк : ЛНТУ, 2025. С. 125–130.
33. Таранова Н. Б., Кільчицький І. І., Онуфрак Н. М. Вплив змін клімату на аграрний сектор Західної України: аналіз сезонних змін та врожайності.

Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Сер.: геогр. 2025. № 1 (58). С. 62–83. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.25.1.7>

34. Таранова Н. Б., Кусяк М. А. Аналіз змін температурного режиму середньої, мінімальної та максимальної температури повітря на території України. Scientific Collection «InterConf». 2024. № 196. С. 245–252.

35. Таранова Н. Б. Просторово-часовий аналіз змін якості повітря та води в умовах урбанізації Тернополя за даними дистанційного зондування Землі (2019–2024 рр.). Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Сер.: геогр. 2025. № 1 (58). С. 84–96.

36. Теорія прийняття рішень : підручник / за ред. М. П. Бутка. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 360 с.

37. Топузов О. М. Організація проблемного навчання на уроках географії в середній школі. Рідна школа. 2007. № 3. С. 43–46.

38. Шевченко Я. О., Білявський С. Г. Сучасний стан і перспективи використання ГІС-технологій в агросфері й агроекологічній освіті. Наукові записки. Біологія та екологія. 2001. Т. 19. С. 93–94.

39. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2010. 313 с.

40. Яцків Я. С., Маліцький Б. А., Бублик С. Г. Трансформація наукової системи України протягом 90-х років ХХ століття: період переходу до ринку. Наука та інновації. 2016. Т. 12, № 6. С. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin12.06.006>

41. ArcGIS for Climate Change Analysis. URL: [ArcGIS Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

42. Climate Change Performance Index. URL: [Climate Change Performance Index](#) (дата звернення: 13.05.2026).

43. Climate Data Store. URL: [Climate Data Store](#) (дата звернення: 13.05.2026).

44. Copernicus Climate Change Service. URL: [Copernicus Climate Change Service](#) (дата звернення: 13.05.2026).

45. Copernicus Data Space Ecosystem. URL: [Copernicus Data Space Ecosystem](#) (дата звернення: 13.05.2026).
46. European Commission. EU Climate Action and the European Green Deal. Brussels, 2024. URL: [European Commission Climate Action](#) (дата звернення: 13.05.2026).
47. European Environment Agency. Climate change adaptation in Europe: 2023 report. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. 312 p.
48. FAO. The State of Food and Agriculture 2023: Climate Change and Resource Management. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. URL: [FAO Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).
49. Global Carbon Project. Global Carbon Budget 2024. Canberra, 2024. URL: [Global Carbon Project](#) (дата звернення: 13.05.2026).
50. Google Earth Engine for Environmental Monitoring and Climate Analysis. URL: [Google Earth Engine Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).
51. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva : IPCC, 2023. 180 p. URL: [IPCC AR6 Report](#) (дата звернення: 13.05.2026).
52. NASA Earth Observatory. GIS and Remote Sensing Applications for Climate Change Monitoring. Washington D.C., 2023. URL: [NASA Earth Observatory](#) (дата звернення: 13.05.2026).
53. National Aeronautics and Space Administration. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. URL: [NASA Climate Change](#) (дата звернення: 13.05.2026).
54. National Oceanic and Atmospheric Administration. Global Climate Report 2024. URL: [NOAA Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).
55. OECD. Geospatial Information for Climate Resilience. Paris : OECD Publishing, 2023. DOI: 10.1787/geospatial-2023-en.
56. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. URL: [QGIS Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).
57. Sentinel Hub EO Browser. URL: [Sentinel Hub EO Browser](#) (дата звернення: 13.05.2026).

58. Ukraine. 2019 National Inventory Report (NIR). URL: [UNFCCC NIR Ukraine](#) (дата звернення: 13.05.2026).

59. United Nations Development Programme. Climate Change Adaptation and Resilience Building in Eastern Europe. New York, 2023. URL: [UNDP Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

60. United Nations Environment Programme. Climate Action Overview 2024. URL: [UNEP Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

61. United Nations Framework Convention on Climate Change. Nationally Determined Contributions Synthesis Report 2024. Bonn : UNFCCC Secretariat, 2024. URL: [UNFCCC Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

62. United States Geological Survey. Landsat Missions for Climate Monitoring. URL: [USGS Landsat Missions](#) (дата звернення: 13.05.2026).

63. World Bank. Ukraine: Climate and Development Report. Washington D.C. : World Bank Group, 2023. URL: [World Bank Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

64. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2023. Geneva : WMO, 2024. 70 p. URL: [WMO Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

65. WorldClim Version 2. Global Climate Data. URL: [WorldClim Official Website](#) (дата звернення: 13.05.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

Найбільш популярні комбінації каналів для Sentinel 2a та Landsat

Супутники Landsat

Програма Landsat – найтриваліший проєкт з отримання супутникових знімків нашої планети. Перший із супутників у рамках цієї космічної програми був запущений 1972 р., а останній на сьогодні – Landsat 9 – 2021 р.

Landsat 1 (спочатку ERTS-1, Earth Resources Technology Satellite 1) – запущений 23 липня 1972 р., припинив роботу 6 січня 1978 р.

Landsat 2 (ERTS-B) – запущений 22 січня 1975 р., припинив роботу 22 січня 1981 р.

Landsat 3 – запущений 5 березня 1978 р., припинив роботу 31 березня 1983 р.

Landsat 4 – запущений 16 липня 1982 р., припинив роботу 1993 р.

Landsat 5 – запущений 1 березня 1984 р., припинив роботу 21 грудня 2012 р.

Landsat 6 – його запустили 5 жовтня 1993 р., але не вивели на цільову орбіту.

Landsat 7 – запущений 15 квітня 1999 р. і функціонує досі. Landsat 7 має ті самі сім каналів, що і Landsat 4 і 5, але в нього є додатковий канал із широким спектральним діапазоном і розрізненням 15 м*15 м. Крім того, просторове розрізнення в каналі 6 (тепловий ІЧ-діапазон) було збільшено зі 120 м до 60 м.

Landsat 8 – запущений 11 лютого 2013 р. і функціонує досі. Він надає знімки в 11 спектральних діапазонах із просторовою розрізненістю від 15 м (панхроматичний канал – В8) до 30 м на точку (всі інші В1-В7, В9), теплові канали В10 та В11 передискретизовані зі 100 м до 30 м, періодичність збору даних для всієї планети становить ≤ 8 діб.

Landsat 9 – запущений 27 вересня 2021 р. і досі активний. Це реконструкція його попередника Landsat 8.

Канали Landsat 8-9

Landsat 8 (Bands)	Довжина хвилі [мікрометри]	Просторова розрізненість [метри]
Канал 1 – Аерозолі	0.43–0.45	30
Канал 2 – Синій	0.45–0.51	30
Канал 3 – Зелений	0.53–0.59	30
Канал 4 – Червоний	0.64–0.67	30
Канал 5 – Ближній інфрачервоний (NIR)	0.85–0.88	30

ДОДАТОК Б

СУПУТНИКИ SENTINEL

Copernicus – це програма Європейського космічного агентства (ESA), яка працює під керівництвом Європейського Союзу. Ця програма надає дані для оперативного моніторингу навколишнього середовища і цивільної безпеки. Усі дані безкоштовні і є у відкритому доступі. Місії Sentinel: нині запущено низку серій космічних місій Sentinel.

Sentinel-1 – Радарна зйомка (C-band SAR)

Радарна місія С-діапазону (SAR), що забезпечує всепогодні та цілодобові спостереження. Надає дані для моніторингу деформацій земної поверхні, повеней, льоду, судноплавства та надзвичайних ситуацій.

Sentinel-1A – запущений 3 квітня 2014 р.

Sentinel-1B – запущений 25 квітня 2016 р., виведений з експлуатації (2022).

Sentinel-1C – запущений 5 грудня 2024 р.

Sentinel-1D – запущений 4 листопада 2025 р.

Sentinel-2 – Оптична зйомка

Оптична мультиспектральна місія з високою просторовою розрізненістю. Використовується для аналізу рослинності, сільського господарства, водних об'єктів, ґрунтів і землекористування.

Sentinel-2A – запущений 23 червня 2015 р.

Sentinel-2B – запущений 7 березня 2017 р.

Sentinel-2C – запущений 5 вересня 2024 р.

Sentinel-3 – Океанографічні та наземні параметри

Місія для спостереження океанів і суходолу, що поєднує оптичні, теплові та альтиметричні вимірювання. Надає дані про температуру поверхні, колір води, рівень моря та океанічну динаміку.

Sentinel-3A – запущений 16 лютого 2016 р.

Sentinel-3B – запущений 25 квітня 2018 р.

Sentinel-4 – Атмосфера (геостаціонарна орбіта)

Атмосферна місія на геостаціонарній орбіті, зосереджена на Європі. Забезпечує часті (майже щогодинні) вимірювання концентрацій газів-забруднювачів і аерозолів у тропосфері.

Sentinel-4 – запущений 1 липня 2025 р. на борту MTG-S1.

Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) – Атмосфера

Попередня місія для глобального моніторингу складу атмосфери. Забезпечує безперервність вимірювань атмосферних газів до появи Sentinel-5. Вимірює NO₂, SO₂, CO, O₃, CH₄ та аерозолі, широко використовується для оцінки якості повітря.

Sentinel-5P – запущений 13 жовтня 2017 р.

Sentinel-5 – Атмосфера (полярна орбіта)

Sentinel-5A – запущений 13 серпня 2025 р.

Sentinel-6 – Вимірювання рівня моря

Високоточна альтиметрична місія для вимірювання рівня Світового океану. Ключова для дослідження змін клімату, океанічної циркуляції та підвищення рівня моря.

Sentinel-6 Michael Freilich (6A) – запущений 21 листопада 2020 р. Sentinel-6B – запущений 17 листопада 2025 р.