

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

МЕТОДИ ТИПІЗАЦІЇ В НАУКАХ ПРО ЗЕМЛЮ

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

Виконав: здобувач 2 курсу 05-213М групи

Спеціальності 103 Науки про Землю

Освітньо-наукової програми «Науки про Землю»

Подоляк Петро Вікторович

Керівник: д. геогр. н, професор, Пилипенко І. О.

Рецензент: к. б. н., керівник науково-дослідного
відділу НПП «Кам'янська Січ» Ходосовцева Ю.А.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. СУТНІСТЬ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ТИПІЗАЦІЇ В НАУКАХ ПРО ЗЕМЛЮ.....	6
1.1. Сутність та значення типізації в науках про Землю.....	6
1.2. Класифікація основних підходів та методів типізації в науках про Землю.....	8
1.3. Історія розвитку методів типізації в різних галузях наук про Землю.....	14
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТИПІЗАЦІЇ В ОСНОВНИХ ГАЛУЗЯХ НАУК ПРО ЗЕМЛЮ.....	19
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ОБ'ЄКТИВНОСТІ, ТОЧНОСТІ, ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ТИПІЗАЦІЇ.....	27
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	41

ВСТУП

Сучасний етап розвитку наук про Землю характеризується зростанням обсягів даних, отриманих за допомогою різноманітних методів спостереження, дистанційного зондування, моделювання та лабораторних досліджень. Ефективна обробка, аналіз та інтерпретація цієї інформації вимагають застосування надійних методів систематизації та класифікації складних природних об'єктів, процесів і явищ. Одним з ключових підходів до вирішення цієї проблеми є типізація – процес об'єднання об'єктів у групи на основі спільних характеристик та закономірностей [36].

Методи типізації є фундаментальним інструментом у багатьох галузях наук про Землю, включаючи геологію, географію, ґрунтознавство, гідрологію, метеорологію, екологію та інші. Вони використовуються для розв'язання широкого спектра наукових і практичних завдань, таких як картографування природних ресурсів, оцінка екологічного стану територій, прогнозування стихійних лих, розробка стратегій сталого розвитку та управління природними системами [43].

Незважаючи на тривалу історію застосування, методи типізації в науках про Землю продовжують активно розвиватися під впливом нових технологій та теоретичних підходів. Поява потужних геоінформаційних систем (ГІС), методів дистанційного зондування високої роздільної здатності, технологій обробки великих даних (Big Data), а також алгоритмів машинного навчання відкриває нові можливості для більш об'єктивної, комплексної та динамічної типізації земних систем [12].

Однак, незважаючи на значний прогрес, існують певні виклики та невирішені питання у сфері застосування методів типізації. До них належать проблеми вибору оптимальних критеріїв та параметрів типізації, врахування ієрархічності та багатофакторності природних систем, оцінка достовірності та репрезентативності отриманих

результатів, а також інтеграція різних методів типізації для отримання більш цілісного розуміння досліджуваних об'єктів [42].

У контексті зазначеного, дослідження сучасного стану, застосування та перспектив розвитку методів типізації в науках про Землю є актуальним та має важливе теоретичне і практичне значення для подальшого розвитку фундаментальних і прикладних досліджень у цій галузі.

Мета дослідження: Систематизувати, проаналізувати та оцінити сучасні методи типізації в природничих науках.

Завдання дослідження:

1. Визначити сутність поняття "типізація" та її роль у науках про Землю: проаналізувати історію розвитку методів типізації в основних галузях наук про Землю.
2. Дослідити сучасні приклади застосування різних методів типізації в геології, географії, ґрунтознавстві, гідрології, метеорології, екології та інших галузях.
3. Виявити перспективні напрямки інтеграції та удосконалення методів типізації в науках про Землю.

Об'єкт дослідження: процеси та методи типізації, що застосовуються в різних галузях наук про Землю для класифікації та систематизації природних об'єктів, явищ і процесів.

Предмет дослідження: теоретичні та практичні аспекти застосування сучасних методів типізації (морфологічних, генетичних, геохімічних, статистичних, геоінформаційних та інших) в науках про Землю, їхня ефективність, обмеження та перспективи розвитку.

Наукове значення роботи. Робота сприяє систематизації та узагальненню існуючих методів типізації, що використовуються в різних галузях наук про Землю. Результати роботи можуть слугувати теоретичним підґрунтям для подальших наукових досліджень, пов'язаних

з розробкою та застосуванням методів типізації в конкретних галузях наук про Землю.

Практичне значення роботи. Методи типізації, розглянуті в роботі, мають велике значення для підтримки прийняття рішень у різних сферах практичної діяльності, пов'язаної з використанням та охороною природних ресурсів, управлінням ризиками, плануванням територій тощо. Методи типізації є важливим інструментом для картографування та просторового моделювання природних об'єктів та явищ, що дозволяє отримувати наочне уявлення про їхній розподіл та взаємозв'язки.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та переліку використаних джерел (43 найменування).

РОЗДІЛ 1

СУТНІСТЬ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ТИПІЗАЦІЇ В НАУКАХ ПРО ЗЕМЛЮ

1.1 Сутність та значення типізації в науках про Землю

Типізація в науках про Землю – це процес класифікації та категоризації різноманітних об'єктів, явищ і процесів на планеті на основі певних критеріїв і ознак, що має на меті спрощення складних природних систем, систематизацію знань, виявлення закономірностей, створення картографічних матеріалів, а також забезпечення інформаційної бази для прогнозування та прийняття рішень у сфері природокористування й охорони довкілля [7].

Типізація розглядається як науковий метод, що полягає в розподілі множини об'єктів, явищ або процесів наук про Землю на якісно відмінні, внутрішньо однорідні групи (типи, класи, таксони) на основі виявлення та узагальнення їхніх суттєвих спільних ознак, властивостей та закономірностей [39].

Сутність типізації полягає у здійсненні наступних ключових етапів:

1. Виявлення критеріїв типізації. Визначення найбільш інформативних та діагностичних ознак, які відображають внутрішню природу досліджуваних об'єктів та є важливими для розв'язання конкретного наукового або практичного завдання.

2. Встановлення принципів класифікації. Визначення логічних правил та процедур, що використовуються для об'єднання об'єктів у певні типи на основі обраних критеріїв.

3. Проведення процедури типізації. Безпосереднє віднесення конкретних об'єктів до визначених типів на основі їхніх характеристик та встановлених принципів класифікації.

4. Характеристика виділених типів. Опис основних властивостей, закономірностей та відмінних рис кожного виділеного типу [29].

Роль типізації в науках про Землю є надзвичайно важливою та багатогранною. Вона виконує наступні ключові функції:

- Систематизація знань. Типізація дозволяє впорядкувати великі обсяги інформації про складні природні об'єкти та процеси, створюючи логічну структуру для їхнього розуміння та аналізу.
- Спрощення складності. Виділення типових рис дає змогу абстрагуватися від індивідуальних особливостей окремих об'єктів і зосередитися на загальних закономірностях їхньої будови, функціонування та розвитку.
- Прогнозування. Виявлення стійких зв'язків між типами об'єктів та їхніми властивостями дозволяє прогнозувати поведінку нових або недостатньо вивчених об'єктів, що належать до певного типу.
- Картографування та моделювання. Результати типізації є основою для створення тематичних карт, схем та моделей, що відображають просторове поширення різних типів природних об'єктів та їхні взаємозв'язки.
- Виявлення еволюційних та генетичних зв'язків. Типізація, заснована на генетичних або історичних критеріях, сприяє розумінню походження та розвитку різних природних утворень [20].

Таким чином, типізація є не просто формальним процесом класифікації, а фундаментальним методологічним підходом, що забезпечує глибоке розуміння складної організації та функціонування геосфер, сприяє розвитку теоретичних знань та вирішенню важливих практичних завдань у науках про Землю. Подальші розділи роботи будуть присвячені аналізу конкретних методів типізації, що використовуються в різних галузях наук про Землю, їхнім можливостям та обмеженням.

1.2. Класифікація основних підходів та методів типізації в науках про Землю

У науках про Землю застосовується широкий спектр методів типізації, які можна класифікувати за різними критеріями, відображаючи їхні теоретичні основи, використовувані дані та процедури аналізу. В рамках даної магістерської роботи пропонується наступна класифікація основних підходів та методів типізації.

I. За теоретичними засадами та природою критеріїв типізації.

1.1. Морфологічні методи.

Ґрунтуються на зовнішніх ознаках, формі, структурі та будові об'єктів. Широко використовуються в геології (класифікація гірських порід за текстурою, структурою, кольором), географії (типізація форм рельєфу, ландшафтів за зовнішнім виглядом), ґрунтознавстві (морфологічний опис ґрунтових профілів). Переваги: відносна простота застосування, наочність результатів. Недоліки: можуть не відображати генетичні зв'язки та функціональні особливості об'єктів [9].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості морфологічних методів типізації наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів морфологічних типізацій в Науках про Землю

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
Морфологічні	Вимірювання геометричних параметрів об'єктів (довжина, площа, об'єм). Статистичний аналіз морфометричних характеристик (середнє, дисперсія, кореляція).	Візуальний опис форми, розміру, текстури, кольору об'єктів. Порівняльний аналіз морфологічних ознак різних об'єктів.	Проблеми: Суб'єктивність опису, складність автоматизації, обмеженість застосування при аналізі складних об'єктів.

Продовження таблиці 1.1

Морфологічні	Комп'ютерний аналіз зображень для автоматичного виділення та класифікації морфологічних елементів. ГІС-аналіз для картографування та типізації морфологічних характеристик на великих територіях.	Створення морфологічних класифікацій на основі якісних критеріїв. Фотографування та схематичне зображення морфологічних елементів.	Перспективи: Розробка об'єктивних методів кількісної оцінки морфологічних ознак, автоматизація аналізу за допомогою комп'ютерного зору, інтеграція з ГІС для просторового аналізу.
--------------	---	--	---

1.2 Генетичні методи.

Базуються на спільності походження, історії розвитку та процесів формування об'єктів. Застосовуються в геології (класифікація магматичних порід за походженням), ґрунтознавстві (генетична класифікація ґрунтів за процесами ґрунтоутворення), географії (типізація природних зон за кліматоутворюючими факторами). Переваги: відображають глибинні зв'язки між об'єктами, сприяють розумінню їхньої еволюції. Недоліки: можуть бути складними у застосуванні, вимагають глибоких знань про генезис об'єктів [4].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості генетичних методів типізації наведено в таблиці 1.2

Таблиця 1.2

**Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів
генетичних типізацій в Науках про Землю**

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
Генетичні	Радіоізотопне датування для визначення віку геологічних утворень. Геохімічний аналіз для визначення походження гірських порід та мінералів. Статистичний аналіз генетичних зв'язків між різними об'єктами. Моделювання процесів формування природних об'єктів.	Опис історії формування та розвитку об'єктів. Визначення генетичних типів та категорій. Порівняльний аналіз генетичних особливостей різних об'єктів. Створення генетичних класифікацій на основі якісних критеріїв.	Проблеми: Складність визначення генетичних зв'язків, обмеженість даних, трудомісткість та вартість методів. Перспективи: Розвиток методів молекулярної генетики для аналізу генетичного матеріалу, застосування машинного навчання для моделювання генетичних процесів, інтеграція з геохронологічними даними.

1.3 Геохімічні методи, які ґрунтуються на хімічному складі об'єктів, розподілі хімічних елементів та їхніх сполук.

Використовуються в геології (класифікація мінералів та гірських порід за хімічним складом), гідрохімії (типізація вод за хімічним складом), ґрунтознавстві (оцінка родючості ґрунтів за вмістом поживних речовин). Переваги: надають об'єктивні кількісні характеристики об'єктів. Недоліки: вимагають лабораторних досліджень, можуть не відображати структурні та морфологічні особливості [41].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості геохімічних методів типізації наведено в таблиці 1.3

Таблиця 1.3

**Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів
геохімічних типізацій в Науках про Землю**

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
Геохімічні	Кількісний хімічний аналіз для визначення вмісту елементів та сполук. Статистичний аналіз геохімічних даних (середнє, дисперсія, кореляція). Геохімічне моделювання для відтворення хімічних процесів. Ізотопний аналіз для визначення походження та віку речовини.	Якісний хімічний аналіз (визначення наявності певних елементів, реакції). Опис хімічного складу та властивостей речовини. Порівняльний аналіз хімічних характеристик різних об'єктів. Створення геохімічних класифікацій на основі якісних критеріїв.	Проблеми: Варіабельність геохімічних даних, складність інтерпретації, обмеженість просторового охоплення. Перспективи: Розвиток методів дистанційного зондування для оцінки геохімічних характеристик, застосування машинного навчання для аналізу багатовимірних геохімічних даних, інтеграція з геофізичними даними.

4. Функціональні методи.

Базуються на спільних функціях, процесах та взаємодіях, що відбуваються в досліджуваних системах. Застосовуються в екології

(типізація екосистем за їхніми функціональними характеристиками), гідрології (класифікація річок за режимом стоку). Переваги: відображають динамічні аспекти природних систем. Недоліки: можуть бути складними для кількісної оцінки та визначення чітких критеріїв [21].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості геохімічних методів типізації наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

**Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів
функціональних типізацій в Науках про Землю**

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
Функціональні	Кількісне визначення показників функціонування систем (наприклад, продуктивність, енергообмін). Статистичний аналіз функціональних характеристик. Моделювання функціональних процесів. Оцінка стійкості систем.	Опис функцій, ролей та процесів у системах. Визначення типів функціональних взаємодій. Порівняльний аналіз функціональних характеристик різних систем. Створення функціональних класифікацій на основі якісних критеріїв.	Проблеми: Складність кількісної оцінки функцій, залежність від масштабу та просторової неоднорідності, обмеженість даних. Перспективи: Розробка методів інтеграції даних різних типів для комплексної оцінки функцій, застосування системного аналізу та моделювання, розробка показників стійкості та адаптивності систем.

II. За методами обробки та аналізу даних:

2.1. Якісні (описові) методи.

Ґрунтуються на візуальному спостереженні, описі характерних ознак та експертній оцінці. Широко використовуються на початкових етапах дослідження та для попередньої типізації. Переваги: простота та доступність. Недоліки: суб'єктивність, складність формалізації та кількісного порівняння.

2.2. Кількісні (статистичні) методи.

Використовують математичні та статистичні методи для обробки та аналізу кількісних даних про властивості об'єктів. Включають кластерний аналіз, факторний аналіз, дискримінантний аналіз та інші багатовимірні статистичні методи. Переваги: об'єктивність, можливість одночасного врахування великої кількості ознак, чіткість меж між типами. Недоліки: залежність результатів від якості та репрезентативності вихідних даних, складність інтерпретації [1].

Окрема група методів типізації, яка поєднує переваги та кількісного та якісного методів – **2.3 Геоінформаційні методи** (ГІС-орієнтовані). Інтегрують просторові дані, отримані за допомогою ГІС та дистанційного зондування, для проведення типізації територій та об'єктів. Використовують методи просторового аналізу, оверлеювання шарів, класифікації зображень. Переваги: врахування просторової варіативності, можливість автоматизованої обробки великих територій. Недоліки: залежність від якості та роздільної здатності вхідних даних, необхідність спеціалізованого програмного забезпечення та знань [38].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості методів типізації на основі ГІС-технологій наведено в таблиці 1.5

Таблиця 1.5

Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів типізації на основі ГІС-технологій в Науках про Землю

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
ГІС технології	Просторовий аналіз (наприклад, оверлей, буферування, мережевий аналіз) для виявлення просторових закономірностей та зв'язків. Картографічне моделювання для створення тематичних карт та типізації територій.	Візуалізація якісних характеристик об'єктів на карті. Опис просторового розподілу якісних ознак. Картографічне відображення якісних класифікацій.	Проблеми: Залежність від якості та доступності просторових даних, складність інтеграції даних різних типів, необхідність спеціалізованого програмного забезпечення.

Продовження таблиці 1.5

ГІС технології	Геостатистичний аналіз для інтерполяції та типізації просторово розподілених даних. Автоматизована класифікація зображень дистанційного зондування.	Аналіз взаємозв'язків між якісними характеристиками та просторовими об'єктами.	Перспективи: Розвиток хмарних ГІС, інтеграція з методами машинного навчання для автоматизованої типізації, розробка 3D та 4D ГІС для аналізу динамічних процесів.
----------------	---	--	---

2.4. Методи машинного навчання (штучного інтелекту).

Застосовують алгоритми машинного навчання (наприклад, нейронні мережі, дерева рішень, метод опорних векторів) для автоматизованої класифікації та типізації складних даних. Дозволяють виявляти неявні закономірності та будувати складні моделі типізації. Переваги: висока точність класифікації, здатність обробляти великі та різномірні дані. Недоліки: "чорна скринька" алгоритмів, складність інтерпретації результатів, вимоги до великих обсягів навчальних даних [30].

Узагальнені переваги, недоліки та особливості методів типізації на основі ГІС-технологій наведено в таблиці 1.6.

Важливо зазначити, що на практиці часто застосовується комбінація різних підходів та методів типізації для отримання більш об'єктивних, комплексних та інформативних результатів. Вибір конкретного методу або їхньої комбінації залежить від мети дослідження, природи досліджуваних об'єктів, наявності даних та доступних ресурсів. Подальші розділи роботи детальніше розглянуть застосування цих методів у різних галузях наук про Землю.

Таблиця 1.6

**Узагальнена характеристика якісних і кількісних методів типізацій
на основі машинного навчання в Науках про Землю**

Методи типізації за теоретичними засадами	Кількісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Якісні, особливості реалізації, прийоми та інструменти	Проблеми та перспективи типізації
Машинного навчання	Класифікація з учителем (supervised classification) на основі алгоритмів машинного навчання (наприклад, Support Vector Machine, Random Forest). Кластеризація (unsupervised classification) для виділення груп схожих об'єктів (наприклад, K-means, DBSCAN). Нейронні мережі для розпізнавання образів та класифікації складних даних. Оцінка точності та валідація результатів класифікації.	Розробка алгоритмів машинного навчання, що використовують якісні критерії для класифікації. Інтерпретація результатів машинного навчання з урахуванням якісних характеристик об'єктів. Візуалізація результатів класифікації, отриманих за допомогою машинного навчання, з використанням якісних ознак.	Проблеми: "Чорна скринька" алгоритмів, потреба у великих обсягах даних, складність інтерпретації результатів. Перспективи: Розробка пояснюваних алгоритмів машинного навчання (Explainable AI), застосування глибокого навчання для аналізу складних даних, інтеграція з іншими методами типізації.

1.3. Історія розвитку методів типізації в різних галузях наук про Землю

Історія розвитку методів типізації в науках про Землю тісно пов'язана з накопиченням знань про будову, склад, властивості та процеси, що відбуваються на нашій планеті. Від перших спроб описової систематизації до сучасних складних статистичних та комп'ютерних підходів, методи типізації пройшли значний еволюційний шлях у кожній з галузей.

Геологія.

Ранній етап (до XVIII століття): Перші спроби типізації в геології були переважно описовими та базувалися на візуальних характеристиках гірських порід та мінералів. Класифікації носили фрагментарний характер і часто були пов'язані з практичними потребами (пошук корисних копалин, будівництво).

Становлення наукової геології (XVIII-XIX століття): З розвитком стратиграфії та палеонтології з'явилися перші наукові класифікації гірських порід за віком та умовами утворення (плутоністи проти неплутоністів). Були розроблені перші систематики мінералів на основі їхніх фізичних властивостей та хімічного складу (наприклад, класифікація Берцеліуса).

Розвиток петрографії та мінералогії (XIX-XX століття): З появою мікроскопа та методів хімічного аналізу розвивається детальна петрографічна класифікація гірських порід за мінеральним складом та текстурою (класифікації Розенбуша, Цорна). У мінералогії кристалохімічні дослідження лягли в основу сучасних систематик.

Сучасний етап (XX-XXI століття): Розвиток геохімії, ізотопної геології, дистанційного зондування та комп'ютерних методів призвів до появи комплексних класифікацій, що враховують генезис, склад, вік та просторове поширення геологічних об'єктів. Статистичні методи та ГІС використовуються для регіональної геологічної типізації та моделювання [5, 6].

Географія.

Ранній етап (до XVIII століття): Перші географічні описи включали елементи типізації територій за природними умовами (клімат, рослинність) та господарською діяльністю. Класифікації були несистематичними та базувалися на суб'єктивних спостереженнях.

Становлення наукової географії (XVIII-XIX століття): З розвитком фізичної географії з'являються перші наукові класифікації природних зон (Гумбольдт). Розвивається вчення про ландшафт, робляться спроби їхньої типології на основі морфологічних ознак.

Розвиток ландшафтознавства та кліматології (XX століття): Формуються детальні класифікації ландшафтів, розробляються кліматичні класифікації, що базуються на кількісних показниках. Активно використовуються картографічні методи типізації.

Сучасний етап (XX-XXI століття): Розвиток дистанційного зондування та ГІС дозволив здійснювати автоматизовану типізацію ландшафтів та природних зон на основі спектральних та просторових даних. Методи геостатистики та машинного навчання застосовуються для виявлення регіональних закономірностей та класифікації геосистем [15, 16].

Грунтознавство.

Ранній етап (до XIX століття): Перші описи ґрунтів були пов'язані з сільськогосподарськими потребами та базувалися на візуальних характеристиках (колір, структура, родючість).

Становлення наукового ґрунтознавства (XIX століття): В.В. Докучаєв заклав основи генетичного ґрунтознавства, розробивши першу наукову класифікацію ґрунтів на основі факторів ґрунтоутворення.

Розвиток генетичної та географічної класифікації (XX століття): Розробляються національні та міжнародні системи класифікації ґрунтів (наприклад, класифікація ґрунтів CPCP, USDA Soil Taxonomy). Активно досліджується морфологія, хімічний склад та фізичні властивості різних типів ґрунтів [31].

Сучасний етап (XX-XXI століття): Розвиток методів дистанційного зондування та ГІС дозволяє здійснювати картографування та типізацію ґрунтів на великих територіях за спектральними ознаками та індексами. Методи геостатистики та машинного навчання використовуються для прогнозування поширення різних типів ґрунтів та оцінки їхніх властивостей [25].

Гідрологія.

Ранній етап (до XVIII століття): Перші описи водних об'єктів були пов'язані з практичними потребами (судноплавство, водопостачання) та базувалися на розмірах, течії та якості води.

Становлення наукової гідрології (XVIII-XIX століття): З розвитком гідрометрії починаються кількісні вимірювання гідрологічних

характеристик (рівень, витрата води). Робляться перші спроби класифікації річок та озер за їхнім режимом.

Розвиток гідрологічних класифікацій (XX століття): Розробляються класифікації річок за водністю, режимом живлення, морфологічними особливостями русла. Класифікуються озера за походженням, гідрологічним режимом та хімічним складом води.

Сучасний етап (XX-XXI століття): Активно використовуються методи дистанційного зондування для моніторингу та типізації водних об'єктів (визначення площі, температури, вмісту зважених речовин). ГІС-технології застосовуються для аналізу гідрологічних мереж та типізації водозбірних басейнів. Математичне моделювання та статистичні методи використовуються для типізації гідрологічних режимів та прогнозування водних ресурсів [27].

Метеорологія та кліматологія.

Ранній етап (до XVII століття): Перші метеорологічні спостереження були спорадичними та описовими. Класифікація погодних явищ була елементарною.

Становлення наукової метеорології (XVII-XIX століття): З появою інструментальних спостережень (термометр, барометр) починається кількісний аналіз погодних умов. Робляться перші спроби кліматичної класифікації за широтою та висотою.

Розвиток синоптичної метеорології та кліматології (XX століття): Формується синоптична метеорологія, розробляються класифікації атмосферних фронтів та циклонів. З'являються перші наукові кліматичні класифікації (Кеппен, Алісов), що базуються на кількісних показниках температури та опадів.

Сучасний етап (XX-XXI століття): Розвиток метеорологічних супутників, радарів та чисельних моделей атмосфери дозволяє здійснювати детальний моніторинг та типізацію погодних явищ та атмосферних процесів. Методи дистанційного зондування та ГІС

використовуються для картографування кліматичних параметрів та типів клімату. Методи машинного навчання застосовуються для розпізнавання кліматичних патернів та прогнозування погоди [26].

Екологія та охорона навколишнього середовища:

Ранній етап (до XIX століття): Перші описи рослинних та тваринних угруповань були переважно флористичними та фауністичними.

Становлення наукової екології (XIX-XX століття): Формуються перші класифікації екосистем на основі домінуючих видів та абіотичних факторів. Розвивається вчення про біотопи та їхню типологію.

Розвиток екосистемних класифікацій (XX століття): Розробляються детальні класифікації екосистем на основі структури, функціонування та трофічних зв'язків. Активно використовуються флористичні та геоботанічні підходи до типізації рослинності.

Сучасний етап (XX-XXI століття): Методи дистанційного зондування використовуються для картографування та типізації екосистем та біотопів за спектральними ознаками та індексами. ГІС-технології застосовуються для аналізу просторового розподілу екосистем та біорізноманіття. Методи машинного навчання використовуються для класифікації екологічних станів та прогнозування змін екосистем під впливом антропогенних факторів [24, 28].

Підсумовуючи, історія розвитку методів типізації в науках про Землю характеризується переходом від простих описових класифікацій до складних науково обґрунтованих систем, що використовують кількісні методи, сучасні технології та міждисциплінарні підходи. Кожна галузь пройшла свій унікальний шлях розвитку, проте спостерігається загальна тенденція до підвищення об'єктивності, точності та деталізації типізації з метою глибшого розуміння складних земних систем та вирішення актуальних наукових і практичних завдань.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТИПІЗАЦІЇ В ОСНОВНИХ ГАЛУЗЯХ НАУК ПРО ЗЕМЛЮ

2.1. Типізація в геології

Сучасна геологія використовує широкий спектр методів типізації для класифікації гірських порід, мінералів, корисних копалин, геологічних формацій та структур.

Літологічна типізація гірських порід: Традиційно базується на морфологічних (текстура, структура, колір), мінералогічних (склад), а також генетичних критеріях (походження – магматичне, осадове, метаморфічне). Сучасні підходи все частіше включають кількісні методи петрографічного аналізу (модальний склад), геохімічні дослідження (вміст головних та мікроелементів, ізотопний склад) та методи дистанційного зондування (спектральні характеристики). Статистичні методи (кластерний аналіз, факторний аналіз) застосовуються для виділення петрологічно однорідних груп порід на великих територіях [5].

Приклад: класифікація магматичних порід за класифікацією IUGS (Міжнародного союзу геологічних наук), що враховує мінеральний склад та текстурні особливості, доповнюється геохімічними діаграмами для визначення їхнього генезису.

Мінералогічна типізація ґрунтується на хімічному складі, кристалічній структурі та фізичних властивостях мінералів. Сучасні методи включають рентгеноструктурний аналіз, електронну мікроскопію, спектроскопічні методи (інфрачервона) для точного визначення мінерального складу та його варіацій. Статистичний аналіз великих баз даних мінералогічних характеристик дозволяє виявляти нові мінеральні асоціації та закономірності їхнього поширення. Прикладом є класифікація

мінералів за спектральними характеристиками, отриманими за допомогою гіперспектральних сенсорів.

Типізація корисних копалин: Залежить від виду корисної копалини та включає класифікацію за мінеральним складом, вмістом цінного компонента, технологічними властивостями (наприклад, збагачуваність руд), умовами залягання (генетичні типи родовищ). Геостатистичні методи використовуються для оцінки запасів та просторового розподілу корисних копалин у родовищах.

Прикладом є класифікація вугільних родовищ за марками, що визначаються петрографічним складом, зольністю, вологістю та виходом летких речовин.

Типізація геологічних формацій та структур: Базується на літологічному складі, стратиграфічній послідовності, умовах утворення та тектонічній будові. ГІС-технології використовуються для картографування та аналізу просторових взаємозв'язків геологічних формацій та структур, а методи структурного аналізу – для їхньої класифікації за морфологічними та кінематичними характеристиками [2].

Приклад: класифікація розломних зон за їхнім типом (скиди, зсуви, насуви) та кінематикою рухів на основі структурних вимірювань та геофізичних даних.

2.2. Типізація в географії.

Географія застосовує методи типізації для класифікації ландшафтів, природних зон, геосистем, типів клімату, водних об'єктів та інших просторово організованих систем і комплексів [43].

Ландшафтна типізація: Традиційно базується на морфологічній структурі (поєднання рельєфу, ґрунтів, рослинності, водних об'єктів), а також на генетичних (геологічна основа, історія розвитку) та функціональних (характер обміну речовиною та енергією) критеріях. Сучасні підходи активно використовують методи дистанційного

зондування високої роздільної здатності для автоматизованого виділення та класифікації ландшафтних одиниць за спектральними та текстурними характеристиками. ГІС-аналіз дозволяє інтегрувати різноманітні шари геопросторових даних для комплексної ландшафтної типізації. Статистичні методи кластеризації застосовуються для виділення однорідних ландшафтних районів на основі багатовимірних наборів екологічних факторів [3].

Приклад: Автоматизована класифікація ландшафтів за даними супутникових знімків з використанням алгоритмів машинного навчання, що враховують спектральні індекси рослинності, вологість ґрунту та морфометричні характеристики рельєфу.

Типізація природних зон: Ґрунтується на кліматичних умовах, типах рослинності та ґрунтів, що визначають загальний характер біологічних та фізико-географічних процесів. Сучасні кліматичні класифікації (наприклад, Кеппена, Алісова) враховують кількісні показники температури та опадів. ГІС-технології використовуються для картографування природних зон на основі кліматичних даних, даних про рослинність та ґрунти [8].

Приклад: Використання ГІС для моделювання та картографування потенційних змін меж природних зон під впливом зміни клімату.

Типізація водних об'єктів: Включає класифікацію річок (за розміром, режимом стоку, характером долини), озер (за походженням, гідрологічним режимом, хімічним складом води), боліт (за типом живлення, рослинності), льодовиків (за морфологією, температурним режимом). Гідрохімічні методи використовуються для типізації вод за їхнім хімічним складом [27].

Приклад: Класифікація річок за індексом біотичного різноманіття, що враховує видовий склад макрзообентосу та відображає екологічний стан водного об'єкта.

Кліматична типізація: Сучасні кліматичні класифікації базуються на кількісних показниках температури, опадів, вологості, циркуляції атмосфери. Статистичні методи (кластерний аналіз) використовуються для виділення кліматично однорідних регіонів на основі багаторічних метеорологічних даних. Методи машинного навчання застосовуються для розпізнавання кліматичних патернів та прогнозування кліматичних змін [13].

Приклад: Класифікація клімату за Köppen-Geiger з використанням оновлених даних та ГІС для створення детальних кліматичних карт.

2.3. Типізація в ґрунтознавстві.

Ґрунтознавство розробляє складні системи класифікації ґрунтів, що враховують їхній генезис, морфологічні ознаки, фізико-хімічні властивості та родючість.

Генетична класифікація ґрунтів: Базується на факторах та процесах ґрунтоутворення. Сучасні підходи враховують вплив клімату, рослинності, материнської породи, рельєфу, віку та діяльності людини.

Приклад: Класифікація ґрунтів за міжнародною системою WRB (World Reference Base for Soil Resources), що ґрунтується на діагностичних горизонтах та властивостях ґрунтового профілю, відображаючи основні процеси ґрунтоутворення. Всесвітня база даних (World Reference Base, WRB) — міжнародна система класифікації ґрунтів. Він був розроблений для будь-якого ґрунту в світі. WRB базується на Легенді (ФАО-Юнеско, 1974) та Переглянутій легенді (ФАО, 1988) ґрунтової карти світу (ФАО-Юнеско, 1971-1981). WRB виник з ініціативи Продовольчої та сільськогосподарської організації Об'єднаних Націй (ФАО) та Організації Об'єднаних Націй з питань освіти, науки та культури (ЮНЕСКО) за підтримки Програми ООН з охорони довкілля (ЮНЕП) та Міжнародного союзу ґрунтознавства (IUSS).

Морфологічна класифікація ґрунтів: Ґрунтується на описі та кількісних вимірюваннях характеристик ґрунтового профілю (потужність горизонтів, колір, структура, текстура, включення) [24].

Приклад: Визначення типу ґрунту за польовим морфологічним описом ґрунтового розрізу відповідно до національних класифікацій.

Класифікація ґрунтів за фізико-хімічними властивостями: Враховує гранулометричний склад, вміст органічної речовини, реакцію ґрунтового середовища (pH), ємність катіонного обміну, вміст поживних елементів. Статистичні методи використовуються для виділення груп ґрунтів зі схожими агрохімічними характеристиками [33].

Приклад: Кластеризація ґрунтів сільськогосподарських угідь за комплексом агрохімічних показників для оптимізації внесення добрив.

Класифікація ґрунтів за родючістю та придатністю для використання: Базується на комплексі ґрунтових властивостей, що визначають їхню здатність забезпечувати ріст і розвиток рослин. Методи включають бонітування ґрунтів та оцінку їхньої екологічної стійкості.

2.4. Типізація в гідрології.

Гідрологія займається класифікацією водних об'єктів та гідрологічних процесів.

Типізація річок: За розміром басейну, режимом стоку (дощовий, сніговий, льодовиковий, змішаний), характером русла (гірські, рівнинні, меандруючі), хімічним складом води. Статистичний аналіз багаторічних даних про витрати води використовується для визначення гідрологічних режимів.

Приклад: Класифікація річок України за водністю та характером живлення.

Типізація озер: За походженням (тектонічні, льодовикові, карстові), гідрологічним режимом (стічні, безстічні), мінералізацією води (прісні, солоні), трофічним станом (оліготрофні, мезотрофні, евтрофні).

Гідрохімічні та гідробіологічні методи використовуються для визначення трофічного стану. Приклад: Класифікація озер за індексом трофічного стану Карлсона на основі вмісту хлорофілу, прозорості та загального фосфору.

Типізація боліт: За типом живлення (верхові, низинні, перехідні), характером рослинності. Методи дистанційного зондування використовуються для картографування та класифікації боліт за спектральними ознаками рослинності та вологістю поверхні. Приклад: Класифікація боліт за домінуючими видами рослинності та рівнем ґрунтових вод на основі дешифрування аерокосмічних знімків.

Типізація підземних вод за умовами залягання (водоносні горизонти, міжпластові води), хімічним складом, температурою, дебітом. Гідрохімічні методи використовуються для визначення типу підземних вод за їхнім іонним складом.

2.5. Типізація в метеорології та кліматології.

Ці галузі наук про Землю займаються класифікацією кліматів, атмосферних процесів та погодних явищ.

Кліматична типізація: Включає вже згадані класифікації Кеппена, та інші, що базуються на статистичному аналізі багаторічних метеорологічних даних. Сучасні підходи використовують ГІС для просторової візуалізації кліматичних типів та методи машинного навчання для виявлення складних кліматичних патернів [13].

Приклад: Аналіз змін меж кліматичних зон на території України за останні десятиліття з використанням ГІС та кліматичних моделей.

Типізація атмосферних процесів: Класифікація циклонів, антициклонів, атмосферних фронтів за їхніми морфологічними характеристиками, траєкторіями руху, впливом на погоду. Синоптичні карти та метеорологічні супутники є основними джерелами інформації.

Приклад: Класифікація циклонів за їхньою інтенсивністю та траєкторією руху для прогнозування небезпечних погодних явищ.

Типізація погодних явищ: Класифікація опадів (дощ, сніг, град), вітрів (за швидкістю та напрямком), туманів, гроз тощо. Метеорологічні радари та супутники використовуються для їхнього виявлення та класифікації. Методи машинного навчання застосовуються для автоматизованого розпізнавання та прогнозування небезпечних погодних явищ. Приклад: Розробка алгоритмів машинного навчання для автоматичного розпізнавання типу опадів за даними метеорологічних радарів [17].

2.6. Типізація в екології та охороні навколишнього середовища.

Екологія використовує типізацію для класифікації екосистем, біотопів, видів живих організмів та екологічних процесів.

Типізація екосистем: Базується на структурі (абіотичні та біотичні компоненти), функціонуванні (потоки енергії та речовини), видовому складі та трофічних зв'язках. Класифікації можуть бути флористичними, фауністичними, біотопічними або комбінованими. Методи дистанційного зондування використовуються для картографування та класифікації екосистем за рослинним покривом. Приклад: Класифікація лісових екосистем за домінуючими породами дерев, ярусністю та індикаторами екологічного стану.

Типізація біотопів: Ґрунтується на абіотичних факторах середовища (геологічна основа, рельєф, клімат, гідрологічний режим, ґрунти), що визначають умови існування певних угруповань організмів. Приклад: Класифікація лукових біотопів за вологістю ґрунту, флористичним складом та режимом використання [32].

Типізація видів живих організмів: Здійснюється за таксономічною ієрархією (царство, тип/відділ, клас, ряд/порядок, родина, рід, вид), а також за екологічними характеристиками (трофічний рівень, спосіб

життя, адаптації). Типізація екологічних процесів: Класифікація забруднення (за джерелом, характером, масштабом), деградації земель (за типом, інтенсивністю), природних небезпек (за генезисом, масштабом впливу).

Аналіз сучасних методів типізації в різних галузях наук про Землю демонструє їхню різноманітність та постійний розвиток під впливом нових технологій та теоретичних підходів.

РОЗДІЛ 3.

ОЦІНКА ОБ'ЄКТИВНОСТІ, ТОЧНОСТІ, ДОСТОВІРНОСТІ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ТИПІЗАЦІЇ

Оцінка якості методів типізації є критично важливим етапом дослідження. Три ключові аспекти, що підлягають аналізу, – це об'єктивність, точність та достовірність отриманих результатів.

Об'єктивність. Об'єктивність методу типізації визначається ступенем його незалежності від суб'єктивних суджень дослідника. Методи, що базуються на чітких кількісних критеріях та формалізованих алгоритмах, є більш об'єктивними.

Висока об'єктивність: Кількісні (статистичні) методи, геохімічні методи (за умови стандартизованих процедур аналізу), ГІС-орієнтовані методи (при використанні чітких алгоритмів класифікації), методи машинного навчання (при наявності репрезентативних навчальних даних та об'єктивних метрик оцінки).

Середня об'єктивність: Морфологічні методи (залежить від чіткості визначення діагностичних ознак та рівня стандартизації описів), функціональні методи (складність кількісної оцінки функціональних характеристик).

Низька об'єктивність: Якісні (описові) методи (значний вплив експертної оцінки та суб'єктивного сприйняття). Генетичні методи можуть мати елементи суб'єктивності в інтерпретації генетичних зв'язків [10].

Підвищення об'єктивності досягається шляхом: використання кількісних критеріїв типізації; застосування стандартизованих процедур збору та обробки даних; залучення незалежних експертів для верифікації результатів; використання статистичних методів для оцінки узгодженості між різними дослідниками.

Точність. Точність методу типізації відображає ступінь відповідності виділених типів реальним відмінностям між об'єктами.

Висока точність означає, що об'єкти, віднесені до одного типу, є дійсно схожими за визначеними критеріями, а об'єкти, віднесені до різних типів, суттєво відрізняються.

Оцінка точності: Для кількісних методів точність може оцінюватися за допомогою статистичних метрик (наприклад, відсоток правильно класифікованих об'єктів, матриця помилок, F1-міра для методів машинного навчання). Для якісних методів оцінка точності є складнішою і може включати порівняння з результатами, отриманими більш об'єктивними методами, або експертну оцінку [10].

Фактори, що впливають на точність: вибір релевантних та інформативних критеріїв типізації; якість та повнота вихідних даних; адекватність застосованого методу до природи досліджуваних об'єктів; оптимізація параметрів алгоритмів (для статистичних методів та методів машинного навчання) [14].

Достовірність. Достовірність методу типізації характеризує ступінь впевненості в тому, що отримані результати є стабільними та відтворюваними при повторному застосуванні методу до аналогічних даних або іншими дослідниками: для кількісних методів достовірність може оцінюватися за допомогою методів перехресної перевірки (cross-validation), бутстрепа (bootstrap), а також шляхом порівняння результатів, отриманих на незалежних наборах даних. Для якісних методів важливим є чітке документування процедури типізації та критеріїв, що використовуються, для забезпечення можливості відтворення результатів [11].

Фактори, що впливають на достовірність: розмір та репрезентативність вибірки даних; стабільність виділених типів при незначних змінах вхідних даних або параметрів методу, чіткість та однозначність визначення критеріїв типізації; прозорість та зрозумілість алгоритму типізації.

Масштабність та просторова варіативність є ключовими аспектами, які необхідно враховувати при виборі та застосуванні методів типізації в науках про Землю.

Масштабність: Методи типізації можуть застосовуватися на різних просторових масштабах – від локального (наприклад, типізація ґрунтів на окремому полі) до глобального (наприклад, кліматична типізація Землі). Ефективність певного методу може залежати від масштабу дослідження [14].

Великі масштаби: Методи дистанційного зондування та ГІС-орієнтовані підходи є особливо цінними для типізації на великих територіях, оскільки забезпечують охоплення та можливість автоматизованої обробки даних. Однак деталізація та точність типізації можуть бути обмежені роздільною здатністю даних.

Середні та дрібні масштаби: Традиційні морфологічні, генетичні та геохімічні методи, що потребують польових досліджень та лабораторних аналізів, є більш інформативними на цих масштабах, але їхнє застосування на великих територіях може бути трудомістким та дорогим.

Мультимасштабний підхід: Часто оптимальним є комбінування методів, що працюють на різних просторових масштабах, для отримання більш повного та детального розуміння досліджуваних об'єктів.

Просторова варіативність: Природні об'єкти та процеси характеризуються значною просторовою неоднорідністю. Методи типізації повинні враховувати цю варіативність для коректного виділення однорідних типів [11].

Просторовий аналіз: ГІС-технології надають потужні інструменти для аналізу просторової варіативності, виявлення просторових закономірностей та проведення просторової типізації (наприклад, кластерний аналіз з урахуванням просторової близькості).

Геостатистика: Методи геостатистики (наприклад, кригінг) дозволяють враховувати просторову автокореляцію при інтерполяції даних та типізації територій на основі просторово розподілених змінних [19].

Сегментація зображень: У дистанційному зондуванні використовуються алгоритми сегментації для виділення просторово зв'язаних груп пікселів зі схожими спектральними характеристиками, що відповідають певним типам земної поверхні.

Врахування масштабності та просторової варіативності є важливим для вибору адекватних методів типізації, інтерпретації отриманих результатів та їхнього застосування для вирішення конкретних наукових і практичних завдань у науках про Землю. Подальші розділи роботи будуть ілюструвати, як ці аспекти враховуються при застосуванні різних методів типізації в конкретних галузях.

Перспективи розвитку методів типізації в науках про Землю.

Сучасні науки про Землю переживають епоху безпрецедентного зростання обсягів даних, зумовленого розвитком сенсорних технологій, дистанційного зондування, моделювання та краудсорсингу. У цьому контексті методи типізації відіграють ключову роль у перетворенні сирих даних на корисну інформацію та знання. Цей розділ магістерської роботи присвячений розгляду перспективних напрямків розвитку методів типізації в науках про Землю з урахуванням сучасних технологічних тенденцій та актуальних наукових завдань [17].

Вплив сучасних технологій (Big Data, AI, ML, Cloud Computing). Big Data: Величезні обсяги різномірних геопросторових та часових даних (супутникові знімки, дані метеостанцій, геологічні бази даних, дані сенсорів IoT тощо) створюють нові виклики та можливості для типізації. Методи обробки та аналізу Big Data, такі як розподілені обчислення та

паралельні алгоритми, стають необхідними для ефективної типізації складних земних систем [4].

Перспективи: Розробка нових методів типізації, здатних ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та будувати більш детальні та динамічні класифікації.

Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML): Алгоритми машинного навчання, особливо глибокого навчання, демонструють високу ефективність у задачах класифікації та кластеризації складних даних, включаючи зображення дистанційного зондування, геофізичні поля, часові ряди гідрометеорологічних спостережень [7, 10].

Автоматизована типізація: Розробка інтелектуальних систем, здатних автоматично виявляти та класифікувати природні об'єкти та процеси з високою точністю та швидкістю.

Виявлення складних закономірностей: Застосування ML для виявлення нелінійних залежностей та складних взаємозв'язків між різними факторами, що визначають типи природних об'єктів [4].

Адаптивна типізація: Розробка методів, здатних адаптувати критерії та алгоритми типізації до різних регіонів, масштабів та завдань.

Прогнозування змін: Використання ML для типізації динаміки природних процесів та прогнозування змін у виділених типах під впливом природних та антропогенних факторів [4].

Хмарні обчислення (Cloud Computing): Надання потужних обчислювальних ресурсів та платформ для зберігання та обробки великих обсягів даних робить складні методи типізації більш доступними для широкого кола дослідників [7].

Перспективи: Розробка хмарних сервісів та інструментів для типізації геопросторових даних, що спрощують доступ до даних, алгоритмів та обчислювальних ресурсів.

Інтеграція різних методів типізації, Сучасні дослідження все частіше наголошують на необхідності інтеграції різних методів типізації для отримання більш комплексних та надійних результатів. Комбінування методів, що базуються на різних теоретичних засадах та використовують різні типи даних, дозволяє компенсувати недоліки окремих підходів та отримати більш повне уявлення про досліджувані об'єкти.

Приклади можливих інтеграції - комбінування морфологічних та геохімічних методів при типізації гірських порід.

Інтеграція даних дистанційного зондування з польовими спостереженнями та ГІС-аналізом при ландшафтній типізації. Використання методів машинного навчання для аналізу багатовимірних наборів даних, що включають фізичні, хімічні та біологічні характеристики при типізації водних об'єктів або ґрунтів [27].

Перспективи: Розробка нових методологічних підходів, що забезпечують ефективну інтеграцію різних методів типізації, включаючи методи злиття даних (data fusion), мультисенсорний аналіз та гібридні алгоритми класифікації.

Розвиток методів типізації має важливе значення для вирішення ключових проблем у науках про Землю, таких як: Моніторинг та прогнозування змін клімату: Типізація кліматичних зон, атмосферних процесів та їхніх змін з використанням методів машинного навчання та аналізу великих кліматичних даних.

Оцінка та управління природними ризиками: Типізація зон підвищеної небезпеки (наприклад, селевих потоків, зсувів, повеней, лісових пожеж) на основі аналізу геоморфологічних, гідрометеорологічних та інших факторів з використанням ГІС та методів просторового моделювання.

Збереження біорізноманіття: Типізація екосистем та біотопів з використанням даних дистанційного зондування та методів екологічного

моделювання для визначення природоохоронних територій та розробки стратегій збереження.

Управління природними ресурсами: Типізація ґрунтів за родючістю, водних ресурсів за якістю та доступністю, лісових масивів за продуктивністю з використанням методів геостатистики та економічного моделювання для сталого управління [34].

Міське планування та інфраструктура: Типізація міських ландшафтів, геологічних умов забудови, ризиків природних та техногенних катастроф з використанням ГІС та методів просторового аналізу для прийняття обґрунтованих рішень у сфері міського розвитку.

Незважаючи на значний прогрес, розвиток методів типізації в науках про Землю стикається з певними проблемами та викликами:

Ефективність методів типізації значною мірою залежить від якості, просторової та часової роздільної здатності, а також доступності вихідних даних [17].

Інтерпретованість результатів: Деякі складні методи (наприклад, глибоке навчання) можуть давати високу точність класифікації, але їхні результати буває складно інтерпретувати з точки зору фізичних або екологічних процесів [22].

Масштабна залежність: Оптимальні критерії та методи типізації можуть змінюватися залежно від масштабу дослідження.

Об'єктивність та верифікація: Забезпечення об'єктивності та розробка надійних методів верифікації результатів типізації залишаються важливими завданнями.

Інтеграція різномірних даних: Розробка ефективних методів інтеграції даних різних типів, форматів та просторової роздільної здатності є складним науково-технічним завданням.

Розробка стандартів та протоколів: Необхідність розробки загальноприйнятих стандартів та протоколів для застосування різних методів типізації та обміну отриманими результатами.

Перспективи розвитку методів типізації в науках про Землю є надзвичайно широкими та пов'язані з бурхливим розвитком інформаційних технологій. Інтеграція Big Data, AI, ML та хмарних обчислень відкриває нові можливості для більш точної, автоматизованої та комплексної типізації складних земних систем. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку нових методів, вирішення існуючих проблем та ефективне застосування досягнень у сфері типізації для вирішення актуальних наукових та практичних завдань у науках про Землю.

Розвиток методів типізації відкриває нові можливості для розв'язання нагальних проблем у різних галузях наук про Землю:

Моніторинг та прогнозування змін клімату. Застосування ML: Алгоритми машинного навчання використовуються для типізації кліматичних патернів на основі великих масивів метеорологічних даних та даних кліматичних моделей. Це дозволяє виявляти тонкі зміни в кліматичних режимах, класифікувати екстремальні погодні явища та прогнозувати їхню частоту та інтенсивність. Наприклад, методи кластеризації можуть виявляти нові типи аномальних температурних режимів, а алгоритми класифікації – автоматично розпізнавати типи хмарності за супутниковими знімками, що є важливим для моделювання радіаційного балансу Землі [7].

Комбінування даних дистанційного зондування (температура поверхні, альbedo), наземних спостережень та модельних результатів для більш комплексної типізації кліматичних умов та їхньої динаміки.

Оцінка та управління природними ризиками. Аналіз геопросторових даних (рельєф, геологія, гідрологія, рослинність) з використанням методів машинного навчання дозволяє виділяти зони з підвищеним ризиком виникнення небезпечних природних явищ, таких як зсуви, повені, селі та лісові пожежі. Наприклад, алгоритми класифікації можуть ідентифікувати типи ландшафтів, найбільш схильних до зсувів, на

основі аналізу морфометричних характеристик рельєфу та геологічної будови [1].

Часова типізація подій: Аналіз часових рядів даних про природні явища (інтенсивність опадів, рівень води, температура повітря) для виявлення типових сценаріїв розвитку небезпечних ситуацій та прогнозування їхнього настання.

Збереження біорізноманіття:

Автоматизована типізація екосистем за даними ДЗЗ та ML: Класифікація типів рослинного покриву, виділення біотопів та оцінка стану екосистем на основі спектральних характеристик супутникових знімків та алгоритмів машинного навчання. Це дозволяє здійснювати швидкий та масштабний моніторинг біорізноманіття та виявляти території, що потребують особливої охорони. Наприклад, методи сегментації зображень та класифікації об'єктів можуть автоматично виділяти та класифікувати різні типи лісів за їхнім видовим складом та віковою структурою [32].

Типізація екологічних факторів: Аналіз кліматичних, гідрологічних та ґрунтових даних для виділення типових екологічних ніш та оцінки їхньої придатності для різних видів [32].

Управління природними ресурсами/ Типізація ґрунтів за агрономічними властивостями з використанням геостатистики та ML: Прогнозування розподілу різних типів ґрунтів та їхніх властивостей (родючість, вміст органічної речовини) на основі аналізу даних ґрунтових обстежень та дистанційного зондування з використанням геостатистичних методів та алгоритмів машинного навчання. Це дозволяє оптимізувати використання земельних ресурсів та планувати сільськогосподарську діяльність.

Типізація водних ресурсів за якістю та вразливістю: Класифікація водних об'єктів за хімічним складом, рівнем забруднення та стійкістю до

антропогенного впливу на основі аналізу гідрохімічних даних та методів кластерного аналізу.

Міське планування та інфраструктура. Типізація міських ландшафтів за функціональним призначенням та екологічним станом за даними ДЗЗ та ГІС: Автоматизоване виділення та класифікація різних типів міської забудови, зелених насаджень, транспортної інфраструктури на основі аналізу аерокосмічних знімків високої роздільної здатності та ГІС-даних. Це дозволяє здійснювати моніторинг міського розвитку, оцінювати екологічний стан міських територій та планувати інфраструктуру [23].

Типізація геологічних умов для будівництва: Аналіз інженерно-геологічних даних для виділення територій з різними типами ґрунтів та геологічних структур, що є важливим для безпечного будівництва.

Незважаючи на значний потенціал нових методів типізації, існують певні проблеми та виклики, які необхідно враховувати для їхнього ефективного розвитку та застосування:

Недостатність та якість даних: У багатьох випадках якість та доступність даних залишаються суттєвим обмеженням для застосування складних методів типізації, особливо в регіональному та глобальному масштабах. Необхідні узгоджені стандарти збору, зберігання та обміну даними.

Інтерпретованість "чорної скриньки" алгоритмів ML: Деякі алгоритми машинного навчання, особливо глибокі нейронні мережі, можуть демонструвати високу точність класифікації, але складність їхньої внутрішньої роботи ускладнює інтерпретацію отриманих результатів з точки зору фізичних або екологічних процесів. Важливим є розвиток методів пояснювального штучного інтелекту (Explainable AI, XAI) для підвищення прозорості та довіри до результатів типізації, отриманих за допомогою ML [7].

Масштабна залежність та узагальнення: Методи типізації, ефективні на одному просторовому або часовому масштабі, можуть бути менш придатними для інших масштабів. Забезпечення узгодженості результатів типізації на різних рівнях узагальнення залишається складним завданням.

Об'єктивність вибору критеріїв та параметрів: Навіть у кількісних методах вибір найбільш інформативних критеріїв типізації та налаштування параметрів алгоритмів може мати певний елемент суб'єктивності. Необхідні об'єктивні підходи до вибору та валідації критеріїв типізації [37].

Верифікація та оцінка точності: Розробка надійних методів верифікації та оцінки точності результатів типізації, особливо для нових складних методів, є важливим завданням для забезпечення їхньої достовірності та практичної цінності.

Інтеграція різнорідних даних: Ефективна інтеграція даних різних типів (векторні, растрові, табличні, текстові), що мають різну просторову та часову роздільну здатність, залишається складним технічним та методологічним викликом.

Розробка спеціалізованих інструментів та програмного забезпечення: Для широкого застосування нових методів типізації необхідна розробка зручних та ефективних інструментів та програмного забезпечення, що враховують специфіку наук про Землю.

Підготовка кваліфікованих кадрів: Застосування сучасних методів типізації вимагає від дослідників володіння знаннями в галузі інформаційних технологій, статистики та машинного навчання, а також глибокого розуміння предметної області наук про Землю. Необхідна підготовка кваліфікованих фахівців, здатних розробляти та застосовувати ці методи.

Подолання цих проблем та викликів вимагає міждисциплінарних зусиль, розвитку нових теоретичних підходів, розробки інноваційних

технологій та підготовки висококваліфікованих фахівців. Успішний розвиток методів типізації матиме вирішальне значення для подальшого прогресу в розумінні складних земних систем та вирішенні актуальних проблем сталого розвитку.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження методів типізації в науках про Землю дозволило систематизувати, проаналізувати та оцінити сучасний стан, застосування та перспективи розвитку цього фундаментального наукового підходу.

Аналіз історії розвитку методів типізації показав еволюцію від простих описових класифікацій до складних науково обґрунтованих систем, що відображають прогрес у розумінні природних процесів та впровадження нових технологій. Кожна галузь наук про Землю (геологія, географія, ґрунтознавство, гідрологія, метеорологія та кліматологія, екологія) пройшла свій шлях розвитку методів типізації, адаптуючи їх до специфіки досліджуваних об'єктів та завдань.

Порівняльний аналіз методів типізації дозволив оцінити ступінь їхньої об'єктивності, точності та достовірності. Кількісні методи, геохімічні підходи, ГІС-орієнтована типізація та методи машинного навчання продемонстрували вищий рівень об'єктивності порівняно з якісними (описовими) методами. Точність та достовірність методів залежать від якості вихідних даних, адекватності обраного підходу та ретельності його застосування. Розгляд питань масштабності та просторової варіативності підкреслив необхідність вибору методів, що відповідають просторовим характеристикам досліджуваних об'єктів та завданню дослідження.

Водночас дослідження виявило низку проблем та викликів, що стоять на шляху подальшого розвитку методів типізації. До них належать питання якості та доступності даних, інтерпретованості складних алгоритмів машинного навчання, масштабності та узагальнення результатів, об'єктивності вибору критеріїв та параметрів, верифікації та оцінки точності, інтеграції різнорідних даних, розробки спеціалізованого програмного забезпечення та підготовки кваліфікованих кадрів.

Таким чином, можна зробити такі узагальнюючі **висновки**:

1. Типізація є фундаментальним методом дослідження в науках про Землю, що забезпечує систематизацію знань та сприяє вирішенню широкого кола наукових і практичних завдань.
2. Історія розвитку методів типізації відображає еволюцію наукового пізнання та впровадження нових технологій у кожній галузі наук про Землю.
3. Сучасні методи типізації є різноманітними та можуть бути класифіковані за теоретичними засадами та методами обробки даних. Кожен метод має свої переваги та недоліки.
4. Інтеграція традиційних та новітніх методів, особливо з використанням ГІС та машинного навчання, значно розширює можливості типізації та дозволяє отримувати більш об'єктивні, точні та комплексні результати.
5. Розвиток методів типізації відіграє ключову роль у вирішенні актуальних проблем, пов'язаних зі зміною клімату, природними ризиками, збереженням біорізноманіття та управлінням природними ресурсами.
6. Подальший розвиток методів типізації вимагає подолання низки проблем та викликів, пов'язаних з якістю даних, інтерпретованістю алгоритмів, масштабованістю, об'єктивністю, верифікацією та інтеграцією різноманітних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arkkelin, D. (2014). Using SPSS to understand research and data analysis.
https://scholar.valpo.edu/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/psych_oer/article/1000/&path_info=Using_SPSS_to_Understand_Research_and_Data_Analysis____revised.pdf
2. Bezabih, T. D., Glaety, M. G., Wako, D. A., & Worku, S. G. (2024). Geospatial Data Analysis: A Comprehensive Overview of Python Libraries and Implications. Ethics, Machine Learning, and Python in Geospatial Analysis, 72-93. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6381-2.ch004>
3. Couclelis, H. (1986). Artificial intelligence in geography: Conjectures on the shape of things to come. The professional geographer, 38(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1986.00001.x>
4. Credit, K. Introduction to the special issue on spatial machine learning. J Geogr Syst (2024). <https://doi.org/10.1007/s10109-024-00452-1>
5. Davydov, O. V., & Buynevich, I. V. (2023). Recent morphodynamics and closure implications of a non-tidal inlet: Lazurnenska prorva, Black Sea coast, Ukraine. Sci. Bull. Kherson State Univ. Geogr. Sci, 18, 41-48.
<https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2023-18-5>
6. Davydov, O. V., Buynevich, I. V., & Shvets, O. M. (2025). New storm breaches in the context of non-tidal inlet dynamics: Storm Bettina (2023), Black Sea coast, Ukraine. Journal of Coastal Research, 113(SI), 1031-1035.
<https://doi.org/10.2112/JCR-SI113-202.1>
7. Dhruv, Patel, and Subham Naskar. "Image classification using convolutional neural network (CNN) and recurrent neural network (RNN): A review." Machine learning and information processing: proceedings of ICMLIP 2019 (2020): 367-381.
https://www.researchgate.net/publication/340111486_Image_Classification_U

[sing Convolutional Neural Network CNN and Recurrent Neural Network RNN A Review](#)

8. Eldridge, S. M., Ukoumunne, O. C., & Carlin, J. B. (2009). The intra-cluster correlation coefficient in cluster randomized trials: a review of definitions. *International Statistical Review*, 77(3), 378-394.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2009.00092.x>
9. Freeman, A. (1992). SAR calibration: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(6), 1107-1121.
<https://doi.org/10.1109/36.193786>
10. Griffith, D. A., & Chun, Y. (2022). Some useful details about the Moran coefficient, the Geary ratio, and the join count indices of spatial autocorrelation. *Journal of Spatial Econometrics*, 3(1), 12.
<https://doi.org/10.1007/s43071-022-00031-w>
11. Hodson, T. O. (2022). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
12. Janowicz, K., Gao, S., McKenzie, G., Hu, Y., & Bhaduri, B. (2019). GeoAI: spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(4), 625–636.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1684500>
13. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
14. Likas, A., Vlassis, N., & Verbeek, J. J. (2003). The global k-means clustering algorithm. *Pattern recognition*, 36(2), 451-461.
[https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00060-2)
15. Malchykova, D., & Pylypenko, I. (2023). War-Torn Territories and Society: Migration Processes, Cases, Contexts of Ukraine. *Europa XXI*, 45, 21-36. <https://doi.org/10.7163/Eu21.2023.45.6>

16. Malchykova, D., Pylypenko, I., & Shelukhina, O. (2018). SPATIAL ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL AND AMELIORATIVE FACTORS OF RURAL AREA DEVELOPMENT. In 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018 (pp. 889-896). <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.2/S20.115>
17. Molikeych, R. (2015). Some aspects of interconnection socio-economic development and medical and demographic situation in Kherson region. *Chasopys sotsialno-ekonomichnoi geografii*. Kharkiv: KhNU imeni VN Karazina, 19(2), 172-180. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2015-19-29>
18. Molikeych, R.S. (2023). Analysis of the Consequences of Military Operations: Integration of Spectral Indices and Remote Sensing to Assess Affected Areas. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 23(2.1), 277-282. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s10.35>
19. Molikeych, R.S.(2023) Changes in migration preferences of Ukrainians during the Russo-Ukrainian war. *Odessa National University Herald Geography & Geology*, 2(43), 49-64. <http://visgeo.onu.edu.ua/article/view/292735>
20. Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2012). GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 31, 124-130. https://www.researchgate.net/publication/257549933_GRASS_GIS_a_multi-purpose_open_source_GIS
21. Palekha, Yu. M., Malchykova, D. S., Antonenko, N. V., & Pylypenko, I. O. (2023). Approaches to the Territorial Communities' Typification of Ukraine as a Result of the Russian Military Aggression. *Ukrainian Geographical Journal*. (4), 36–43. <https://doi.org/10.15407/ugz2023.04.036>
22. Pylypenko, I., & Malchykova, D. (2023). The Kachovka Reservoir Economic Engine and Theatre of War. *OSTEUROPA*, 73(1-2), 53. <https://zeitschrift-osteuropa.de/site/assets/files/52991/oe230105.pdf>

23. Pylypenko, I., Malchykova, D., Vashchenko, O., Gryniuk, D., & Lozova, L. (2021). GRAPH THEORY IN THE SPATIAL ANALYSIS OF SOCIAL SYSTEMS: METHODOICAL TECHNIQUES OF REGULARITIES SEARCHING. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (pp. 19-26). <https://doi.org/10.5593/sgem2021/2.1/s07.08>
24. Saranenko, I. I. Experience in using strategic analysis tools in determining the efficiency of agricultural Land use. Екологічні науки № 2(47). <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.19>
25. Saranenko, I. I., Tsvetkova, N. N., & Dubina, A. A. (2007). Physicochemical and morphological soils' properties of the technozone of Kremenchuk town. Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology, 15(1), 145-149. <https://doi.org/10.15421/010727>
26. Scott, L.M., Janikas, M.V. (2010). Spatial Statistics in ArcGIS. In: Fischer, M., Getis, A. (eds) Handbook of Applied Spatial Analysis. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7_2
27. Shakhman, I., & Bystriantseva, A. (2021). Spatio-temporal analysis of the ecological state of the Dniester river transboundary water. Journal of Ecological Engineering, 22(9), 119-128. <https://doi.org/10.12911/22998993/141370>
28. Shakhman, I., & Bystriantseva, A. (2021). Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River Basin by complex indices. Journal of Ecological Engineering, 22(1), 195-205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858>
29. Smith, T. R. (1984). Artificial intelligence and its applicability to geographical problem solving. The Professional Geographer, 36(2), 147-158. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1984.00147.x>
30. Syriopoulos, Panos K., et al. "k NN Classification: a review." Annals of Mathematics and Artificial Intelligence (2023): 1-33.

https://www.researchgate.net/publication/373599645_kNN_Classification_a_review

31. Zaiachuk M., Zaiachuk O., Zaiachuk A., 2021. Spatial resource of the territory of the city of Chernivtsi: chronological and choral analysis. Visnyk Kyivskogo nacionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka, Geografiya [Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography], 1/2 (78/79), 26-32 (in Ukrainian, abstr. in English), <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2021.78-79.4>
32. Василюк, О., Куземко, А., & Шаповал, В. (2024). Біотопи долини річки Дніпра до створення та після зникнення Каховського водосховища Вісті Біосферного заповідника «Асканія-Нова», (26), 57-67. <https://doi.org/10.53904/1682-2374/2024-26/4>
33. Дарчук, К. В., Мельник, А. А., Заячук, М. Д., Заячук, О. Г., & Білоконь, М. В. (2024). Розробка картографічних моделей природно-заповідного фонду Чернівецької області. <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/11468>
34. Заячук, М. Д. (1998). Сільськогосподарське природокористування в регіоні. Науковий вісник Чернівецького університету. Географія, 42-51.
35. Заячук, М., Заячук, О., & Заблотовська, Н. (2017). Економіко-математичне моделювання оптимального землекористування у фермерському укладі України. Економічна та соціальна географія, (77), 19-24. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2017.77.19-24>
36. Кирильчук Андрій, Наконечний Юрій. Методологія та організація досліджень в науках про Землю : навчальний посібник. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2021. – 496 с. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/KyrylchukNakonechnyy-Metodolohiia-103-2021-book.pdf>
37. Молікевич, Ю. В. (2024). РОЗСТРІЛЯНІ ШКОЛИ ХЕРСОНА: ПРОСТОРОВИЙ АСПЕКТ ОСВІТНІХ УТРАТ. Науковий вісник

- Херсонського державного університету. Серія «Географічні науки», (21), 13-21. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2024-21-2>
38. Остапенко П.О., Мальчикова Д.С., Пилипенко І.О., Мельничук А.Л., Остапенко С.О. . Проєкт «Геоінформаційний портал Херсонської області»: ініціативи громадянського суспільства з підтримки регіонального розвитку. Укр. геогр. журн. 2023. № 1. С. 54–66. <https://doi.org/10.15407/ugz2023.01.054>
39. Пилипенко І.О. Методи та методики суспільно-географічних досліджень: Навчальний посібник. / І. О. Пилипенко, Д. С. Мальчикова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 156 с
40. Пилипенко І.О. Паліативний підхід до застосування регресійного методу в дослідженнях геосистем типу "центр-периферія" / І. О. Пилипенко, О. Г. Топчієв // Український географічний журнал - 2009. - № 2. - С. 31-37. <https://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000210313>
41. Позняк С. П. Ґрунтознавство і географія ґрунтів : підручник у 2-ох частинах. Ч. 1. Ґрунтознавство / С. П. Позняк. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. 270 с. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/hruntoznnavstvo-ch.1.pdf>
42. Mezentsev, K. V. (2005). *Suspil'no-heohrafichne prohnozuvannya rehional'noho rozvytku: monohrafiya. KV Mezentsev. æ K.: Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr «Kyyivs' kyy universytet.* https://www.geokyiv.org/pdf/Social_Geography.pdf
43. Топчієв, О. Г. (2005). Суспільно-географічні дослідження, методи і методики. ОГ Топчієв. http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/bitstream/123456789/3670/1/2005-Suspilno-geografichni-doslidzhennya-metodologiya-metody-metodyky_compressed.pdf