

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.5>

Received: 26.02.2026
Revised: 18.03.2026
Accepted: 09.04.2026

УДК 004.8:004.65:
004.932

Антоніна ВОЛІВАЧ, Ростислав ВЛАСОВ
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОБРОБКИ ТА ФАКТОРИЗАЦІЇ ДАНИХ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Мета. Проведення порівняльного аналізу існуючих підходів до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах та визначення можливостей застосування алгебраїчної факторизації для аналізу багатовимірних екологічних даних.

Методика. Виконано систематизацію та порівняльний аналіз підходів до обробки геопросторових даних, зокрема методів розподілених обчислень, геометричного моделювання, матричної факторизації, багатовимірного статистичного аналізу, просторово-часових графових нейронних мереж і підходів до інтеграції даних з різних джерел. Оцінювання здійснювалось за критеріями: тип даних, наявність просторової складової, врахування часових залежностей, застосування алгебраїчної факторизації, інтеграція з ГІС, масштабованість, інтерпретованість результатів, обчислювальна складність і придатність до екологічних задач. Розглянуто чотири групи підходів: інфраструктурні та теоретичні методи, методи алгебраїчної факторизації, статистичні методи та інтелектуальні алгоритми, що дозволило оцінити їх ефективність для обробки просторових, просторово-часових і багатовимірних геопросторових даних.

Результати. Встановлено, що нейромережеві моделі забезпечують ефективне врахування складних просторово-часових залежностей, однак характеризуються високою обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю. Показано, що існуючі підходи не забезпечують універсального поєднання методів алгебраїчної факторизації, просторово-часового моделювання та специфіки екологічних геопросторових даних.

Наукова новизна. Систематизовано сучасні підходи до обробки геопросторових даних з позиції застосування алгебраїчної факторизації та визначено невирішені аспекти її інтеграції в екологічні геоінформаційні системи. Обґрунтовано доцільність розробки методів факторизації для багатовимірних даних з урахуванням просторово-часових залежностей.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для створення нових методів алгебраїчної факторизації в екологічних геоінформаційних системах, зокрема моніторингу довкілля, підтримки прийняття рішень та аналізу багатовимірних геопросторових даних.

Ключові слова: алгебраїчна факторизація даних; геоінформаційні системи; просторово-часові дані; системний аналіз; матрична факторизація; порівняльний аналіз.

Вступ. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) широко застосовуються для аналізу просторових даних у різних предметних областях, зокрема екологічному моніторингу, транспортних дослідженнях, управлінні землекористуванням та рекомендаційних сервісах. Постійне збільшення обсягів геопросторових даних, їх багатовимірність і неоднорідність зумовлюють необхідність застосування ефективних підходів до їх обробки та аналізу [1]. Традиційні статистичні методи не завжди забезпечують необхідну масштабованість і точність при роботі з великими масивами геопросторової інформації. Це зумовлює потребу у використанні сучасних підходів, зокрема методів алгебраїчної факторизації, які дозволяють зменшувати розмірність даних та виділяти їх латентну структуру [2–3]. Розв'язання цієї задачі має важливе практичне значення для побудови екологічних ГІС, систем підтримки прийняття рішень та аналізу багатовимірних просторово-часових даних.

Додатково зростає потреба у комплексному аналізі екологічних геопросторових даних, що надходять із різних джерел, включаючи сенсорні мережі, супутникові спостереження та краудсорсингову інформацію. Такі дані характеризуються високою розмірністю, наявністю пропусків, шумом і складними просторово-часовими залежностями. Використання класичних

методів аналізу часто не забезпечує ефективної інтеграції гетерогенних даних у єдину модель. У цьому контексті методи алгебраїчної факторизації забезпечують ефективне зменшення розмірності, виділення латентних факторів та підвищення інтерпретованості результатів. Їх інтеграція з геоінформаційними системами створює нові передумови для розвитку підходів до аналізу екологічних даних. Таким чином, дослідження підходів до обробки даних із використанням алгебраїчної факторизації в контексті геоінформаційних систем є актуальним і доцільним.

Аналіз попередніх досліджень. Однією з ключових проблем геоінформаційних систем є вибір ефективних підходів до обробки та факторизації геопросторових даних, що характеризуються високою розмірністю, гетерогенністю та складними просторово-часовими залежностями. Існуючі методи суттєво відрізняються за рівнем масштабованості, інтерпретованості та здатністю враховувати просторово-часові фактори, що ускладнює їх універсальне застосування та зумовлює необхідність аналізу підходів до обробки геопросторових даних і застосування методів факторизації [1–11].

Аналіз сучасних досліджень показав, що основні напрями обробки геопросторових даних охоплюють широкий спектр підходів від розподілених обчислювальних систем до моделей матричної факторизації з урахуванням просторово-часових залежностей. Зокрема, у роботі [1] запропоновано підхід до обробки великих геопросторових даних на основі розподілених обчислювальних систем і паралельних алгоритмів. Такий підхід забезпечує високу масштабованість, однак не охоплює методи аналітичного моделювання.

У роботі [2] сформульовано теоретичні основи геометричного представлення просторових об'єктів у ГІС, що створює математичне підґрунтя для подальших алгоритмічних досліджень, проте не містить прикладних методів аналізу даних.

У роботах [3–6] розглянуто підходи на основі матричної факторизації для задач аналізу геопросторових даних. Зокрема, модель GeoMF [3] поєднує матричну факторизацію з географічним моделюванням для задач рекомендації точок інтересу, що дозволяє враховувати просторову близькість об'єктів. GeoMF розширено представлено в [4] шляхом інтеграції механізму ранжування, що підвищує якість рекомендацій, однак не враховує часову динаміку. У роботі [5] запропоновано модель LGLMF, яка використовує логістичну матричну факторизацію з урахуванням локальних географічних особливостей, що підвищує точність при роботі з розрідженими даними. Подальший розвиток представлено у [6], де поєднано географічне та часове моделювання на основі матричної факторизації, що дозволяє враховувати просторово-часові залежності, однак модель залишається орієнтованою переважно на задачі рекомендаційних систем.

У роботах [7, 8] досліджено екологічні аспекти аналізу геопросторових даних. Так у [7] запропоновано поєднання індексів забруднення, геоінформаційних систем і багатовимірних статистичних методів для аналізу ґрунтів, що забезпечує інтерпретованість результатів, однак обмежує можливості роботи з великими багатовимірними наборами даних. У роботі [8] представлено застосування часткового канонічного кореляційного аналізу для дослідження просторового розподілу біологічних видів, що дозволяє враховувати взаємозв'язки між екологічними та просторовими факторами, проте не забезпечує виявлення прихованих структур даних.

Моделювання просторово-часових процесів представлено у роботі [9], де застосовано багатовимірну двонаправлену просторово-часову графову нейронну мережу для відновлення транспортних потоків. Такий підхід забезпечує високу точність відтворення складних залежностей, однак характеризується значною обчислювальною складністю та обмеженою інтерпретованістю результатів, що є типовим для класу графових нейронних мереж.

Питання інтеграції різних джерел геопросторових даних розглянуто у працях [10–11]. У роботі [10] узагальнено підходи до використання crowdsourced-даних у задачах

картографування землекористування, що підкреслює потенціал інтеграції даних з різних джерел, однак не містить формалізованих алгоритмічних рішень. У роботі [11] представлено систему візуалізації та рекомендацій у туристичних геоінформаційних системах, яка інтегрує дані з різних джерел та інтелектуальні алгоритми, проте не використовує універсальні підходи алгебраїчної факторизації, що обмежує узагальнення отриманих результатів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, наведені підходи переважно орієнтовані на рекомендаційні системи, статистичні методи для екологічних задач або складні нейромережеві моделі. При цьому недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції методів алгебраїчної факторизації з геоінформаційними системами для аналізу багатовимірних екологічних просторово-часових даних.

Постановка завдання. Сучасні геоінформаційні системи оперують значними обсягами геопросторових даних, що характеризуються високою розмірністю, гетерогенністю та наявністю складних просторово-часових залежностей. Це зумовлює необхідність застосування ефективних методів їх обробки та аналізу, зокрема підходів, що базуються на статистичних моделях, алгоритмах машинного навчання та методах алгебраїчної факторизації.

Водночас існуючі підходи суттєво відрізняються за рівнем масштабованості, інтерпретованістю результатів та здатністю враховувати просторово-часову структуру даних. Методи алгебраїчної факторизації демонструють потенціал для зменшення розмірності даних і виявлення прихованих залежностей, проте їх застосування у геоінформаційних системах залишається обмеженим і переважно орієнтованим на окремі прикладні задачі. Статистичні методи забезпечують високу інтерпретованість, однак не завжди ефективні при роботі з великими багатовимірними наборами даних. Нейромережеві підходи дозволяють моделювати складні залежності, але характеризуються значною обчислювальною складністю.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення системного порівняльного аналізу існуючих підходів до обробки та алгебраїчної факторизації геопросторових даних у геоінформаційних системах з метою визначення їх особливостей, переваг і недоліків, а також оцінювання їх придатності для ефективного аналізу багатовимірних даних.

Результати досліджень. У ході аналізу визначено систему критеріїв до оброблення геопросторових даних у геоінформаційних системах. До основних критеріїв віднесено тип даних, наявність просторової складової, врахування часових залежностей, використання алгебраїчної факторизації, можливість інтеграції з геоінформаційними системами, масштабованість, інтерпретованість результатів, обчислювальну складність та придатність для аналізу екологічних даних [1–11].

Одним із ключових критеріїв є тип даних, оскільки різні методи орієнтовані на обробку різних структур інформації. Частина підходів працює з просторовими даними, інші – просторово-часовими або багатовимірними наборами даних. Важливим аспектом є здатність методів ефективно обробляти великі обсяги інформації, що є характерним для сучасних геоінформаційних систем.

Наступним критерієм є наявність просторової складової. Для геоінформаційних систем це визначальний чинник, оскільки більшість задач пов'язана з аналізом територіального розподілу явищ. При цьому додатково оцінюється можливість врахування часових залежностей, що є важливим для дослідження динаміки змін екологічних та інших просторово розподілених процесів.

Не менш важливим критерієм є рівень інтеграції відповідних підходів із геоінформаційними системами, що визначає можливість їх практичного застосування в реальних інформаційно-аналітичних задачах. Окремим критерієм виступає використання методів алгебраїчної факторизації, які забезпечують зменшення розмірності даних, виявлення прихованих структур та підвищення інтерпретованості результатів аналізу.

Також суттєве значення мають такі характеристики, як масштабованість методів, що відображає їх здатність ефективно обробляти великі обсяги даних, та інтерпретованість результатів, яка визначає зрозумілість отриманих моделей для подальшого аналізу, а також обчислювальна складність алгоритмів, що впливає на можливість їх практичної реалізації у ГІС. Додатково враховується придатність методів для аналізу екологічних даних, які характеризуються високою розмірністю, шумом і неоднорідністю.

Встановлено, що для аналізу геопросторових даних у геоінформаційних системах застосовується широкий спектр методів від класичних статистичних моделей до сучасних алгоритмів машинного навчання та підходів алгебраїчної факторизації. Аналіз наукових досліджень показав різноманітність підходів до обробки просторових, просторово-часових та багатовимірних даних. Результати порівняльного аналізу підходів до обробки та аналізу геопросторових даних [1, 2, 10] наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика підходів до обробки та аналізу
геопросторових даних у ГІС**

Критерій порівняння	Розподілені обчислення [1]	Геометричне моделювання [2]	Аналіз crowdsourced GIS даних [10]
Об'єкт дослідження	Великомасштабні географічні дані	Геометричні моделі в ГІС	Дані землекористування та покриття територій
Предмет аналізу	Паралельна обробка геоданих	Математичні основи просторового аналізу	Краудсорсингові геопросторові дані
Тип дослідження	Обчислювальні методи обробки геоданих	Теоретичні основи геометрії в ГІС	Аналітичний огляд джерел геоданих
Тип методів	Паралельні алгоритми	Аналітичні математичні методи	Методи обробки великих та гетерогенних даних
Масштаб даних	Великі геопросторові набори даних	Теоретичні моделі	Великі гетерогенні набори даних
Використання ГІС	Обробка геопросторових даних	Теоретичне обґрунтування ГІС	Аналіз та картографування
Просторовий аналіз	Так	Так	Так
Часовий аналіз	Частково	Ні	Частково
Тип даних	Великі географічні набори даних	Геометричні структури	Краудсорсингові геодані
Мета дослідження	Підвищення продуктивності обробки	Формалізація геометрії ГІС	Аналіз сучасних джерел геоданих
Переваги	Висока продуктивність	Теоретична фундаментальність	Актуальність та масштабованість даних
Недоліки	Складність реалізації	Відсутність експериментальних даних	Неоднорідність даних
Придатність для екологічних ГІС	Висока	Висока	Дуже висока
Можливість факторизації даних	Частково	Теоретично можлива	Висока

Аналіз підходу до масштабованої обробки великих геопросторових даних на основі розподілених обчислювальних систем зосереджений на застосуванні паралельних алгоритмів, що забезпечують ефективну обробку значних обсягів інформації. Водночас у межах цього підходу не передбачено використання методів факторизації, оскільки основна увага зосереджена на інфраструктурних аспектах обробки даних [1].

Теоретичні підходи до геометричного моделювання даних у ГІС базуються на формалізації просторових об'єктів у вигляді математичних структур та опису їх геометричних властивостей. Такий підхід забезпечує математичний опис просторових даних і формує основу для подальшого моделювання й аналізу в межах геоінформаційних систем. Водночас основну увагу зосереджено на теоретичному представленні об'єктів без розроблення алгоритмічних процедур обробки та методів факторизації, що обмежує його застосування для задач зменшення розмірності й виявлення прихованих структур у геопросторових даних [2].

Підхід до аналізу краудсорсингових геопросторових даних розглядається у контексті використання інформації, що надходить від користувачів, для задач картографування землекористування. Такий підхід дозволяє підвищити актуальність і деталізацію геопросторової інформації за рахунок залучення великої кількості зовнішніх джерел. Водночас для нього характерні неоднорідність даних, варіативність якості та складність узгодження, що знижує надійність подальшого аналізу. Однак зазначений підхід має переважно оглядовий характер і не містить формалізованих алгоритмічних рішень, зокрема методів алгебраїчної факторизації геопросторових даних [10].

Результати аналізу методів алгебраїчної факторизації геопросторових даних [3–6] наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика методів географічної матричної факторизації для рекомендації POI

Критерій порівняння	GeoMF [3]	Rank-GeoFM [4]	LGLMF [5]	Geo-Temporal MF [6]
Тип моделі	Географічна матрична факторизація	Ранжувальна географічна факторизація	Логістична локальна географічна факторизація	Просторово-часова матрична факторизація
Основна ідея	Спільне моделювання користувача та географічних факторів	Оптимізація ранжування рекомендацій POI	Врахування локальних географічних залежностей	Спільне моделювання просторових і часових факторів
Тип вхідних даних	Взаємодії користувач–POI	Неявний зворотний зв'язок	Неявний зворотний зв'язок	Просторово-часові взаємодії
Функція оптимізації	Мінімізація похибки відновлення	Оптимізація ранжування	Логістична функція втрат	Спільна функція втрат
Особливості моделі	Урахування географічної близькості	Орієнтація на порядок рекомендацій	Локальні регіональні залежності	Поєднання простору та часу
Переваги	Простота реалізації	Покращене ранжування	Врахування локальних особливостей	Найбільш повне моделювання
Недоліки	Відсутність часових факторів	Висока складність оптимізації	Обмеження локальністю	Висока обчислювальна складність
Придатність для ГІС	Висока	Висока	Висока	Дуже висока

Група методів, що базуються на алгебраїчній факторизації, переважно представлена підходами, орієнтованими на рекомендаційні системи на основі геопросторових даних [3–6]. Вони відрізняються способом урахування просторових і часових факторів, а також рівнем складності моделювання.

Метод GeoMF [3] поєднує матричну факторизацію з географічним моделюванням і враховує просторову близькість об'єктів. Його основною перевагою є підвищення точності рекомендацій за рахунок врахування географічного контексту, однак відсутність повноцінного часового компонента обмежує застосування для динамічних процесів.

Підхід Rank-GeoFM [4] розширює базову модель за рахунок механізму ранжування, що дозволяє покращити якість впорядкування рекомендацій. Водночас він характеризується підвищеною складністю оптимізації та не враховує часові залежності.

Методи локальної географічної логістичної матричної факторизації [5, 6] враховують локальні просторові залежності та забезпечують ефективну роботу з розрідженими даними, що є типовим для геоінформаційних систем. У роботі [6] додатково враховано часовий фактор, що дозволяє моделювати просторово-часові процеси. Водночас для обох підходів характерні висока обчислювальна складність та орієнтація на рекомендаційні задачі, що обмежує їх застосування в екологічних геоінформаційних системах.

Результати аналізу статистичних методів обробки геопросторових даних [7–8] наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика підходів до аналізу просторових екологічних даних із використанням ГІС та багатовимірної статистики

Критерій порівняння	Екологічне забруднення ґрунтів [7]	Просторовий аналіз біорізноманіття [8]
Об'єкт дослідження	Вміст важких металів у ґрунтах Північного Китаю	Просторовий розподіл видів птахів
Предмет аналізу	Рівні та джерела забруднення	Просторово-екологічні фактори поширення видів
Тип даних	Геохімічні дані ґрунтів	Біогеографічні дані
Використання ГІС	Картографування та аналіз забруднення	Просторовий аналіз поширення видів
Статистичні методи	Багатовимірна статистика, факторний аналіз	Частковий канонічний кореляційний аналіз
Додаткові методи	Індекси забруднення	Канонічний аналіз відповідностей
Просторовий аналіз	Аналіз розподілу концентрацій	Аналіз просторових залежностей
Мета дослідження	Виявлення джерел та рівнів забруднення	Визначення екологічно-просторових взаємозв'язків
Переваги	Висока інтерпретованість результатів	Детальний аналіз просторової структури
Недоліки	Відсутність часової складової	Обмеженість типів аналізованих факторів
Придатність для екологічних ГІС	Висока	Висока
Можливість факторизації даних	Частково	Частково

У роботах екологічного спрямування переважно застосовуються класичні статистичні методи аналізу просторових даних. Зокрема, у дослідженні [7] використано багатовимірні статистичні методи у поєднанні з геоінформаційними системами для аналізу рівнів і просторового розподілу забруднення ґрунтів. Такий підхід забезпечує високу інтерпретованість результатів та дозволяє ідентифікувати джерела забруднення, однак не враховує часову динаміку процесів.

У роботі [8] застосовано частковий канонічний кореляційний аналіз для дослідження просторово-екологічних взаємозв'язків у біогеографічних даних. Метод дозволяє враховувати залежності між екологічними та просторовими факторами, проте обмежується заданими типами змінних і не забезпечує автоматичного виявлення прихованих структур у великих багатовимірних наборах даних.

Загалом розглянуті статистичні підходи характеризуються достатньо високою інтерпретованістю та придатністю для екологічних задач, однак не використовують методи алгебраїчної факторизації, що обмежує їх ефективність при обробці складних багатовимірних геопросторових даних.

Результати аналізу інтелектуальних методів обробки геопросторових даних, зокрема графових нейронних мереж та рекомендаційних алгоритмів [9, 11] наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів аналізу та обробки геопросторових даних на основі інтелектуальних алгоритмів

Критерій порівняння	Просторово-часові графові нейронні мережі [9]	Інтелектуальні рекомендаційні алгоритми з мультиджерельними даними [11]
Об'єкт дослідження	Міський транспортний потік	Туристичні геоінформаційні дані
Предмет аналізу	Відновлення пропущених значень транспортного потоку	Візуалізація та рекомендація туристичних об'єктів
Тип даних	Просторово-часові дані транспортної мережі	Мультиджерельні географічні дані
Використання ГІС	Аналіз транспортної інфраструктури	Візуалізація туристичних ресурсів
Основний метод	Двонаправлена просторово-часова графова нейронна мережа	Інтелектуальні алгоритми рекомендацій
Тип моделі	Spatio-temporal graph neural network	Recommendation system з багатоджерельними даними
Облік просторових залежностей	Так	Так
Облік часових залежностей	Так	Частково
Використання мультиджерельних даних	Частково	Так
Мета дослідження	Заповнення пропущених значень у транспортних даних	Побудова системи рекомендацій для туризму
Переваги	Висока точність прогнозування	Інтеграція різномірних даних
Недоліки	Висока обчислювальна складність	Обмежена формалізація моделі
Придатність для ГІС	Дуже висока	Висока

Розглянуті підходи до аналізу геопросторових даних із використанням методів машинного навчання представлені просторово-часовими графовими нейронними мережами, які дозволяють моделювати складні взаємозв'язки між просторовими та часовими компонентами даних. Зокрема, застосування двонаправленої просторово-часової графової нейронної мережі забезпечує високу точність відновлення транспортних потоків та врахування складних залежностей у даних. Водночас такі моделі характеризуються значною обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю результатів, що обмежує їх практичне застосування у геоінформаційних системах [9].

Підходи до інтеграції геопросторових даних із різних джерел на основі інтелектуальних алгоритмів орієнтовані на поєднання різномірної інформації для підвищення якості аналізу та рекомендацій. Використання таких методів дозволяє об'єднувати просторові дані, однак супроводжується підвищеними вимогами до обчислювальних ресурсів та відсутністю універсальних підходів до алгебраїчної факторизації, що обмежує можливості узагальнення результатів [11].

Проведений аналіз дозволяє виділити основні групи підходів до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах, а саме:

- методи алгебраїчної факторизації [3–6], що переважно застосовуються у рекомендаційних системах;
- статистичні методи аналізу [7, 8], орієнтовані на екологічні дослідження;
- нейромережеві просторово-часові моделі [9, 11], які забезпечують високу точність моделювання складних залежностей;
- теоретичні та інфраструктурні підходи [1, 2, 10], що формують основу обробки геопросторових даних.

Встановлено, що методи алгебраїчної факторизації забезпечують зменшення розмірності даних та виявлення прихованих залежностей, а також характеризуються відносно високою інтерпретованістю результатів. Проте вони, як правило, не повною мірою враховують складні просторово-часові залежності, що обмежує їх застосування для динамічних геопросторових процесів.

Статистичні методи характеризуються високою інтерпретованістю результатів, однак мають обмеження щодо масштабованості та роботи з великими наборами даних. Нейромережеві підходи забезпечують високу точність моделювання складних залежностей, проте характеризуються значною обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю отриманих результатів.

Особливої уваги потребує застосування зазначених підходів у екологічних геоінформаційних системах. Статистичні методи є ефективними для аналізу екологічних показників, однак обмежені при роботі з багатовимірними даними. Натомість методи алгебраїчної факторизації дозволяють формувати компактні представлення даних, що є важливим для задач екологічного моніторингу та аналізу складних систем.

Отже, встановлено, що методи факторизації застосовуються лише в окремих дослідженнях і переважно орієнтовані рекомендаційні системи, тоді як екологічні геоінформаційні системи здебільшого базуються на статистичних підходах. Сучасні методи обробки геопросторових даних характеризуються підвищеною обчислювальною складністю, а універсальні методи алгебраїчної факторизації, адаптовані до аналізу багатовимірних екологічних геопросторових даних, залишаються недостатньо розробленими.

Висновки. Проведений аналіз показав, що розглянуті підходи до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах охоплюють широкий спектр методів від статистичних та інфраструктурних до інтелектуальних моделей машинного навчання. Встановлено, що методи алгебраїчної факторизації застосовуються лише в окремих

дослідженнях і переважно орієнтовані на задачі рекомендаційних систем, тоді як екологічні геоінформаційні системи здебільшого базуються на статистичних підходах.

Водночас більшість методів характеризується підвищеною обчислювальною складністю або недостатньою інтерпретованістю результатів, що обмежує їх практичне використання. Встановлено, що універсальні підходи алгебраїчної факторизації, адаптовані до аналізу багатовимірних просторово-часових екологічних даних.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень, спрямованих на розробку комбінованих методів обробки та факторизації геопросторових даних, що поєднуюватимуть переваги алгебраїчних, статистичних та інтелектуальних підходів і забезпечуватимуть ефективний аналіз у геоінформаційних системах.

References

1. Hawick, K. A., Coddington, P. D., & James H. A. (2003). Distributed frameworks and parallel algorithms for processing large-scale geographic data. *Parallel Computing*, 29(10), 1297–1333.
2. Frank, A. U. (2007). Practical geometry-mathematics for geographic information systems. Script for GIS Theory course at TU Wien. Vienna: TU Wien.
3. Lian, D., Zhao, C., Xie, X., Sun, G., Chen, E., & Rui, Y. (2014). GeoMF: joint geographical modeling and matrix factorization for point-of-interest recommendation. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 831–840). New York: ACM.
4. Li, X., Cong, G., Li, X. L., Pham, T. A. N., & Krishnaswamy, S. (2015). Rank-GeoFM: a ranking based geographical factorization method for point of interest recommendation. *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 433–442). New York: ACM.
5. Rahmani, H. A., Aliannejadi, M., Ahmadian, S., Baratchi, M., Afsharchi, M., & Crestani, F. (2019). LGLMF: local geographical based logistic matrix factorization model for POI recommendation. *Asia Information Retrieval Symposium* (pp. 66–78). Cham: Springer.
6. Rahmani, H. A., Aliannejadi, M., Baratchi, M., & Crestani, F. (2020). Joint geographical and temporal modeling based on matrix factorization for point-of-interest recommendation. *European Conference on Information Retrieval* (pp. 205–219). Cham: Springer.
7. Huang, K., Luo, X., & Zheng, Z. (2018). Application of a combined approach including contamination indexes, geographic information system and multivariate statistical models in levels, distribution and sources study of metals in

Література

1. Hawick K. A., Coddington P. D., James H. A. Distributed frameworks and parallel algorithms for processing large-scale geographic data. *Parallel Computing*. 2003. Vol. 29, No. 10. P. 1297–1333.
2. Frank A. U. Practical geometry-mathematics for geographic information systems. Script for GIS Theory course at TU Wien. Vienna: TU Wien, 2007.
3. Lian D., Zhao C., Xie X., Sun G., Chen E., Rui Y. GeoMF: joint geographical modeling and matrix factorization for point-of-interest recommendation. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York: ACM, 2014. P. 831–840.
4. Li X., Cong G., Li X. L., Pham T. A. N., Krishnaswamy S. Rank-GeoFM: a ranking based geographical factorization method for point of interest recommendation. *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. New York: ACM, 2015. P. 433–442.
5. Rahmani H. A., Aliannejadi M., Ahmadian S., Baratchi M., Afsharchi M., Crestani F. LGLMF: local geographical based logistic matrix factorization model for POI recommendation. *Asia Information Retrieval Symposium*. Cham: Springer, 2019. P. 66–78.
6. Rahmani H. A., Aliannejadi M., Baratchi M., Crestani F. Joint geographical and temporal modeling based on matrix factorization for point-of-interest recommendation. *European Conference on Information Retrieval*. Cham: Springer, 2020. P. 205–219.
7. Huang K., Luo X., Zheng Z. Application of a combined approach including contamination indexes, geographic information system and multivariate statistical models in levels, distribution and sources study of metals in soils

- soils in Northern China. *PLoS ONE*, 13(2), Article e0190906.
8. Titeux, N., Dufrêne, M., Jacob, J. P., Paquay, M., & Defourny, P. (2004). Multivariate analysis of a fine-scale breeding bird atlas using a geographical information system and partial canonical correspondence analysis: environmental and spatial effects. *Journal of Biogeography*, 31(11), 1841–1856.
9. Wang, P., Zhang, T., Zheng, Y., & Hu, T. (2022). A multi-view bidirectional spatiotemporal graph network for urban traffic flow imputation. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(6), 1231–1257.
10. Wu, H., Li, Y., Lin, A., Fan, H., Fan, K., Xie, J., & Luo, W. (2024). A review of crowdsourced geographic information for land-use and land-cover mapping: current progress and challenges. *International Journal of Geographical Information Science*, 38(11), 2183–2215.
11. Han, M. (2025). Tourism geographic information visualization and recommendation system integrating multi-source data with intelligent algorithms. *2025 2nd International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON)* (pp. 1–5). IEEE.
- in Northern China. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13, No. 2. Article e0190906.
8. Titeux N., Dufrêne M., Jacob J. P., Paquay M., Defourny P. Multivariate analysis of a fine-scale breeding bird atlas using a geographical information system and partial canonical correspondence analysis: environmental and spatial effects. *Journal of Biogeography*. 2004. Vol. 31, No. 11. P. 1841–1856.
9. Wang P., Zhang T., Zheng Y., Hu T. A multi-view bidirectional spatiotemporal graph network for urban traffic flow imputation. *International Journal of Geographical Information Science*. 2022. Vol. 36, No. 6. P. 1231–1257.
10. Wu H., Li Y., Lin A., Fan H., Fan K., Xie J., Luo W. A review of crowdsourced geographic information for land-use and land-cover mapping: current progress and challenges. *International Journal of Geographical Information Science*. 2024. Vol. 38, No. 11. P. 2183–2215.
11. Han M. Tourism geographic information visualization and recommendation system integrating multi-source data with intelligent algorithms. *2025 2nd International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON)*. IEEE, 2025. P. 1–5.

VOLIVACH ANTONINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine<https://orcid.org/0000-0002-7119-7774>E-mail: volivach.ap@knuud.com.ua

VLASOV ROSTYSLAV

Graduate Student,
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine<https://orcid.org/0009-0003-1977-5113>E-mail: dunadan48@gmail.com**Antonina VOLIVACH, Rostyslav VLASOV**

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**A STUDY OF APPROACHES TO DATA PROCESSING AND FACTORIZATION
IN GEOINFORMATION SYSTEMS**

Purpose. To conduct a comparative analysis of existing approaches to geospatial data processing in geographic information systems and to determine the potential for applying algebraic factorization to the analysis of multidimensional environmental data.

Methodology. A systematization and comparative analysis of approaches to geospatial data processing was performed, specifically including methods of distributed computing, geometric modeling, matrix factorization, multidimensional statistical analysis, spatio-temporal graph neural networks, and approaches to integrating data from various sources. The evaluation was based on the following criteria: data type, presence of a spatial component, consideration of temporal dependencies, application of algebraic factorization, integration with GIS, scalability, interpretability of results, computational complexity, and suitability for environmental tasks. Four groups of approaches were considered: infrastructural and theoretical methods, algebraic factorization methods, statistical methods, and intelligent algorithms, which

allowed for an assessment of their effectiveness in processing spatial, spatiotemporal, and multidimensional geospatial data.

Findings. It has been established that neural network models effectively account for complex spatiotemporal dependencies but are characterized by high computational complexity and low interpretability. It is shown that existing approaches do not provide a universal combination of methods of algebraic factorization, spatiotemporal modeling, and the specifics of environmental geospatial data.

Originality. Modern approaches to geospatial data processing have been systematized from the perspective of applying algebraic factorization, and unresolved aspects of its integration into environmental geoinformation systems have been identified. The feasibility of developing factorization methods for multidimensional data that account for spatiotemporal dependencies has been substantiated.

Practical value. The results can be used to create new methods of algebraic factorization in environmental geoinformation systems, in particular for environmental monitoring, decision support, and the analysis of multidimensional geospatial data.

Keywords: algebraic data factorization; geographic information systems; spatiotemporal data; system analysis; matrix factorization; comparative analysis.