

Калина Тетяна Євгеніївна доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри геодезії та землеустрою, ПЗВО «Міжнародний класичний університеті імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0002-2705-9382>

Гайша Олександр Олександрович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних технологій, ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0003-3711-547X>

Островський Ігор Петрович доктор технічних наук, професор, професор кафедри геодезії та землеустрою, ПЗВО «Міжнародний класичний університеті імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0001-7867-7132>

Гончарук Олександр Миколайович кандидат біологічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою, ПЗВО «Міжнародний класичний університеті імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0003-4068-8957>

Гайша Олена Олександрівна старший викладач кафедри інженерних технологій, ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0009-0000-4543-912X>

Арамян Армен Мартікович кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інженерних технологій, ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0009-0003-3497-6263>

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ СТИСКАННЯ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ У СТВОРЕННІ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРИТОРІЙ

Анотація. У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти зберігання, обробки та стискання геопросторової інформації, що використовується при формуванні тривимірних моделей територій у геодезичних дослідженнях. Обґрунтовано, що сучасні технології наземного лазерного сканування, супутникових спостережень, аерофотозйомки та безпілотного моніторингу

генерують надзвичайно великі масиви просторових даних, які характеризуються складною внутрішньою структурою, високим рівнем кореляції та багатовимірністю.

Поєднання геометричних координат, атрибутивних характеристик, топологічних зв'язків і часових параметрів зумовлює істотне зростання обсягів інформації, що ускладнює процеси її зберігання, передавання та інтеграції у геоінформаційні системи.

Проаналізовано сучасний стан наукових досліджень у сфері компресії тривимірних геоданих, зокрема підходи, засновані на використанні октадерев, ентропійного кодування, хвильових перетворень, а також методи, що застосовують алгоритми машинного навчання для оптимізації кодування хмар точок та атрибутів. Встановлено, що існуючі рішення або орієнтовані на вузькі типи даних, або характеризуються значною обчислювальною складністю та потребою у спеціалізованих апаратних ресурсах, що обмежує їх застосування у практичних геодезичних задачах.

Запропоновано метод стискання геопросторової інформації, заснований на багаторівневій тензорно-фрактальній декомпозиції. У межах підходу геодані інтерпретуються як багатовимірний тензор, що охоплює просторові координати та сукупність атрибутів.

Метод передбачає виокремлення структурної низькочастотної складової за допомогою тензорної декомпозиції з подальшою фрактальною апроксимацією залишкових високочастотних компонентів, які відображають деталі рельєфу та об'єктів. Завершальним етапом виступає адаптивне ентропійне кодування коефіцієнтів, що забезпечує додаткове зменшення обсягу даних без втрати геометричної точності.

Обґрунтовано переваги запропонованого підходу, серед яких урахування ієрархічної та фрактальної природи природних і антропогенних поверхонь, можливість безвтратного стискання, збереження топологічних взаємозв'язків та масштабованість для великих хмар точок і комплексних 3D-моделей. Окреслено етапи алгоритмічної реалізації та запропоновано концептуальну архітектуру програмного забезпечення, що включає модулі імпорту, попередньої обробки, тензорної декомпозиції, фрактального кодування та ентропійного стискання.

Ключові слова: геопросторова інформація, тензорна декомпозиція, фрактальна апроксимація, багатовимірний тензор, ентропійне кодування, стискання даних, компресія 3D-даних.

Kalyna Tetiana Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Geodesy and Land Management, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0000-0002-2705-9382>

ISSN 2786-6025 Online

Haisha Oleksandr Candidate of Technical Sciences, Docent, Associated Professor of Engineering Technologies Department, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0000-0003-3711-547X>

Ostrovskiy Ihor Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy and Land Management, Pylyp Orlyk International Classical University, <https://orcid.org/0000-0001-7867-7132>

Honcharuk Oleksandr Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management, Pylyp Orlyk International Classical University, <https://orcid.org/0000-0003-4068-8957>

Haisha Olena Senior Lecturer of Engineering Technologies Department, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0009-0000-4543-912X>

Aramyan Armen Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Engineering Technologies Department, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0009-0003-3497-6263>

FEATURES OF GEOSPATIAL INFORMATION COMPRESSION PROCESSES IN THE CREATION OF THREE- DIMENSIONAL TERRAIN MODELS

Abstract. The article examines theoretical and applied aspects of storage, processing, and compression of geospatial information used in the formation of three-dimensional terrain models in geodetic research. It is substantiated that modern technologies of terrestrial laser scanning, satellite observations, aerial photography, and unmanned monitoring generate extremely large volumes of spatial data characterized by complex internal structure, a high level of correlation, and multidimensionality.

The integration of geometric coordinates, attribute characteristics, topological relationships, and temporal parameters leads to a significant increase in data volumes, which complicates their storage, transmission, and integration into geographic information systems.

The current state of scientific research in the field of three-dimensional geodata compression is analyzed, including approaches based on octrees, entropy coding, wavelet transforms, as well as methods employing machine learning algorithms to optimize the encoding of point clouds and attributes. It is established that existing solutions are either focused on specific data types or characterized by considerable

computational complexity and the need for specialized hardware resources, which limits their application in practical geodetic tasks.

A method for geospatial information compression based on multi-level tensor-fractal decomposition is proposed. Within this approach, geodata are interpreted as a multidimensional tensor encompassing spatial coordinates and a set of attributes. The method involves extracting a structural low-frequency component using tensor decomposition, followed by fractal approximation of the residual high-frequency components that represent terrain details and objects. The final stage consists of adaptive entropy coding of the coefficients, ensuring further data size reduction without loss of geometric accuracy.

The advantages of the proposed approach are substantiated, including consideration of the hierarchical and fractal nature of natural and anthropogenic surfaces, the possibility of lossless compression, preservation of topological relationships, and scalability for large point clouds and complex 3D models. The stages of algorithmic implementation are outlined, and a conceptual software architecture is proposed, incorporating modules for data import, preprocessing, tensor decomposition, fractal encoding, and entropy compression.

Keywords: geospatial information, tensor decomposition, fractal approximation, multidimensional tensor, entropy coding, data compression, 3D data compression.

Постановка проблеми. Геопросторова інформація є фундаментальною основою сучасних геодезичних досліджень та прикладних інженерних рішень, оскільки забезпечує формалізоване відображення просторового положення, форми, розмірів і взаємного розташування об'єктів земної поверхні та підземного простору.

У загальному розумінні геопросторова інформація – це сукупність даних про об'єкти та явища, що характеризуються просторовими координатами, атрибутивними властивостями та часовими параметрами, організованих у межах визначених систем координат і висот. У геодезії вона виступає результатом вимірювань, спостережень і оброблення даних, отриманих із використанням наземних, аерофотограмметричних, супутникових та лазерно-сканувальних технологій.

З позиції структури геопросторова інформація поєднує кілька взаємопов'язаних компонентів:

- просторову складову (координати точок, ліній, поверхонь у прийнятій системі координат);
- атрибутивну складову (якісні та кількісні характеристики об'єктів);
- топологічну складову (інформацію про взаємозв'язки та просторові відношення між об'єктами);

ISSN 2786-6025 Online

- метадані (відомості про джерело, точність, метод отримання та час актуалізації даних).

У цифровому середовищі геопросторові дані формуються у вигляді структурованих інформаційних моделей, що можуть бути організовані у векторному, растровому або комбінованому поданні. Векторна модель описує простір через координати дискретних об'єктів (точки, лінії, полігони), тоді як растрова – через регулярну матрицю комірок із закодованими значеннями параметрів.

Для задач тривимірного моделювання особливого значення набувають хмарні моделі точок, цифрові моделі рельєфу (ЦМР), цифрові моделі поверхні (ЦМП), триангуляційні нерегулярні мережі (TIN), а також полігональні та воксельні структури.

Класифікацію геопросторової інформації доцільно розглядати за кількома ознаками.

За способом отримання можна виділити:

- наземні геодезичні вимірювання;
- дані глобальних навігаційних супутникових систем;
- матеріали аерофото- та космічної зйомки;
- результати лазерного сканування (LiDAR);
- комбіновані джерела.

За характером подання:

- векторна;
- растрова;
- матрично-мережева;
- хмари точок та тривимірні сітки.

За розмірністю:

- двовимірна (2D);
- тривимірна (3D);
- чотиривимірна (3D + час як динамічний параметр).

Розвиток геоінформаційних систем і технологій оброблення просторових даних зумовив перехід від традиційного двовимірного картографічного подання до повноцінного тривимірного моделювання територій. Тривимірні моделі територій являють собою цифрові відтворення просторової структури місцевості, що забезпечують геометрично коректне відображення рельєфу, забудови, інженерної інфраструктури, рослинності та інших елементів середовища.

Залежно від рівня деталізації та функціонального призначення тривимірні моделі територій можуть бути:

- цифровими моделями рельєфу, які описують лише земну поверхню без наявних на ній об'єктів;

- цифровими моделями поверхні, які включають рельєф і всі об'єкти на ньому;
- містобудівними 3D-моделями із різним рівнем деталізації будівель (LOD);
- інженерно-геодезичними моделями, що використовуються для проектування та моніторингу споруд;
- інформаційними моделями територій (3D-GIS, цифрові двійники), що інтегрують геометрію та семантичні дані.

Тривимірні моделі територій застосовуються у широкому спектрі завдань: просторове планування та управління розвитком територій, проектування об'єктів будівництва, оцінювання інженерно-геологічних умов, аналіз видимості та інсоляції, моделювання зон затоплення, моніторинг деформацій, управління транспортною та інженерною інфраструктурою. У геодезії вони є інструментом інтеграції результатів вимірювань у єдине цифрове середовище, що забезпечує підвищення точності, наочності та ефективності прийняття рішень.

Водночас створення сучасних тривимірних моделей територій базується на використанні великих масивів високоточної геопросторової інформації. Лазерне сканування формує мільйони, мільярди (і навіть більше) точок; фотограмметричні технології генерують високодеталізовані ортофотоплани та текстуровані сітки; супутникові та безпілотні системи забезпечують багатоспектральні растрові дані значного обсягу. Поєднання геометричних, атрибутивних і топологічних компонентів у межах єдиної інформаційної моделі призводить до суттєвого зростання обсягів зберігання даних і навантаження на обчислювальні ресурси.

Таким чином, виникає проблема ефективного зберігання, передавання та оброблення геопросторової інформації. Значні обсяги даних, що використовуються для побудови тривимірних моделей територій, зумовлюють необхідність розроблення та вдосконалення методів їх структурної організації та стискування без втрати геометричної точності й інформаційної повноти. Саме ці аспекти становлять важливий науково-практичний напрям у геодезичних дослідженнях та визначають актуальність даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи наявні наукові публікації з розглядуваної тематики можна згадати дослідження [1], яке пропонує алгоритм стискування географічних координат тривимірних моделей за допомогою розподілу простору в октадереві й комбінованого кодування індексів кубів із геометричними кодами. Перевагою є дуже високий ступінь стискування до 90% і можливість прогресивної передачі та завантаження даних. Алгоритм добре працює з великими тривимірними наборами вершини. Основним недоліком є скоріше апаратна/алгоритмічна складність кодування та

ISSN 2786-6025 Online

декодування для дуже великих обсягів даних і обмеження на певний тип структури 3D-геометрії, що може зменшувати універсальність застосування цього підходу.

У статті [2] розглядається стиснення хмар точок LiDAR як одного з найоб'ємніших компонентів геопросторової інформації, що сприяє зменшенню енергетичних витрат на зберігання та обробку. Позитивним є акцент на енергоефективність і сталий розвиток, а також застосування безвтратних методів для збереження точності вимірювань. Серед недоліків – методи більше орієнтовані на LiDAR-шари, менш узагальнені для інших типів 3D-структур (наприклад, для мереж TIN або трикутних сіток).

У комплексному огляді [3] виконано аналіз методів стискання хмар точок і застосування тривимірних даних у дистанційному зондуванні, включаючи традиційні та надсучасні (машинне навчання) алгоритми. В роботі виконано широке охоплення існуючих методик, а також практичні порівняння компресійних підходів. Дана публікація має оглядовий характер, не надаючи власного алгоритмічного рішення.

Далі у статті [4] запропоновано сучасну структуру компресії хмар точок, яка використовує комбінацію залишкових зв'язків і нейронних мереж для аналізу просторових залежностей даних. Результатом є значне покращення співвідношення стискання та якості збереження просторової структури, але при цьому виникає надлишкова складність архітектури й потреба в потужних обчислювальних ресурсах, що може обмежувати практичне використання в геодезичних задачах зі слабким обладнанням.

Ще один сучасний огляд [5] прогресу в алгоритмах стискання хмар точок та оцінці якості стиснутих 3D-даних. В статті присутня чимала кількість розглянутих методів, включаючи *handcrafted* і *learning-based*. Також включені показники оцінки якості після компресії. При цьому слід відмітити, що великі обсяги оглядових даних можуть бути складними для практичного вибору конкретного підходу без подальшого тестування.

Робота [6] пропонує ентропійну модель на основі октадерева для стискання LiDAR-хмар, а її сильною стороною є ефективне зменшення бітрейта на 10–20 % при збереженні високої якості даних і кращі результати для сегментації/детекції. Тим не менше, недоліком тут може вважатися обмежена адаптація для інтеперабельності з існуючими геоданими, особливо в ГІС-середовищах. У статті [7] пропонуються алгоритми стиснення послідовностей LiDAR-даних, які враховують їхні часові залежності. При цьому декларуються дуже високі показники стискання (до 9 разів) і швидкість, придатна для виконання алгоритму у реальному часі. В той же час дана розробка орієнтована на автономні транспортні системи, що може не повністю відповідати узагальненим геопросторовим задачам.

Робота [8] пропонує фреймворк для стиснення атрибутів динамічних хмар точок із врахуванням просторово-часових взаємозв'язків, що в сукупності забезпечує оптимальну декореляцію та зменшення обсягу збереження даних. Але недоліком тут є фокус саме на атрибутах, а не повній геометрії 3D-моделей.

У [9] запропоновано підхід на базі Deep learning для стиснення атрибутів 3D-хмар, що включає колір, відображення та інші параметри. При цьому здійснюється глибоке кодування атрибутів, що значно зменшує розмір даних без помітної втрати якості. Недоліком є обмежений набір конкретних атрибутних характеристик, що, відповідно, може не враховувати всю геометричну структуру моделі.

Сучасне систематичне узагальнення [10] методів стискання LiDAR наборів, включно з різними форматами та кодерами, базується на структурованому аналізі теорії та практики, що корисно для вибору оптимального підходу для конкретних умов застосування.

Слід відмітити, що деякі методи вимагають спеціалізованих апаратних рішень або компонентів стандартів MPEG, що може бути технічно складно адаптувати в геодезичних системах.

Нарешті, не можна не згадати одну з класичних статей [11], в якій аналізуються методи декореляції просторових даних для ефективного представлення моделей рельєфу з використанням хвильових трансформацій і адаптивних триангуляцій. Дане дослідження не враховує сучасних технік машинного навчання та апаратної оптимізації.

Таким чином, можна стверджувати, що актуальним є пошук ефективних методик стиснення геопросторової інформації, що в подальшому може бути ефективно використана у створенні тривимірних моделей територій при геодезичних роботах.

Мета статті – дослідження процесів зберігання та обробки геопросторової інформації, зокрема питань її стиснення, що враховують особливості саме даного типу даних.

Виклад основного матеріалу. Таким чином, встановлена необхідність розроблення нових методів стискання, які б забезпечували високу ступінь компресії без суттєвої втрати геометричної точності. Традиційні підходи (октадерова, хвильові перетворення, предиктивне кодування) не в повній мірі враховують складну багаторівневу структуру геопросторових даних, що характеризуються просторовою кореляцією, ієрархічністю та фрактальною природою рельєфу.

У зв'язку з цим пропонується новий метод стискання геопросторової інформації, який базується на математичному апараті багаторівневої тензорно-фрактальної декомпозиції (Multi-level Tensor-Fractal Decomposition, MTFD).

ISSN 2786-6025 Online

В основі методу лежить представлення геопросторової інформації, що використовується у 3D-моделюванні територій, у вигляді багатовимірного тензора:

$$\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{x \times y \times z \times a},$$

де x, y, z – просторові координати, а a – набір атрибутів (інтенсивність, колір, класифікація, висота, щільність тощо).

Запропонований метод передбачає представлення геопросторових даних як суми трьох компонентів:

$$\mathbf{G} = \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_f + \mathbf{E},$$

де $\mathbf{T}_s$ – структурна (низькочастотна) складова;

$\mathbf{T}_f$ – фрактально-деталізована складова;

$\mathbf{E}$ – залишкова похибка апроксимації.

На першому етапі застосовується тензорна декомпозиція:

$$\mathbf{G} \approx \mathbf{C} \times_1 \mathbf{U}_x \times_2 \mathbf{U}_y \times_3 \mathbf{U}_z$$

де $\mathbf{C}$ – ядро тензора меншої розмірності, $\mathbf{U}_x, \mathbf{U}_y, \mathbf{U}_z$ – ортонормовані матриці базисів просторових координат. Це дозволяє зменшити надлишковість, що виникає через просторову кореляцію геоданих.

Другим ключовим елементом є фрактальна апроксимація залишкової складової:

$$\mathbf{T}_f = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot F_i(\mathbf{G}))$$

де F_i – самоподібні оператори просторового масштабування, а λ_i – коефіцієнти фрактального стиснення. Оскільки рельєф та багато природних поверхонь мають фрактальні властивості, це дозволяє ефективно кодувати складні геометричні деталі.

Для кінцевого стиснення можна використати адаптивне ентропійне кодування:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i$$

де p_i – імовірність появи квантизованих коефіцієнтів тензорного ядра.

Відповідно до наведених формул можна використати наступну послідовність основних етапів алгоритму стиснення геопросторових даних:

- нормалізація координат і атрибутів геопросторових даних;
- побудова ієрархічної просторової сітки (multi-resolution grid);
- тензорна декомпозиція багатовимірного масиву геоданих;
- фрактальна апроксимація залишкової складової;
- квантування коефіцієнтів із урахуванням геодезичної точності;
- ентропійне кодування (арифметичне або Хаффмана).

До основних переваг запропонованого методу належать:

- урахування структурної та ієрархічної природи геопросторової інформації;
- можливість безвтратного або квазібезвтратного стискання;
- масштабованість для великих хмар точок та 3D-моделей;
- збереження топологічних зв'язків між об'єктами;
- придатність для інтеграції в геоінформаційні системи та цифрові двійники територій.

Для розглянутого підходу можна запропонувати наступну архітектуру програмного забезпечення, що реалізуватиме даний метод:

- модуль імпорту геопросторових даних (LAS, GeoTIFF, OBJ, XYZ);
- модуль попередньої обробки;
- модуль тензорної декомпозиції;
- модуль фрактального стискання;
- модуль кодування та збереження;
- модуль декомпресії та візуалізації.

Архітектурно це може бути представлено як конвеєр обробки:

$$D_{\text{input}} \rightarrow P_{\text{pre}} \rightarrow T_{\text{decomp}} \rightarrow F_{\text{compress}} \rightarrow E_{\text{encode}} \rightarrow D_{\text{output}}$$

У якості технологічного стеку можна, наприклад, запропонувати використання мови програмування Python та, відповідно, наступних модулів (бібліотек) для неї:

- NumPy — обробка тензорів;
- SciPy — математичні операції;
- TensorLy — тензорні розклади;
- Open3D — робота з хмарами точок;
- GDAL — обробка геопросторових растрових даних;
- PyTorch (опційно) — для адаптивної оптимізації коефіцієнтів.

Говорячи про загальні принципи побудови відповідного програмного продукту, можна запропонувати наступну логічну структуру його програмних модулів:

```
class GeoCompressor:
def __init__(self, precision=0.01):
self.precision = precision

def load_data(self, filepath):
# Завантаження геопросторових даних
pass

def tensor_decomposition(self, data):
# Tucker decomposition
pass

def fractal_encoding(self, residual):
# Фрактальне кодування залишкових даних
pass
```

```
def entropy_coding(self, coefficients):  
# Ентропійне стискання  
pass
```

```
def compress(self, data):  
tensor_core, factors = self.tensor_decomposition(data)  
residual = data - self.reconstruct(tensor_core, factors)  
fractal_part = self.fractal_encoding(residual)  
encoded = self.entropy_coding((tensor_core, fractal_part))  
return encoded
```

На першому етапі модуль імпорту має перетворювати геопросторові дані у єдину тензорну структуру. Далі модуль декомпозиції повинен зменшувати розмірність даних шляхом виділення базисних компонентів просторової варіації. Фрактальний модуль має виконувати стискання високочастотних деталей рельєфу та об'єктів. Завершальну роботу повинен виконувати модуль ентропійного кодування, в результаті чого формуватиметься компактний файл геопросторової інформації.

У якості потенційних обмежень запропонованого методу може виступити значна обчислювальна складність на етапі декомпозиції, а також потреба у попередній оптимізації рангу тензора.

Також ефективність стиснення може залежати від особливостей самої поверхні тобто від типу геопросторових даних (рельєф, забудова, інфраструктура).

Вказані формули, елементи алгоритму та особливості архітектури можуть в подальшому бути покладені в основу повноцінного програмного продукту, що, втілюючи запропоновані рішення, дозволить здійснювати ефективне стиснення геопросторових даних.

Висновки. У цілому запропонований метод багаторівневої тензорно-фрактальної декомпозиції дозволяє розглядати геопросторову інформацію як структуровано організовану математичну сутність із високим рівнем внутрішньої кореляції, що відкриває нові можливості для ефективного стиснення даних, які використовуються при створенні високодеталізованих тривимірних моделей територій, з одночасним збереженням їх геометричної точності та інформаційної повноти.

Література:

1. Qian W., Jiang Y., Li L. An encoding method for compressing geographical coordinates in 3D space // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W7. P. 123–128. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-123-2017.
2. Warchoń A., Bielecka E., Wszyński M., et al. Energy-saving geospatial data storage: LiDAR point cloud compression // Energies. 2024. Vol. 17, No. 24. Article 6413. DOI: 10.3390/en17246413.

3. Dumić E., da Silva Cruz L. A. Three-dimensional point cloud applications, datasets, and compression methodologies for remote sensing: A meta-survey // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 6. Article 1660. DOI: 10.3390/s25061660.

4. Huang M., Li J., Zhang Y., et al. Point cloud geometry compression based on interlayer and IRN residuals // *Signal Processing: Image Communication*. 2025. Vol. 122. Article 117089. DOI: 10.1016/j.image.2025.117089.

5. Point cloud compression and objective quality assessment: A comprehensive review // *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2506.22902> (дата звернення: 18.02.2026).

6. Huang L., Zhang S., Wang H., et al. OctSqueeze: Octree-structured entropy model for LiDAR compression // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2020. P. 1313–1322. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00139.

7. Feng Y., Zhang Z., Zhao X., et al. Real-time spatio-temporal LiDAR point cloud compression // *arXiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.06972> (дата звернення: 18.02.2026).

8. Xu Y., Dong X., Zhang J., et al. Predictive generalized graph Fourier transform for attribute compression of dynamic point clouds // *arXiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.01970> (дата звернення: 18.02.2026).

9. Fang G., Li X., Zhang R., et al. 3DAC: Learning attribute compression for 3D point clouds // *arXiv*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.09931> (дата звернення: 18.02.2026).

10. Compression approaches for LiDAR point clouds and 3D geospatial data // *ACM Computing Surveys*. 2025. Vol. 58, No. 3. Article 45. DOI: 10.1145/3715916.

11. Gerke M., Vosselman G. Efficient representation of digital terrain models: Compression and spatial decorrelation techniques // *Computers & Geosciences*. 2002. Vol. 28, No. 7. P. 823–835. DOI: 10.1016/S0098-3004(01)00082-6.

References:

1. Qian W., Jiang Y., Li L. An encoding method for compressing geographical coordinates in 3D space // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. Vol. XLII-2/W7. P. 123–128. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-123-2017.

2. Warchoń A., Bielecka E., Wszyński M., et al. Energy-saving geospatial data storage: LiDAR point cloud compression // *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 24. Article 6413. DOI: 10.3390/en17246413.

3. Dumić E., da Silva Cruz L. A. Three-dimensional point cloud applications, datasets, and compression methodologies for remote sensing: A meta-survey // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 6. Article 1660. DOI: 10.3390/s25061660.

4. Huang M., Li J., Zhang Y., et al. Point cloud geometry compression based on interlayer and IRN residuals // *Signal Processing: Image Communication*. 2025. Vol. 122. Article 117089. DOI: 10.1016/j.image.2025.117089.

5. Point cloud compression and objective quality assessment: A comprehensive review // *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2506.22902> (дата звернення: 18.02.2026).

6. Huang L., Zhang S., Wang H., et al. OctSqueeze: Octree-structured entropy model for LiDAR compression // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2020. P. 1313–1322. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00139.

7. Feng Y., Zhang Z., Zhao X., et al. Real-time spatio-temporal LiDAR point cloud compression // *arXiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.06972> (дата звернення: 18.02.2026).

ISSN 2786-6025 Online

8. Xu Y., Dong X., Zhang J., et al. Predictive generalized graph Fourier transform for attribute compression of dynamic point clouds // arXiv. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.01970> (дата звернення: 18.02.2026).

9. Fang G., Li X., Zhang R., et al. 3DAC: Learning attribute compression for 3D point clouds // arXiv. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.09931> (дата звернення: 18.02.2026).

10. Compression approaches for LiDAR point clouds and 3D geospatial data // ACM Computing Surveys. 2025. Vol. 58, No. 3. Article 45. DOI: 10.1145/3715916.

11. Gerke M., Vosselman G. Efficient representation of digital terrain models: Compression and spatial decorrelation techniques // Computers & Geosciences. 2002. Vol. 28, No. 7. P. 823–835. DOI: 10.1016/S0098-3004(01)00082-6.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.02.2026