Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЗІНЕНКО РОМАН ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 528.9

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ І МОДЕЛІ ГЕОВІЗУАЛІЗАЦІЇ НА НАЦІОНАЛЬНОМУ ГЕОПОРТАЛІ НАЦІОНАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво
спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р. О. Зіненко

Науковий керівник: Карпінський Юрій Олександрович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

Ідентичний за змістом з іншими примірниками дисертації

АНОТАЦІЯ

Зіненко Р. О. Методи і моделі геовізуалізації на Національному геопорталі Національної інфраструктури геопросторових даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» (галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»). – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Сучасний етап розвитку національних інфраструктур геопросторових даних вимагає фундаментального перегляду підходів до формування та відображення топографічної інформації. У дисертаційному дослідженні розв’язано науково-прикладне завдання забезпечення узгодженої багатомасштабної геовізуалізації через перехід від традиційної картографічної генералізації до сучасної геоінформаційної. Традиційна парадигма, яка розглядала створення карт різних масштабів як розроблення автономних картографічних продуктів, призводила до просторової невідповідності, дублювання зусиль під час оновлення та виникнення семантичних суперечностей між похідними рівнями. Геоінформаційна генералізація усуває ці недоліки, оскільки передбачає автоматизований і формалізований перехід від єдиного вихідного джерела інформації до кожного похідного масштабу ряду.

У роботі науково обґрунтовано та доведено, що використання базової державної топографічної карти в масштабі 1:10 000 як єдиного джерела вихідної інформації є основною вимогою для формування всього спектра дрібніших масштабів: 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000. Відмова від методу каскадної генералізації, за якого кожен наступний масштаб створюється на базі попереднього, на користь прямого генерування з єдиної актуальної основи масштабу 1:10 000 запобігає ефекту накопичення метричних та топологічних похибок. Такий підхід забезпечує

відповідність змісту, просторову ідентичність та простежуваність об’єктів усього масштабного ряду через збереження стійких ідентифікаторів (TOID).

Для забезпечення відтворюваного та автоматизованого опрацювання топографічних даних у дослідженні розроблено математичну модель, що спирається на апарат дискретної математики, просторових предикатів та теорії множин. Ця модель формалізовано описує процес відбору об’єктів з каталогу карти масштабу 1:10 000 до карт менших масштабів, а також їх різного картографічного подання.

Фундаментальною відмінністю розробленої моделі є те, що включення об’єкта до похідного набору визначається не лише метричними порогами. Модель використовує систему характеристичних предикатів, які одночасно аналізують розмірні критерії (довжину, площу), а також функціональний статус і просторове оточення об’єктів. Завдяки цьому автоматично визначається допустимий геометричний перехід об’єкта. Зокрема, математичні оператори колапсу формалізують автоматизований перехід від полігональної моделі даних до точкової або лінійної моделі даних. Наприклад, якщо площа будівлі або водойми менша за поріг для масштабу 1:100 000, модель не вилучає її механічно, а допускає перехід до точкового відображення лише з урахуванням статусу об’єкта та його функціонального призначення (наприклад, збереження об’єкта як важливого орієнтира).

Математичні алгоритми набули предметної реалізації через розроблені прикладні схеми каталогу об’єктів, подані у вигляді уніфікованих UML-діаграм. Застосування об’єктно-орієнтованого моделювання (UML) дало змогу встановити ієрархію успадкування від абстрактного класу TopographicObject, який визначає спільні системні атрибути: ідентифікатори, версійність, межі масштабної придатності, – до конкретних тематичних пакетів.

У дослідженні детально опрацьовано шість класів топографічних об’єктів, для яких визначено специфічні правила відбору та топологічні обмеження. Інтеграція цих правил у прикладні моделі запобігає прийняттю

геометрично коректних, але семантично або топологічно непридатних рішень під час переходу між масштабами.

Розроблені прикладні схеми спираються на методологічні засади міжнародних стандартів географічної інформації, зокрема ДСТУ ISO 19110:2017 «Географічна інформація. Методологія каталогізації об’єктів» та ДСТУ ISO 19131:2019 (ISO 19131:2007; Amd 1:2011, IDT) «Географічна інформація. Специфікація геопросторового продукту». UML-діаграми детально описують ієрархічну структуру класів просторових об’єктів топографічної карти 1:10 000, регламентують їхні атрибутивні домени, фіксують топологічні взаємозв’язки та інкапсулюють методи просторової поведінки – генералізації для кожного окремого класу при переході до дрібніших масштабів. Це дає змогу перенести предикатну логіку в прикладні схеми, придатні для інтеграції в об’єктно-реляційну СКБД, зокрема PostgreSQL/PostGIS, для автоматичного виконання просторових трансформацій.

Для реалізації формалізованих предикатів у роботі використано комплекс геоінформаційних методів картографічної генералізації, застосування яких відокремлено від кінцевого етапу графічної символізації. Дослідження доводить, що зміна масштабу є не просто візуальним зменшенням, а перетворенням об’єктної моделі.

Основні геоінформаційні оператори, використані в дисертації, включають:

- метод автоматизованого відбору (селекції): формування підмножин об’єктів, для яких підтверджено істинність масштабного предиката, з урахуванням семантичної повноти вихідних даних;
- метод геометричного спрощення: зменшення координатної деталізації ліній та полігонів за допомогою алгоритмів Дугласа – Пекера (оцінка за відстанню максимального відхилення) та Вісвалінгама – Вайатта (оцінка за ефективною площею). Спрощення суворо підпорядковується

топологічним правилам, щоб, наприклад, скорочення вершин дороги не зруйнувало транспортний вузол;

- метод агрегування: об’єднання кількох просторово близьких і семантично сумісних об’єктів (наприклад, кварталів) у єдиний контур із фіксацією відношення множинного походження та перевіркою просторових конфліктів із вуличною мережею;
- метод геометричного колапсу: зміна просторової розмірності (від 2D до 1D або 0D) зі збереженням ідентичності топографічної сутності.

Кожен метод генералізації завершується обов’язковим топологічним контролем. Це дало змогу розмежувати метричну валідність результату та його картографічну прийнятність, відбраковуючи кандидатів, які генерують некоректні просторові взаємодії (наприклад, коли агрегований квартал перекриває вісь проїжджої частини).

Достовірність і працездатність розроблених методів і математичних моделей підтверджено їхньою апробацією на Національному геопорталі Національної інфраструктури геопросторових даних. Експериментальну апробацію виконано з використанням контрольного фрагмента базової державної топографічної карти.

Програмно-технологічна реалізація підтвердила інтероперабельність сформованих масштабних подань. Геовізуалізація та доступ до багатомасштабних наборів успішно протестовані через стандартизовані сервіси Відкритого геопросторового консорціуму (OGC): сервіси картографічних зображень (WMS), тайлові картографічні сервіси (WMTS) та сервіси об’єктного доступу до векторних геопросторових даних (WFS). Зіставлення результатів підтвердило збіг зображень WMS і WMTS та відповідність складу відповідей WFS сформованим масштабним наборам.

Окрім технологічної імплементації, результати дисертаційного дослідження мають нормативне значення. Розроблені автором математичні предикати відбору, прикладні UML-схеми та каталоги шести класів топографічних об’єктів були безпосередньо інтегровані до співавторського

проєкту нормативно-технічного документа — «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000». Це формує єдину науково-методичну основу для узгодженого використання топографічних геопросторових даних держателями та виробниками в середовищі НІГД.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено математичну модель генералізації об’єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів, критерії відбору в яких враховуються просторові характеристики, семантичні ознаки, функціональне призначення та статус об’єктів, що дозволяє формалізувати правила відбору та трансформації просторових властивостей об’єктів при зміні масштабу візуалізації топографічних основ;

– розроблено каталоги класів об’єктів та уніфіковані моделі у формі прикладних схем Специфікацій наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 для класів Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation) на основі пооб’єктного підходу, де всі масштабні рівні інтегровано у структуру зазначених класів за допомогою системних атрибутів і довідників, що забезпечує автоматизовану генералізацію об’єктів цих класів для всіх масштабних рівнів як похідних від базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000;

– удосконалено методи формування похідних масштабних представлень, у яких послідовно відокремлено рішення про включення об’єкта, визначення допустимої геометрії та роздільної здатності, застосування операторів генералізації та контроль результату, що забезпечує просторову та семантичну узгодженість усіх картографічних представлень просторових об’єктів всього масштабного ряду 1:25 000 – 1:1 000 000.

Практичне значення одержаних результатів полягає в забезпеченні автоматизованої генералізації просторових об’єктів у геопортальних рішеннях і геоінформаційних системах на основі проєкту «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000». Результати використано в діяльності ДП «НДІГК» під час розроблення та апробації технологічних рішень Національного геопорталу НІГД.

Основні результати дисертації опубліковано у восьми наукових працях: п’яти статтях у наукових фахових виданнях України та трьох працях, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації на міжнародних наукових конференціях.

Ключові слова: геовізуалізація, національна інфраструктура геопросторових даних, Національний геопортал, геопросторові дані, базова державна топографічна карта, математична модель генералізації, просторові предикати, методи формування похідних масштабних представлень, багатомасштабне представлення, автоматизована генералізація, каталог об’єктів, прикладні моделі, специфікація наборів геопросторових даних, інтероперабельність, WMS, WMTS, WFS.

ABSTRACT

Zinenko R. O. Methods and Models of Geovisualisation on the National Geoportal of the National Spatial Data Infrastructure. – A qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 193 “Geodesy and Land Management” (field of knowledge 19 “Architecture and Construction”). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The current stage of development of national geospatial data infrastructures calls for a fundamental reassessment of approaches to the creation and visual representation of topographic information. The dissertation solves the scientific and applied task of ensuring consistent multiscale geovisualisation through a transition from traditional cartographic generalisation to modern geoinformation-based generalisation. The traditional paradigm, in which maps at different scales were produced as autonomous cartographic products, led to spatial inconsistencies, duplication of efforts during updating, and semantic contradictions between derived scale levels. Geoinformation-based generalisation eliminates these shortcomings, as it provides for an automated and formalised transition from a single source of information to each derived scale of the series.

The study provides a scientific justification and demonstrates that the use of the Base State Topographic Map at a scale of 1:10,000 as the sole source of input information is a fundamental requirement for producing the entire range of smaller-scale maps: 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000, 1:500,000 and 1:1,000,000. Replacing cascade generalisation, in which each successive scale is derived from the preceding one, with direct generation from a single up-to-date base at 1:10,000 prevents the accumulation of metric and topological errors. Through the preservation of persistent identifiers (TOID), this approach ensures consistency of content, spatial identity and traceability of features across the entire scale series.

To ensure reproducible and automated processing of topographic data, the study develops a mathematical model based on discrete mathematics, spatial

predicates and set theory. This model formally describes the selection of features from the feature catalogue of the 1:10,000 map for smaller-scale maps, as well as their different cartographic representations.

A fundamental distinguishing feature of the proposed model is that the inclusion of a feature in a derived dataset is not determined by metric thresholds alone. The model uses a system of characteristic predicates that jointly assess feature size criteria, including length and area, as well as functional status and spatial context. In this way, the admissible geometric transition of a feature is determined automatically. In particular, mathematical collapse operators formalise the automated transition from a polygonal data representation to a point or linear representation. For example, when the area of a building or a water body falls below the applicable threshold at a scale of 1:100,000, the model does not simply omit the feature but allows a transition to point representation only with regard to the feature's status and functional purpose (for example, retaining it as an important landmark).

The mathematical algorithms were implemented at the application level through application schemas for the feature catalogue, presented as unified UML diagrams. Object-oriented modelling (UML) made it possible to establish an inheritance hierarchy, extending from the abstract TopographicObject class, which defines shared system attributes—identifiers, version information and limits of scale applicability—to specific thematic packages.

The study examines in detail six classes of topographic features, for which class-specific selection rules and topological constraints have been defined. Integrating these rules into the application models prevents the acceptance of solutions that are geometrically valid but semantically or topologically inadmissible when transitioning between scales.

The developed application schemas are based on the methodological principles of international geographic information standards, particularly DSTU ISO 19110:2017 "Geographic Information — Methodology for Feature Cataloguing" and DSTU ISO 19131:2019 (ISO 19131:2007; Amd 1:2011, IDT), "Geographic

Information — Data Product Specifications". The UML diagrams describe in detail the hierarchical structure of the spatial feature classes of the 1:10,000 topographic map, specify their attribute domains, establish topological interrelationships, and encapsulate methods governing the spatial behaviour and generalisation of each individual class when transitioning to smaller scales. This makes it possible to transfer predicate logic into application schemas suitable for integration into an object-relational database management system, in particular PostgreSQL/PostGIS, for the automated execution of spatial transformations.

To implement the formalised predicates, the study employs a range of geoinformation methods of cartographic generalisation, whose application is separated from the final stage of graphic symbolisation. The research demonstrates that a change of scale is not merely a visual reduction but entails a transformation of the feature model.

The principal geoinformation operators used in the dissertation include:

– automated selection (feature selection): forming subsets of features for which the scale predicate has been confirmed to be true, while taking into account the semantic completeness of the source data;

– geometric simplification: reducing the coordinate detail of lines and polygons using the Douglas–Peucker algorithm (assessed by the distance of maximum deviation) and the Visvalingam–Whyatt algorithm (assessed by effective area). Simplification is strictly governed by topological rules so that, for example, reducing the number of vertices of a road does not destroy a transport-network junction;

– aggregation: combining several spatially proximate and semantically compatible features (for example, urban blocks) into a single outline recording a multiple-provenance relationship and checking for spatial conflicts with the street network;

– geometric collapse: changing spatial dimensionality (from 2D to 1D or 0D) while preserving the identity of the topographic entity.

Each generalisation method concludes with mandatory topological verification. This has made it possible to distinguish the metric validity of a result from its cartographic acceptability by rejecting candidates that produce incorrect spatial interactions (for example, where an aggregated urban block overlaps the centreline of the carriageway).

The reliability and operability of the developed methods and mathematical models have been confirmed through their validation on the National Geoportal of the National Spatial Data Infrastructure. Experimental validation was carried out using a test area from the Base State Topographic Map.

The software and technological implementation confirmed the interoperability of the generated scale-dependent representations. Geovisualisation of and access to multiscale datasets were successfully tested through services standardised by the Open Geospatial Consortium (OGC): Web Map Service (WMS) for cartographic images, Web Map Tile Service (WMTS) for map tiles, and Web Feature Service (WFS) for feature-level access to vector geospatial data. Comparison of the results confirmed that WMS and WMTS images matched and that WFS responses were consistent with the generated scale datasets.

Beyond technological implementation, the dissertation findings are also of regulatory significance. The author's mathematical selection predicates, UML application schemas and feature catalogues for six classes of topographic features were directly incorporated into the co-authored draft normative technical document entitled "Specifications for Geospatial Datasets of Topographic Maps at Scales of 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000, 1:500,000 and 1:1,000,000". This establishes a unified scientific and methodological foundation for the consistent use of topographic geospatial data by data custodians and producers within the National Spatial Data Infrastructure.

Scientific novelty of the research findings:

– a mathematical model for the generalisation of features across different scales has been developed using spatial predicates whose selection criteria take account of the spatial characteristics, semantic properties, functional purpose and

status of features, thereby making it possible to formalise the rules for selecting features and transforming their spatial properties as the visualisation scale of topographic bases changes;

– feature catalogues and unified models have been developed in the form of application schemas of the Specifications for Geospatial Datasets of Topographic Maps at Scales of 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000, 1:500,000 and 1:1,000,000 for the classes Buildings, Urban Blocks (Blocks), Motor Roads and Unpaved Roads (Roads), Standing Water Bodies (StandingWater), Watercourse Reaches and Channels of the Hydrographic Network (Watercourse), and Woody Vegetation (Vegetation). These models are based on a feature-by-feature approach in which all scale levels are integrated into the structure of the specified classes through system attributes and code lists, enabling automated generalisation of features of these classes at every scale level as derivatives of the Base State Topographic Map at a scale of 1:10,000;

– methods for generating derived scale-dependent representations have been improved by sequentially separating the decision to include a feature, determination of permissible geometry and spatial resolution, application of generalisation operators, and verification of the result, thereby ensuring the spatial and semantic consistency of all cartographic representations of spatial features across the entire scale series from 1:25,000 to 1:1,000,000.

The practical significance of the findings lies in enabling automated generalisation of spatial features in geoportal solutions and geographic information systems on the basis of the draft “Specifications for Geospatial Datasets of Topographic Maps at Scales of 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000, 1:500,000 and 1:1,000,000”. The findings have been used in the activities of the State Enterprise “Research Institute of Geodesy and Cartography” (SE “NDIHK”) during the development and validation of technological solutions for the National Geoportal of the National Spatial Data Infrastructure.

The principal findings of the dissertation have been published in eight scientific works: five articles in Ukrainian specialised scientific journals and three

works documenting the presentation and validation of the dissertation findings at international scientific conferences.

Keywords: geovisualisation, national spatial data infrastructure, National Geoportal, geospatial data, Base State Topographic Map, mathematical model of generalisation, spatial predicates, methods for generating derived scale-dependent representations, multiscale representation, automated generalisation, feature catalogue, application models, geospatial dataset specification, interoperability, WMS, WMTS, WFS.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2025. Вип. 13. С. 514–524. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.514-524.

Досліджено особливості застосування вебсервісу картографічних тайлів WMTS для геовізуалізації геопросторових даних у середовищі Національного геопорталу НІГД. Розглянуто структуру наборів матриць тайлів, рівні деталізації та особливості формування багатомасштабного картографічного представлення. Обґрунтовано доцільність використання WMTS для публікації базової топографічної основи Національного геопорталу.

2. Зіненко Р. О. Аналіз та оцінювання використання веб-сервісу візуалізації WMS у Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2026. Вип. 16. С. 431–441. DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.431-441.

Проаналізовано функціонування WMS у складі Національного геопорталу НІГД та його відповідність вимогам специфікації вебсервісу картографічних зображень WMS 1.3.0 Відкритого геопросторового консорціуму, стандарту інтерфейсу вебкартографічного сервера ISO 19128:2005 і технічним рекомендаціям INSPIRE щодо сервісів перегляду. Досліджено операції GetCapabilities, GetMap та GetFeatureInfo. Тестування у середовищі QGIS підтвердило коректність підключення сервісу, відображення геопросторових даних на різних масштабних рівнях та сумісність із клієнтськими геоінформаційними системами.

3. Зіненко Р. О. Стан сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації геопросторових даних в Україні та тенденції їх розвитку. *Землеустрій,*

кадастр і моніторинг земель. 2026. № 2. С. 32–43. DOI: 10.31548/zemleustriy2026.02.03.

Виконано системний аналіз сучасного стану сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації геопросторових даних в Україні. Досліджено застосування стандартів і сервісів WMS, WMTS, WFS та CSW на Національному геопорталі НІГД, регіональних і місцевих геопорталах. Встановлено перехід від статичних картографічних ресурсів до динамічних веборієнтованих ГІС-платформ, високий рівень поширення сервісів перегляду WMS і WMTS та недостатнє використання сервісів прямого доступу до геопросторових об'єктів.

4. Зіненко Р. О. Методи та моделі геовізуалізації генералізованих геопросторових даних на Національному геопорталі. *Містобудування та територіальне планування*. 2026. Вип. 93. С. 666–677. DOI: 10.32347/2076-815x.2026.93.666-677.

Розроблено математичну модель представлення каталогу топографічних об'єктів та їх атрибутів для багатомасштабної геовізуалізації. Запропоновано використання характеристичних предикатів і функціональних операторів для автоматизованого відбору, зміни геометрії та генералізації об'єктів у масштабному ряду від 1:25 000 до 1:1 000 000. Обґрунтовано формування похідних наборів із базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

5. Карпінський Ю. О., Зіненко Р. О., Лазоренко Н. Ю., Кінь Д. О. Розроблення специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000–1:1 000 000. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2026. Вип. 104. С. 5–16. DOI: 10.23939/istcgcap2026.104.005.

Обґрунтовано пооб'єктне специфікування похідних топографічних наборів, за якого спільний опис класу поєднується з масштабними критеріями відбору, допустимими геометріями та вимогами до картографічного

представлення на кожному масштабному рівні. Порівняно два основних способи організації масштабних вимог. Систематизовано структуру співавторської праці [38], наведено критерії для гідрографії, населених пунктів та інженерних комунікацій, а також концептуальну модель формування похідних топографічних карт із базової топографічної моделі даних. Особистий внесок Зіненка Р. О.: обґрунтування каталогів класів і прикладних моделей Buildings, Blocks, Roads, StandingWater, Watercourse та Vegetation.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Тези доповідей та матеріали наукових конференцій

6. Зіненко Р. О. Використання веб сервісу візуалізації WMS в Національному геопорталі НІГД. *International scientific-practical conference "Topical issues of science, education and technology: theory and practice"* : conference proceedings (Aarhus, Denmark, April 18, 2025). Aarhus : Scholarly Publisher ICSSH, 2025. С. 41–43.

Подано результати дослідження використання WMS як одного з основних стандартизованих засобів геовізуалізації геопросторових даних у складі Національного геопорталу НІГД. Розглянуто принципи взаємодії клієнта з картографічним сервером, формування запитів та одержання картографічних зображень, а також можливість суміщення даних, отриманих із розподілених картографічних сервісів.

7. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Матеріали XXVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2025»* (Львів–Брюховичі, 9–11 квітня 2025 р.). Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 63–66.

Апробовано положення щодо застосування сервісу WMTS для багатомасштабного картографічного представлення геопросторових даних. Розглянуто структуру тайлового представлення, організацію рівнів деталізації та використання попередньо сформованих картографічних тайлів для геовізуалізації даних Національного геопорталу НІГД.

8. Kin D., Zinenko R., Lazorenko N., Karpinskyi Yu. The Application of Rigorous Numerical Methods for Analyzing Heterogeneous Geospatial Data. *29th AGILE Conference on Geographic Information Science — Poster Track* (Tartu, Estonia, June 16–19, 2026). Conference paper. Version v1. Zenodo, 14.05.2026. DOI: 10.5281/zenodo.20181757.

У співавторській праці досліджено точність картометричних обчислень на різнорідних геопросторових даних та вплив математичної моделі, координатної основи й деталізації геометрії на оцінки просторових характеристик. Розглянуто гідрографічні дані двох просторових рівнів. Особистий внесок Зіненка Р. О.: участь у дослідженні та аналізі результатів числових методів для різнорідних геопросторових даних.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2

ABSTRACT 8

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 14

ЗМІСТ 18

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 26

ВСТУП 34

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ГЕОВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ ГЕОПОРТАЛІВ 46

1.1 Геовізуалізація як складова національної інфраструктури геопросторових даних 46

1.1.1 Поняття та функції геовізуалізації геопросторових даних 47

1.1.2 Геопортал як середовище доступу та геовізуалізації геопросторових даних 49

1.1.3 Інтероперабельність геопросторових даних і геоінформаційних сервісів 49

1.2 Геоінформаційні сервіси геовізуалізації та доступу до геопросторових даних 51

1.2.1 Вебсервіс картографічних зображень WMS 51

1.2.2 Вебсервіс картографічних тайлів WMTS 53

1.2.3 Сервіси доступу до векторних геопросторових даних 54

1.3 Сучасний стан і тенденції застосування сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації в Україні 56

1.3.1 Порівняльний аналіз геоінформаційних сервісів Національного та місцевих геопорталів 56

1.3.2 Проблеми та тенденції розвитку сервісів геовізуалізації і доступу до геопросторових даних 60

1.4 Методи багатомасштабного представлення та генералізації топографічних геопросторових даних 61

1.4.1 Особливості картографічної генералізації в геоінформаційному середовищі 61

1.4.2 Моделі множинного представлення геопросторових даних . 67

1.4.3 Узгодження масштабного ряду та рівнів масштабування (ZOOM) 70

1.5 Постановка науково-прикладного завдання дослідження 73

1.6 Висновки до розділу 1 75

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ БАГАТОМАСШТАБНОЇ ГЕОВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТОПОГРАФІЧНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ 77

2.1 Концептуальна та математична модель топографічних геопросторових даних 77

2.1.1 Базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000 як вихідна модель даних 77

2.1.2 Математична модель каталогу топографічних об’єктів та їх атрибутів 78

2.1.3 Формалізоване представлення топографічного об’єкта 81

2.2 Метод формування похідних наборів топографічних геопросторових даних 84

2.2.1 Формування масштабного ряду топографічної основи 85

2.2.2 Критерії та предикати відбору топографічних об’єктів 87

2.2.3 Методи зміни геометричного представлення топографічних об’єктів 90

2.3 Методи автоматизованої картографічної генералізації топографічних геопросторових даних 92

2.3.1 Відбір топографічних об’єктів 93

2.3.2 Спрощення та згладжування геометрії 96

2.3.3 Агрегування та об’єднання геопросторових об’єктів 99

2.3.4 Геометричний колапс та зміна просторової розмірності 102

2.4 Масштабно залежне геометричне й картографічне представлення 103

2.4.1 Визначення масштабної придатності геометричного представлення 104

2.4.2 Формування масштабно залежних умовних знаків 106

2.4.3 Параметричні правила картографічного представлення 108

2.5 Узгодженість масштабних представлень топографічних геопросторових даних 110

2.5.1 Збереження ідентичності топографічного об’єкта 110

2.5.2 Топологічні правила та обмеження 114

2.5.3 Узгоджене оновлення похідних масштабних представлень 117

2.6 Розроблення прикладних моделей шести класів топографічних об’єктів 121

2.6.1 Спільна структура прикладної моделі і системні атрибути 122

2.6.2 Прикладна модель класу «Будівлі» (Buildings, код 0501) ... 124

2.6.3 Прикладна модель класу «Квартали» (Blocks, код 0402) 127

2.6.4 Прикладна модель класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601) 131

2.6.5 Прикладна модель класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)..... 135

2.6.6 Прикладна модель класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)..... 138

2.6.7 Прикладна модель класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)..... 141

2.6.8 Міжкласова узгодженість шести прикладних моделей 144

2.7 Модель надання похідних масштабних представлень через сервіси Національного геопорталу НІГД 146

2.8 Висновки до розділу 2 150

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І ПРИКЛАДНИХ МОДЕЛЕЙ НА НАЦІОНАЛЬНОМУ ГЕОПОРТАЛІ НІГД..... 152

3.1 Вихідні дані, середовище та організація випробувань 152

3.1.1 Програмно-технологічна архітектура Національного геопорталу НІГД..... 152

3.1.2 Фізична модель вихідних даних і відповідність атрибутів . 155

3.1.3 Контрольний фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000: склад даних і система координат..... 157

3.1.4 Початковий контроль умов масштабного відбору за площею 158

3.1.5 Формування похідних векторних представлень..... 159

3.1.6 Реалізація прикладних схем і предикатів відбору засобами СКБД..... 160

3.2 Результати перевірки шести прикладних моделей і методів генералізації..... 161

3.2.1 Клас топографічних об’єктів «Будівлі» (Buildings, код 0501): відбір за площею та зміна геометричного представлення 161

3.2.2 Клас топографічних об’єктів «Квартали» (Blocks, код 0402): агрегування та збереження походження 163

3.2.3 Клас топографічних об’єктів «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601): масштабний відбір і геометричне спрощення 165

3.2.4 Класи топографічних об’єктів «Водойми» (StandingWater, код 0301) та «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303): масштабно залежне представлення 168

3.2.5 Клас топографічних об’єктів «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801): відбір за площею та межі генералізації 170

3.2.6 Пряме та каскадне формування похідних масштабів 171

3.2.7 Спрощення ліній і контурів: алгоритми Дугласа – Пекера та Вісвалінгама – Вайатта 174

3.2.8 Збереження зв’язності вуличної мережі під час спрощення 176

3.2.9 Узагальнення результатів формування похідних наборів топографічних геопросторових даних 177

3.3 Реалізація багатомасштабного картографічного представлення на Національному геопорталі НІГД 178

3.4 Масштабно залежне картографічне оформлення та узгодженість представлень 181

3.4.1 Розмежування масштабного відбору, допустимої геометрії та умовного знака 182

3.4.2 Перевірка семантичних і топологічних передумов оформлення 182

3.4.3 Параметричне відтворення та узгодження масштабних представлень 183
3.4.4 Результати контролю графічних конфліктів та узгодженості 185
3.5 Реалізація та перевірка картографічних сервісів WMS, WMTS і WFS 185
3.5.1 Підготовка даних і організація перевірки сервісів 185
3.5.2 Перевірка графічних відповідей WMS 185
3.5.3 Перевірка тайлової моделі WMTS 186
3.5.4 Пооб’єктна перевірка WFS та зіставлення кількості записів 187
3.5.5 Результати перевірки сервісів та інтеграції 188
3.6 Підсумкова експериментальна перевірка та використання результатів дослідження 189
3.6.1 Організація та обсяг експериментальної перевірки 189
3.6.2 Результати експериментальної перевірки методів і моделей 189
3.6.3 Узагальнені результати перевірки геопортальних сервісів. 190
3.6.4 Узагальнення результатів комплексної перевірки 190
3.6.5 Використання результатів у проєкті документа 192
3.7 Висновки до розділу 3 193
ВИСНОВКИ 195
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 199
ДОДАТКИ 211
ДОДАТОК А 212
ДОДАТОК Б 213

Публікації здобувача та апробація матеріалів дисертації 213

Б.1. Наукові праці, у яких опубліковано основні результати дослідження 213

Б.2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації 214

Б.3. Особистий внесок здобувача у спільно підготовлені результати 215

Б.4. Відомості про наукову апробацію 216

ДОДАТОК В 217

ДОДАТОК Г 219

ДОДАТОК Д 220

Д.1. Вихідний набір, координатна основа та контроль початкової якості 220

Д.2. Контроль будівель і кварталів: масштабний відбір, геометрія та походження 226

Д.3. Контроль доріг: класифікація, спрощення та топологія 231

Д.4. Контроль водойм і ділянок водотоків: гідрографічні правила та геометрії 234

Д.5. Контроль деревної рослинності: геометричні представлення, семантика та картографічне представлення 238

Д.6. Фрагменти реалізації прикладної схеми в PostgreSQL/PostGIS241

ДОДАТОК Е 243

Е.1. Контрольні масштабні представлення та картографічний перегляд 244

Е.2. Семантичні та геометричні умови картографічного оформлення й умови застосування умовних знаків 245

Е.3. Перевірки сервісів WMS, WMTS і WFS та параметри запитів 248

Е.4. Інтеграційна апробація та зіставлення перевірених результатів 250

Е.5. Оригінальні зразки умовних знаків 251

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Латинські скорочення та ідентифікатори

API – Application Programming Interface — прикладний програмний інтерфейс.

BBOX – Bounding Box; координатні межі просторового вікна запиту до картографічного сервісу.

CRS – Coordinate Reference System — референцна система координат.

EPSG – European Petroleum Survey Group; у роботі коди EPSG використовуються для ідентифікації референцних систем координат.

File Geodatabase – формат геобази даних Esri; у дослідженні є форматом зберігання вихідної топографічної інформації. Фізичні класи зберігання відрізняються від класів топографічних об’єктів, визначених каталогом.

GDAL – Geospatial Data Abstraction Library — бібліотека читання й перетворення форматів геопросторових даних; у дослідженні використана для зчитування вихідної File Geodatabase.

GeoJSON – формат подання та обміну геопросторовими даними на основі JSON; у роботі розглядається як один із форматів надання через сервіси векторних даних.

GeoPackage – формат зберігання векторних геопросторових даних в одному файлі; у дослідженні — контейнер сформованих контрольних геометрій і записів «об’єкт — масштаб». Він не замінює PostgreSQL/PostGIS як базову платформу геопортальної архітектури.

GEOS – Geometry Engine — Open Source — бібліотека геометричних операцій, на якій ґрунтуються просторові функції PostGIS.

GID – ідентифікатор цифрового запису або представлення топографічного об’єкта у прикладній моделі; тотожність географічної сутності пов’язано з TOID.

GML – Geography Markup Language — мова розмітки географічної інформації.

HTTP – Hypertext Transfer Protocol; протокол передавання повідомлень, коди відповіді якого перевіряли окремо від картографічної придатності геопросторового змісту.

ICC – Institut Cartogràfic de Catalunya — Картографічний інститут Каталонії.

INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in the European Community — інфраструктура просторової інформації в Європейському Співтоваристві.

ISO – International Organization for Standardization — Міжнародна організація зі стандартизації.

JSON – JavaScript Object Notation — текстовий формат подання структурованих даних.

Lin – дослідницьке відношення множинного походження, яке пов’язує груповий геометричний кандидат із TOID усіх його вихідних об’єктів. Наявність цього відношення не підтверджує прийнятності агрегованої геометрії.

MRDB – Multiple Representation Database — база даних множинного представлення геопросторових об’єктів.

OCL – Object Constraint Language — мова опису обмежень об’єктів у моделях UML.

OGC – Open Geospatial Consortium — Відкритий геопросторовий консорціум.

PNG – Portable Network Graphics; формат растрових зображень, використаний для попарного зіставлення відповідей WMS GetMap і WMTS GetTile.

PostGIS – просторове розширення PostgreSQL із засобами зберігання геометрій і виконання геоінформаційних операцій, використане в описі проєктної архітектури та формалізованому представленні методів.

PostgreSQL – система керування базами даних, передбачена проєктною архітектурою Національного геопорталу НІГД для зберігання й опрацювання геопросторової інформації.

PROJ – бібліотека перетворення координат між системами координат і картографічними проєкціями, яку використовує PostGIS.

QGIS – настільна геоінформаційна система, використана в дослідженні як незалежне клієнтське середовище для перевірки геоінформаційних сервісів.

REST – Representational State Transfer — архітектурний стиль взаємодії програмних компонентів у розподілених інформаційних системах.

ScaleDenominator – параметр знаменника масштабу, що характеризує окремий рівень тайлової матриці у WMTS і використовується для зіставлення рівнів вебвідображення з картографічними масштабами.

SQL – Structured Query Language — мова структурованих запитів до баз даних.

SSC – Space-Scale Cube — структура даних неперервної генералізації «простір — масштаб».

Symbol25K, Symbol50K, Symbol100K, Symbol200K, Symbol500K, Symbol1M – передбачені цільовою прикладною схемою атрибути ідентифікації умовного знака на відповідних масштабах; у вихідній File Geodatabase ці поля фізично відсутні.

TDB – Topographic Database — база топографічних даних.

tGAP – topological Generalized Area Partitioning — топологічна структура даних неперервної генералізації.

TOID – Topographic Object Identifier — стійкий ідентифікатор топографічної сутності, за яким простежується зв’язок між її базовим і похідними представленнями за умови збереження тотожності об’єкта.

UML – Unified Modeling Language — стандартизована графічна мова опису прикладних схем, структур і відношень між елементами даних.

upperScale – передбачений цільовою прикладною схемою системний атрибут межі масштабної придатності геометричного представлення топографічного об’єкта [38]; у досліджених вихідних фізичних класах File Geodatabase це поле відсутнє.

URL – адреса мережевого ресурсу, що використовується для звернення до вебресурсів і геоінформаційних сервісів.

USGS – United States Geological Survey — Геологічна служба США.

W3C – World Wide Web Consortium — Консорціум Всесвітньої павутини.

WFS – Web Feature Service — стандартизований вебсервіс доступу до векторних геопросторових об’єктів та їх атрибутів.

WGS 84 – World Geodetic System 1984 — всесвітня геодезична система 1984 року.

WMS – Web Map Service — стандартизований вебсервіс динамічного формування та надання картографічних зображень.

WMTS – Web Map Tile Service — стандартизований вебсервіс доступу до картографічних тайлів через визначені набори тайлових матриць; спосіб підготовки тайлів залежить від реалізації сервісу.

XML – Extensible Markup Language — розширювана мова розмітки, що використовується для структурованого представлення даних і відповідей геоінформаційних сервісів.

ZOOM-рівень – дискретний рівень масштабування вебкарти; технічний рівень відображення, який не є тотожним традиційному картографічному масштабу.

Українські скорочення

ГІС – геоінформаційна система.

ДП «НДІГК» – державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії».

ДСТУ – національний стандарт України.

КНУБА – Київський національний університет будівництва і архітектури.

МСК – місцева система координат; у роботі МСК-63 (Харківська область).

НІГД – національна інфраструктура геопросторових даних.

СКБД – система керування базами даних.

УСК-2000 – Українська система координат 2000 року; державна референцна система координат України.

Терміни, формати та масштабно залежні атрибути

$Q_s(o)$ – результат контролю картографічної придатності об’єкта o у масштабі $s : 1$ за виконання всіх обов’язкових умов; 0 за наявності встановленого порушення; $\perp$ за невизначеної суттєвої умови та відсутності підтвердженого порушення.

Багатомасштабне представлення геопросторових даних – представлення одного географічного об’єкта або сукупності об’єктів на кількох масштабних рівнях зі зміною складу даних, геометрії, рівня деталізації та картографічного зображення відповідно до цільового масштабу.

Базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000 – вихідна інформаційна основа, від якої безпосередньо, без каскадного перенесення змін між сусідніми масштабами, формують шість похідних масштабних представлень.

Валідна геометрія – геометрія, що відповідає правилам коректності, установленим стандартом OGC Simple Feature Access (простий доступ до об’єктів).

Векторний тайл (VectorTile) – просторовий фрагмент із закодованою геометрією та визначеним складом атрибутів, організований за рівнями деталізації й призначений передусім для клієнтської геовізуалізації.

Геовізуалізація – формування, передавання та інтерактивне відображення картографічних представлень геопросторових об’єктів відповідно до їх просторових, семантичних і масштабних характеристик у геоінформаційному середовищі.

Геометричний кандидат – об’єктний стан після масштабного відбору або геометричного перетворення, для якого остаточна картографічна допустимість визначається за результатами подальших семантичних і топологічних перевірок та перевірок умовних знаків.

Геопросторові дані – дані, які безпосередньо або опосередковано пов’язані з певним місцеположенням відносно Землі.

Геоінформаційна генералізація – формалізований автоматизований перехід від єдиної вихідної бази топографічних даних до похідних масштабних наборів зі збереженням ідентифікаторів об’єктів.

Геоінформаційний продукт – набір даних або серія наборів даних, що відповідають установленій специфікації геоінформаційного продукту.

Геоінформаційний сервіс – програмно реалізований засіб виконання визначених операцій із геопросторовими даними та метаданими через стандартизований або формалізований інтерфейс.

Діагностичний запис – допоміжне масштабне представлення, сформоване для перевірки геометрії, відстаней між об’єктами чи роботи сервісу; його наявність у контрольній вибірці не означає дозволу на картографічне відображення.

Картографічна генералізація – відбір, узагальнення та перетворення об’єктів та їхніх характеристик відповідно до масштабу, призначення та змісту картографічного представлення.

Каскадна генералізація – послідовне формування кожного дрібнішого масштабу з даних попереднього, більшого масштабу, за якого похибки й спрощення попередніх етапів успадковуються наступними.

Каталог об’єктів – структурований опис класів геопросторових об’єктів, їх атрибутів, доменів і відношень, поданих у наборі або серії наборів даних.

Клас об’єктів – сукупність топографічних об’єктів з однаковим кодом класифікації, складом атрибутів і відношень, описана відповідним класом UML у прикладній схемі; поняття узгоджено з feature type у стандартах ISO 19109 «Географічна інформація. Правила для прикладних схем» та ISO 19110 «Географічна інформація. Методологія каталогізації об’єктів».

Масштабний ряд – сукупність установлених масштабів взаємопов’язаних картографічних представлень; у дослідженні — 1:25 000,

1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000, що формуються з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

Набір тайлових матриць (TileMatrixSet) – впорядкована сукупність тайлових матриць, пов’язаних з однією референцною системою координат і призначених для організації багаторівневого картографічного представлення у WMTS.

Пооб’єктний підхід – спосіб формування похідних масштабних представлень, за якого властивості й правила опрацювання визначаються для кожного класу топографічних об’єктів з урахуванням масштабу, допустимої геометрії та семантичних умов.

Похідне масштабне представлення – картографічний або об’єктний стан топографічного об’єкта чи набору, який формується для цільового масштабу на основі відбору, допустимого перетворення геометрії та семантичної перевірки. Геометричний кандидат до завершення контролю не вважається прийнятим представленням.

Предикат – логічна умова, за результатом перевірки якої визначається можливість відбору, збереження або перетворення топографічного об’єкта для певного масштабного представлення.

Прикладна схема – концептуальна схема даних, необхідних для одного або кількох програмних застосувань.

Специфікація геоінформаційного продукту – докладний опис набору або серії наборів геопросторових даних та додаткової інформації, необхідної для їх створення, постачання і використання.

Тайлова матриця (TileMatrix) – регулярна структура картографічних тайлів для певного рівня деталізації, що задає масштабний знаменник, початкову координату, розмір тайла та розмір матриці.

Топографічний об’єкт – географічний об’єкт природного або штучного походження, розташований на земній поверхні, над або під нею, обмежений у просторі, стаціонарний відносно земної поверхні та відносно сталий у часі.

Топологічна узгодженість – відповідність просторових відношень між геопросторовими об’єктами встановленим топологічним правилам і обмеженням.

σ, ω, α, κ – оператори відбору, геометричного спрощення, агрегування та колапсу відповідно, застосування яких визначається класом об’єкта, цільовим масштабом і семантичними обмеженнями.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний етап розвитку національних інфраструктур геопросторових даних вимагає перегляду підходів до формування та відображення топографічної інформації. Національна інфраструктура геопросторових даних України об’єднує ресурси різних держателів за узгодженими правилами просторової прив’язки, опису, доступу та використання, створюючи інформаційне підґрунтя для територіального управління і планування [1; 2]. Спільний просторовий контекст цих ресурсів формує топографічна основа.

Національний геопортал НІГД забезпечує пошук, перегляд і використання геопросторових даних і метаданих, проте їх коректне поєднання залежить від узгодженості координатних, семантичних і картографічних характеристик топографічного представлення [2]. Для цього недостатньо технічної сумісності геоінформаційних сервісів: потрібна узгодженість самих даних.

Зменшення масштабу істотно змінює картографічне сприйняття території. Умовні знаки перекривають близько розташовані об’єкти, малі контури важко розрізнити, а геометричні подробиці заважають сприйманню просторової структури, навіть коли вихідні дані залишаються точними [3]. Звичайне зменшення зображення проблеми не розв’язує. Масштабний перехід потребує обґрунтованого відбору об’єктів, визначення їхніх допустимих геометричних представлень і застосування операцій генералізації з урахуванням змісту класу топографічного об’єкта. Ці рішення повинні бути взаємно узгодженими.

Традиційна картографічна генералізація розглядала створення карт різних масштабів як розроблення автономних картографічних продуктів: кожен масштаб складали й оновлювали окремо, часто каскадно — на основі карти попереднього, більшого масштабу. Це призводило до просторової невідповідності, дублювання зусиль під час оновлення та семантичних суперечностей між похідними рівнями. Особливо складним ставало

відновлення спільного змісту після зміни базових даних, коли незалежні генералізовані представлення потребували повторного відбору, картографічного редагування та контролю. Геоінформаційна генералізація може усунути ці недоліки, якщо перехід від єдиного вихідного джерела до кожного похідного масштабу формалізовано й автоматизовано. Для цього необхідна єдина формалізована модель похідних представлень.

Масштабний відбір потребує формально визначених і перевірюваних критеріїв. Вони повинні враховувати метричні характеристики, семантичні ознаки, функціональне призначення та статус об’єктів, що дає змогу відокремити рішення про допустимість класу об’єктів у масштабі від рішення щодо конкретного екземпляра. Це розмежування запобігає механічній втраті змісту. Математичні предикати встановлюють можливість включення об’єкта до похідного набору, а геометричні оператори описують допустиме перетворення після виконання відповідних умов відбору. Прийнятність результату підтверджується незалежним просторовим контролем.

Вихідною інформаційною основою дослідження є базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000, з якої формуються похідні набори топографічних геопросторових даних для шести встановлених у дослідженні масштабів [4].

Похідний ряд охоплює масштаби 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000, для яких у роботі розробляються власні критерії відбору й перетворення [4]. Кожне похідне представлення отримують безпосередньо з актуальних даних вихідної топографічної основи, а не каскадно з попереднього масштабу. Це запобігає накопиченню метричних і топологічних похибок проміжних масштабних представлень. Спільне джерело разом зі стійкими ідентифікаторами TOID забезпечує відповідність змісту, просторову ідентичність і простежуваність об’єктів усього масштабного ряду. Геометричну, семантичну й топологічну прийнятність кожного результату додатково підтверджує обов’язковий порівняльний контроль щодо вихідних даних, структуру яких визначає специфікація карти масштабу 1:10 000 [5].

Науково-прикладне завдання полягає у формуванні узгоджених похідних масштабних представлень топографічних геопросторових даних масштабного ряду 1:25 000 – 1:1 000 000 безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 для геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД.

Стан наукового опрацювання проблеми. Наукове опрацювання проблеми пов’язане з розвитком картографічної генералізації, баз даних множинного представлення, формальних моделей геопросторових сутностей та стандартизованих способів опису геоінформаційних продуктів [6; 7]. Проте ці напрями розвивалися окремо, тоді як у геопортальному середовищі вони мають забезпечувати взаємопов’язане розв’язання завдань масштабного відбору, зміни геометрії, простежування походження та узгодженого картографічного представлення. Їх об’єднання потребує спільної прикладної моделі.

J. Stoter зі співавторами досліджували формальний семантичний опис масштабних представлень топографічних об’єктів і автоматизовану генералізацію за правилами класу, показавши можливість автоматизованої генералізації на основі структурованого опису міжмасштабних залежностей [6; 8]. Однак перенесення таких рішень до державної топографічної основи України потребує встановлення критеріїв для відповідних класів топографічних об’єктів, системних атрибутів та узгодженого набору геометричних перетворень на шести масштабах.

Математичні засади запропонованого дослідження відображено в одноосібній публікації здобувача про методи та моделі геовізуалізації генералізованих геопросторових даних на Національному геопорталі [4]. У ній застосовано апарат дискретної математики.

Формалізований опис множин класів об’єктів, їх цифрових екземплярів та їхніх атрибутів поєднано з характеристичними предикатами, які встановлюють участь конкретного об’єкта у похідному масштабному наборі. Геометричне перетворення описується окремим функціональним оператором.

У дисертації зазначені положення розвинуто через визначення допустимих геометричних представлень, масштабу застосування, збереження ідентичності й множинного походження, перевірку міжкласових відношень та картографічну символізацію.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження розвивалося протягом аспірантської підготовки, розпочатої у 2023 році, та було пов’язане з науковою діяльністю кафедри геоінформатики і фотограмметрії Київського національного університету будівництва і архітектури. Прикладні завдання опрацьовувалися також у діяльності ДП «НДІГК». Частина результатів безпосередньо використовувалася під час спільного розроблення проєкту документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» (додаток А).

Тематика дисертації пов’язана з кафедральною науково-дослідною роботою «Інфраструктура геопросторових даних для сталого розвитку територіальних громад», що виконувалася в КНУБА протягом 2022–2026 років. Її державний реєстраційний номер — 0122U201382. Зв’язок визначається дослідженням методів організації та узгодженої геовізуалізації геопросторових даних, необхідних для інформаційного забезпечення просторового розвитку та територіального планування.

У діяльності ДП «НДІГК» результати співвідносяться з науково-дослідною роботою «Створення і розвиток національної інфраструктури геопросторових даних» з державним реєстраційним номером 0124U001058. Роботу зареєстровано 28 січня 2024 року. Керівник роботи — Р. О. Зіненко. Її зв’язок із дисертацією охоплює масштабні правила, топографічну основу, інтероперабельність і геопортальне використання геопросторових даних.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення математичної моделі генералізації об’єктів різних масштабів із просторовими предикатами, каталогів класів об’єктів і прикладних моделей шести класів та удосконалення методів формування похідних масштабних представлень для

геовізуалізації топографічних даних Національного геопорталу НІГД. Вихідною основою є базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000.

Для досягнення мети поставлено та розв’язано такі завдання:

1. Узагальнити підходи до багатомасштабної геовізуалізації, моделей множинного представлення й автоматизованої картографічної генералізації та визначити функціональні межі сервісів WMS, WMTS і WFS у наданні похідних топографічних даних.
2. Розробити математичну модель генералізації об’єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів, критерії яких враховують просторові характеристики, семантичні ознаки, функціональне призначення та статус об’єктів.
3. Розробити каталоги класів об’єктів і уніфіковані моделі у формі прикладних схем для класів «Будівлі», «Квартали», «Автомобільні та ґрунтові дороги», «Водойми», «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» і «Деревна рослинність» з інтеграцією шести масштабних рівнів через системні атрибути та довідники.
4. Удосконалити методи формування похідних масштабних представлень, відокремивши рішення про включення об’єкта, визначення допустимої геометрії та роздільної здатності, застосування операторів генералізації та контроль результату.
5. Експериментально перевірити розроблені модель, прикладні моделі та методи на Національному геопорталі НІГД і встановити умови їхнього практичного використання.

Об’єкт дослідження — процес формування, підтримання та багатомасштабної геовізуалізації топографічної основи Національного геопорталу НІГД України.

Предмет дослідження — методи й математичні моделі масштабного відбору, автоматизованої генералізації та формування похідних представлень топографічних геопросторових даних, забезпечення їхньої просторової й

семантичної узгодженості, формалізації масштабних вимог у прикладних схемах та картографічної геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД.

Методи дослідження. Застосовано системний і порівняльний аналіз, теорію множин і відношень, дискретну математику, просторові предикати, методи картографічної генералізації та експериментальної перевірки геопросторових даних. Математична формалізація визначає масштабний відбір і допустимі геометричні перетворення. Результати зіставлено з семантичними вимогами відповідних класів топографічних об’єктів і шести похідних масштабів.

Засобами UML описано абстрактний клас TopographicObject, від якого успадковуються спільні атрибути, і тематичні пакети шести розроблених прикладних моделей відповідно до ДСТУ ISO 19110:2017 «Географічна інформація. Методологія каталогізації об’єктів» і ДСТУ ISO 19131:2019 «Географічна інформація. Специфікація геопросторового продукту» [9; 10; 11; 12].

Експериментальні методи включали картометрію, перевірку валідності, оцінювання площ і довжин, аналіз просторових перетинів та порівняння вихідних і генералізованих геометрій. Порогові значення відбору перевіряли на контрольних прикладах (додаток Д, п. Д.2). Для лінійних об’єктів експериментально перевірено алгоритм Дугласа – Пекера (Douglas–Peucker); алгоритм Вісвалінгама – Вайатта (Visvalingam–Whyatt), що оцінює вершини за ефективною площею, включено до методу геометричного спрощення як альтернативний алгоритм із тими самими метричними і топологічними обмеженнями. Для полігональних об’єктів — забудови, кварталів, водойм і рослинності — перевіряли відбір за площею, агрегування кварталів та обмеження зміни геометричних представлень, без автоматичного прийняття кожного обчисленого кандидата. Реалізацію прикладних схем, пряме й каскадне формування масштабів і порівняння алгоритмів спрощення досліджено в середовищі PostgreSQL/PostGIS.

Експериментальну перевірку виконано на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 на Національному геопорталі НІГД. Оцінювали відповідність похідних наборів установленим масштабним правилам, збереження походження об’єктів та їх геометричну, семантичну й топологічну узгодженість.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі одержано нові наукові результати, спрямовані на розвиток геоінформаційних методів і моделей геовізуалізації на Національному геопорталі Національної інфраструктури геопросторових даних.

— розроблено математичну модель генералізації об’єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів, критерії відбору в яких враховуються просторові характеристики, семантичні ознаки, функціональне призначення та статус об’єктів, що дозволяє формалізувати правила відбору та трансформації просторових властивостей об’єктів при зміні масштабу візуалізації топографічних основ;

— розроблено каталоги класів об’єктів та уніфіковані моделі у формі прикладних схем Специфікацій наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 для класів Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation) на основі пооб’єктного підходу, де всі масштабні рівні інтегровано у структуру зазначених класів за допомогою системних атрибутів і довідників, що забезпечує автоматизовану генералізацію об’єктів цих класів для всіх масштабних рівнів як похідних від базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000;

— удосконалено методи формування похідних масштабних представлень, у яких послідовно відокремлено рішення про включення об’єкта, визначення допустимої геометрії та роздільної здатності, застосування операторів генералізації та контроль результату, що забезпечує

просторову та семантичну узгодженість усіх картографічних представлень просторових об’єктів всього масштабного ряду 1:25 000 – 1:1 000 000.

Теоретичне значення одержаних результатів. Теоретичне значення полягає у формалізації зв’язку між базовою топографічною моделлю, участю об’єктів у похідних масштабних наборах, операторами геометричних перетворень та узгодженими похідними представленнями. Застосовано апарат дискретної математики й предикатів. Математична модель пов’язує множини класів об’єктів, екземплярів та масштабів із перевірюваними умовами, що визначають можливість включення конкретного об’єкта до похідного набору. Геометричну трансформацію відокремлено від критерію відбору. У цій структурі класифікація, генералізація, символізація й контроль становлять різні формальні операції, між якими зберігається логічний зв’язок через властивості топографічного об’єкта.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження доведено до двох взаємопов’язаних форм практичного використання: формалізації методів і моделей у проєкті документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» та їх програмно-технологічної апробації на Національному геопорталі НІГД. Розроблені здобувачем критерії масштабного відбору, допустимі геометричні перетворення й правила контролю забезпечують відтворювану підготовку похідних наборів топографічних геопросторових даних на основі базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

Використання результатів роботи. Результати використано в діяльності ДП «НДІГК» під час розроблення та апробації технологічних рішень Національного геопорталу НІГД для багатомасштабного представлення топографічних даних. Експериментальні перевірки виконано на Національному геопорталі НІГД з використанням контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

Предметом пооб’єктних перевірок стали Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation), для яких визначено масштабні умови формування відповідних похідних геометричних представлень. Контроль включав допустимість геометрії, семантичні обмеження, збереження TOID, групове походження за відношенням Lin, яке фіксує TOID усіх вихідних об’єктів агрегованого представлення, та відповідність правил символізації масштабним особливостям кожного класу об’єктів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійним науковим дослідженням Зіненка Р. О. Здобувачем сформульовано науково-прикладне завдання, розроблено математичну модель генералізації об’єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів і вдосконалено методи формування похідних масштабних представлень [4]. Модель пов’язує масштабну участь конкретного об’єкта з його просторовими характеристиками, семантичними ознаками, функціональним призначенням та статусом. Самостійно визначено послідовність відбору, зміни геометрії, збереження походження й контролю узгодженості.

Положення дослідження формалізовано для представлення кожного об’єкта в кількох масштабах. Вони включають рішення про участь об’єкта у похідному наборі, допустиме геометричне представлення і роздільну здатність, застосовний оператор генералізації та незалежний контроль результату. Простежування походження забезпечено з урахуванням TOID та дослідницького відношення Lin. Наукове обґрунтування цих процедур наведено в розділі 2, а завершену апробацію — у розділі 3.

Особисті наукові результати Зіненка Р. О. використано під час підготовки проєкту нормативно-технічного документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» (додаток А). Проєкт готували спільно з Ю. О. Карпінським, Н. Ю. Лазоренко та Д. О. Кінем. Особистий

внесок здобувача охоплює каталоги класів об’єктів і прикладні моделі для класів Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation), а також обґрунтування їх масштабно залежного відбору, генералізації та геовізуалізації [13].

Каталоги інших класів топографічних об’єктів підготували співавтори; підсумкове узгодження структури документа, прикладних схем та довідників виконано спільно.

На Національному геопорталі НІГД виконано експериментальну перевірку шести розроблених моделей на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 (розділ 3).

Апробація результатів дослідження. Апробація охоплювала наукове оприлюднення та експериментальні випробування. На TAIEX Expert Mission on National Spatial Data Infrastructure Development and Functioning in accordance with the INSPIRE, що відбувалася онлайн 9–10 жовтня 2023 року, здобувач виступив із доповіддю «Презентація пілоту національного геопорталу НІГД».

На XXVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2025» (Львів–Брюховичі, 9–11 квітня 2025 року) оприлюднено одноосібні тези про використання WMTS на Національному геопорталі НІГД [14]. Відповідну тему розкрито також у статті [15].

На International scientific-practical conference “Topical issues of science, education and technology: theory and practice” (Орхус, 18 квітня 2025 року) опубліковано одноосібні тези щодо WMS [16]. Дослідження стосувалося формування картографічних запитів, отримання зображень та використання розподілених сервісів перегляду геопросторових даних і метаданих у середовищі національної інфраструктури геопросторових даних.

На 29th AGILE Conference on Geographic Information Science (Тарту, Естонія, 16–19 червня 2026 року) опубліковано матеріали стендової доповіді

(Poster Track) з дослідження числових методів аналізу різнорідних геопросторових даних [17]. Текст розміщено у репозитарії Zenodo.

Експериментальну апробацію завершено на Національному геопорталі НІГД. Під час перевірок підтверджено роботу методів масштабного відбору, генералізації, обліку походження, контролю топологічних відношень, символізації та доступу через сервіси до підготовлених топографічних представлень. Одержані результати систематизовано в розділі 3.

Публікації. Основні результати дослідження опубліковано у восьми наукових працях, серед яких п’ять статей у фахових журналах України [4; 13; 15; 18; 19] та три конференційні роботи [14; 16; 17].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 258 сторінок, з яких 166 становлять основну частину, містить анотації українською й англійською мовами, список опублікованих праць, зміст, перелік умовних позначень, вступ, три розділи (47 рисунків і 55 таблиць основної частини), загальні висновки, список із 94 використаних джерел і шість додатків. Науковий виклад послідовно розкриває проблему, математичні та прикладні результати здобувача, їхню експериментальну перевірку і практичне використання.

У розділі 1 досліджено стан геовізуалізації та картографічної генералізації, підходи до формування множинних масштабних представлень і способи доступу до геопросторових даних і метаданих. На цій основі обґрунтовано нерозв’язану науково-прикладну проблему. Розділ 2 присвячено розробленню математичної моделі, масштабних предикатів, методів генералізації й контролю, а також повних прикладних моделей шести класів топографічних об’єктів. У ньому викладено їхні прикладні UML-фрагменти, класи атрибутів, довідники, масштабні й топологічні умови.

У розділі 3 подано експериментальну перевірку на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Розглянуто результати для шести класів, перевірку просторової узгодженості й картографічного оформлення та застосування сервісів WMS, WMTS і WFS,

а також визначено межі підтверджених експериментом висновків і практичне використання результатів дослідження (додаток А).

Шість додатків містять супровідні матеріали дослідження. У додатку А наведено паспорт проєкту документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» (редакція v1.0 від 10 жовтня 2026 року). Повний текст проєкту розміщено в окремих томах 2.1 і 2.2, які разом утворюють додаток А. Додаток Б містить публікації здобувача й матеріали апробації, а додатки В та Г — документи щодо використання результатів. У додатку Д подано шість тематичних частин протоколів, а в додатку Е — п’ять частин апробації картографічного оформлення та сервісів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ГЕОВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ ГЕОПОРТАЛІВ

1.1 Геовізуалізація як складова національної інфраструктури геопросторових даних

Геовізуалізація в національній інфраструктурі геопросторових даних спирається на три складові: бази топографічних даних, організацію самої інфраструктури та сервісний доступ до ресурсів.

У праці А. А. Лященка та А. Г. Черіна бази топографічних даних визначено основою накопичення, зберігання, опрацювання й використання геоінформаційних моделей в уніфікованих форматах для інтегрування різних інструментальних геоінформаційних систем [20].

Національна інфраструктура геопросторових даних поєднує ресурси різних держателів через узгоджені моделі, метадані та сервіси [1; 21]. Національний геопортал НІГД організує їх пошук, перегляд і використання у спільному інформаційному середовищі [2]. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» визначає базові геопросторові дані як загальнодоступні геопросторові дані, що складають уніфіковану цифрову координатно-просторову основу, а національний геопортал — як офіційний геопортал національної інфраструктури геопросторових даних (ст. 1) [1]. Статтею 7 Закону передбачено геоінформаційні сервіси пошуку, перегляду, доступу (зокрема завантаження) і перетворення [1], а порядок функціонування інфраструктури встановлено постановою Кабінету Міністрів України від 26.05.2021 № 532 «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних» [21]. Створення топографічних карт і баз геопросторових даних належить до топографо-геодезичної і картографічної діяльності [22].

Топографічна основа надає просторовий контекст, у якому тематичні відомості можна співвіднести з об’єктами місцевості та їхнім взаємним розташуванням. Таке зіставлення потребує сумісних систем координат, чітко

заданої семантики й відомостей про актуальність даних, що надходять від різних держателів [23]. На рисунку 1.1 показано місце геовізуалізації в цій взаємодії: картографічний образ формується на основі ресурсів, доступних через сервісні інтерфейси геопорталу.



Рисунок 1.1 – Місце геовізуалізації у сервісно-орієнтованій архітектурі НІГД
Джерело: сформовано автором за Технічним проєктом Національного геопорталу [2].

1.1.1 Поняття та функції геовізуалізації геопросторових даних

У праці A. M. MacEachren і M.-J. Kraak [24] геовізуалізацію розглянуто як поєднання картографічного представлення з візуальним дослідженням та аналізом геопросторових даних. Карта тут не лише передає відомості. Вона допомагає користувачеві виявляти просторові зв’язки, порівнювати стани території та формулювати дослідницькі припущення. Для топографічної основи ці функції зберігаються лише тоді, коли зміст залишається узгодженим під час переходу між масштабами: щоб користувач розпізнавав ту саму територію за зміненої деталізації, зміну вікна перегляду, відбір об’єктів і перетворення геометрії розглядають як різні операції.

У праці R. E. Roth [25] картографічну взаємодію пов’язано із завданнями користувача, властивостями інтерфейсу та операціями, що дають змогу досліджувати географічну інформацію. Для багатомасштабної карти звідси постає важливе питання: як інтерактивне масштабування співвідноситься з підготовленим змістом кожного представлення? Відбір об’єктів, збереження

деталей і вибір знаків задаються правилами підготовки даних. Їх доводиться узгоджувати з інтерактивною зміною масштабу.

Масштаб у такій постановці — не лише параметр перегляду. Перетворення топографічного об’єкта під час зміни масштабу в роботі визначають його клас, властивості, допустима геометрія та правила картографічної генералізації [6; 7]. Через це геовізуалізацію досліджено як кероване формування й інтерактивне відтворення картографічного представлення з простежуваними перетвореннями та заданими умовами використання. Рисунок 1.2 узагальнює відмінності між картою фіксованого масштабу та керованим формуванням картографічного представлення у середовищі НІГД.

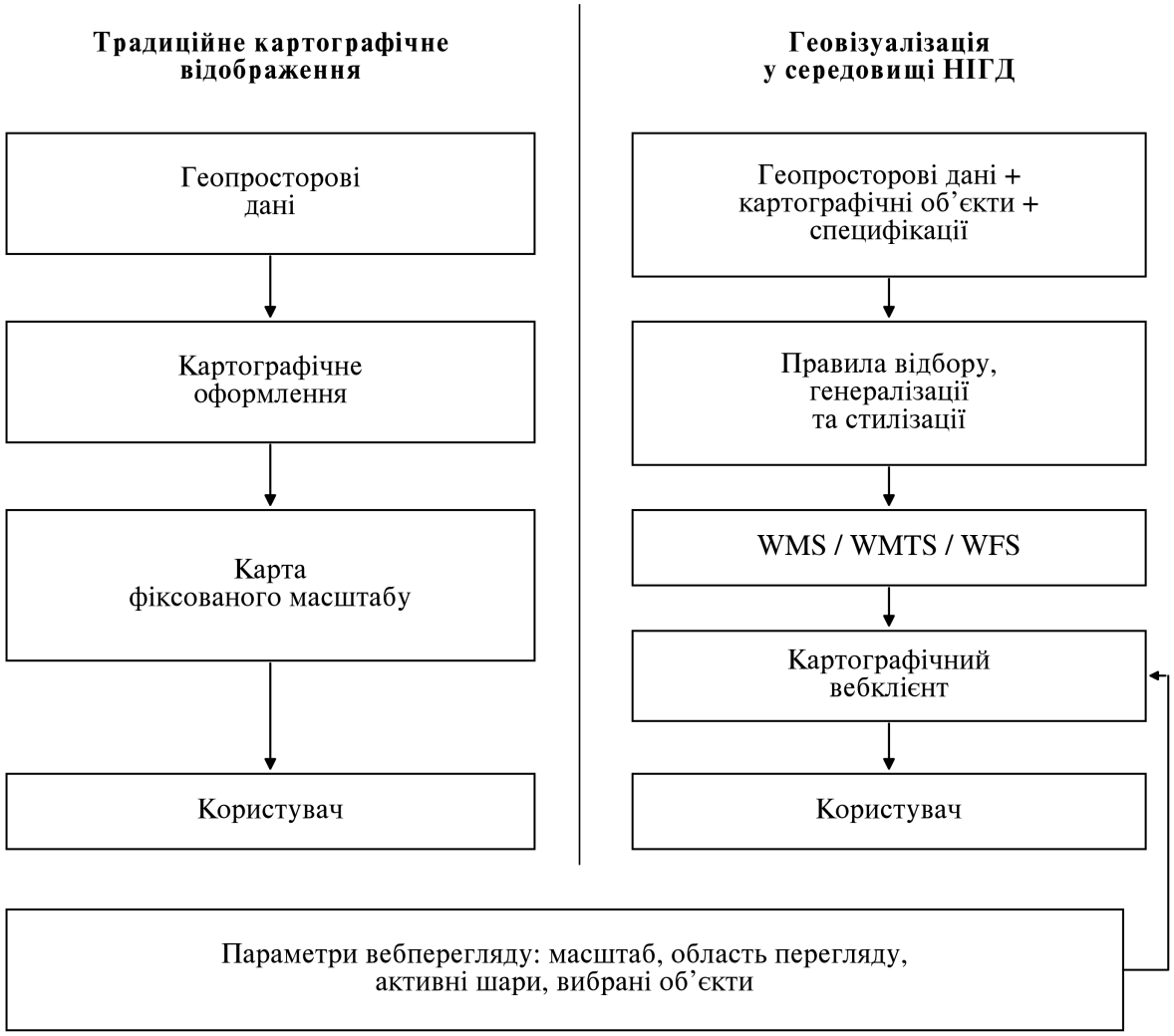


Рисунок 1.2 – Відмінність традиційного картографічного відображення від геовізуалізації у середовищі НІГД

Джерело: розроблено автором.

1.1.2 Геопортал як середовище доступу та геовізуалізації геопросторових даних

У розподіленій НІГД геопортал є спільною точкою виявлення ресурсів, тоді як вихідні набори можуть підтримуватися в системах держателів [21]. Ще до картографічного перегляду метадані характеризують зміст, охоплення, походження та умови використання ресурсу [26; 27]. Для топографічних даних ці відомості окреслюють межі коректного зіставлення. Однакова територія на двох картах може бути подана з різною деталізацією, часовою актуальністю та повнотою об’єктного складу.

Сервісна архітектура Національного геопорталу розмежовує зберігання даних, опис ресурсів, мережевий доступ і клієнтське відображення, що дає змогу підключати набори з різних інформаційних систем [2]. Звідси випливає вимога до моделі геовізуалізації: зміст і масштабне представлення повинні залишатися однозначними незалежно від каналу отримання.

У сервісно-орієнтованій архітектурі взаємодію постачальника, каталогу й користувача описують схемою «публікація — пошук — виклик» (publish — find — bind). Постачальник публікує опис ресурсу в каталозі, а користувач знаходить його через пошук і звертається до сервісу безпосередньо. Зосереджувати самі дані в каталозі, отже, не обов’язково [23].

1.1.3 Інтероперабельність геопросторових даних і геоінформаційних сервісів

Інтероперабельність охоплює технічну взаємодію, синтаксис повідомлень, тлумачення сутностей та організаційні правила супроводження ресурсів [28]. Для багатомасштабної основи цього замало. Тут додається узгодження ідентичності, геометрії та об’єктного змісту похідних представлень.

Стандарти ISO серії 19100 «Географічна інформація» визначають прикладні схеми й каталоги [9; 10], просторові властивості та якість даних [29; 30]. Пороги відбору для конкретних класів і допустимі зміни геометричного представлення задає специфікація геопросторового продукту (ДСТУ ISO

19131) [12]. Взаємодію компонентів інтероперабельності узагальнено на рисунку 1.3.

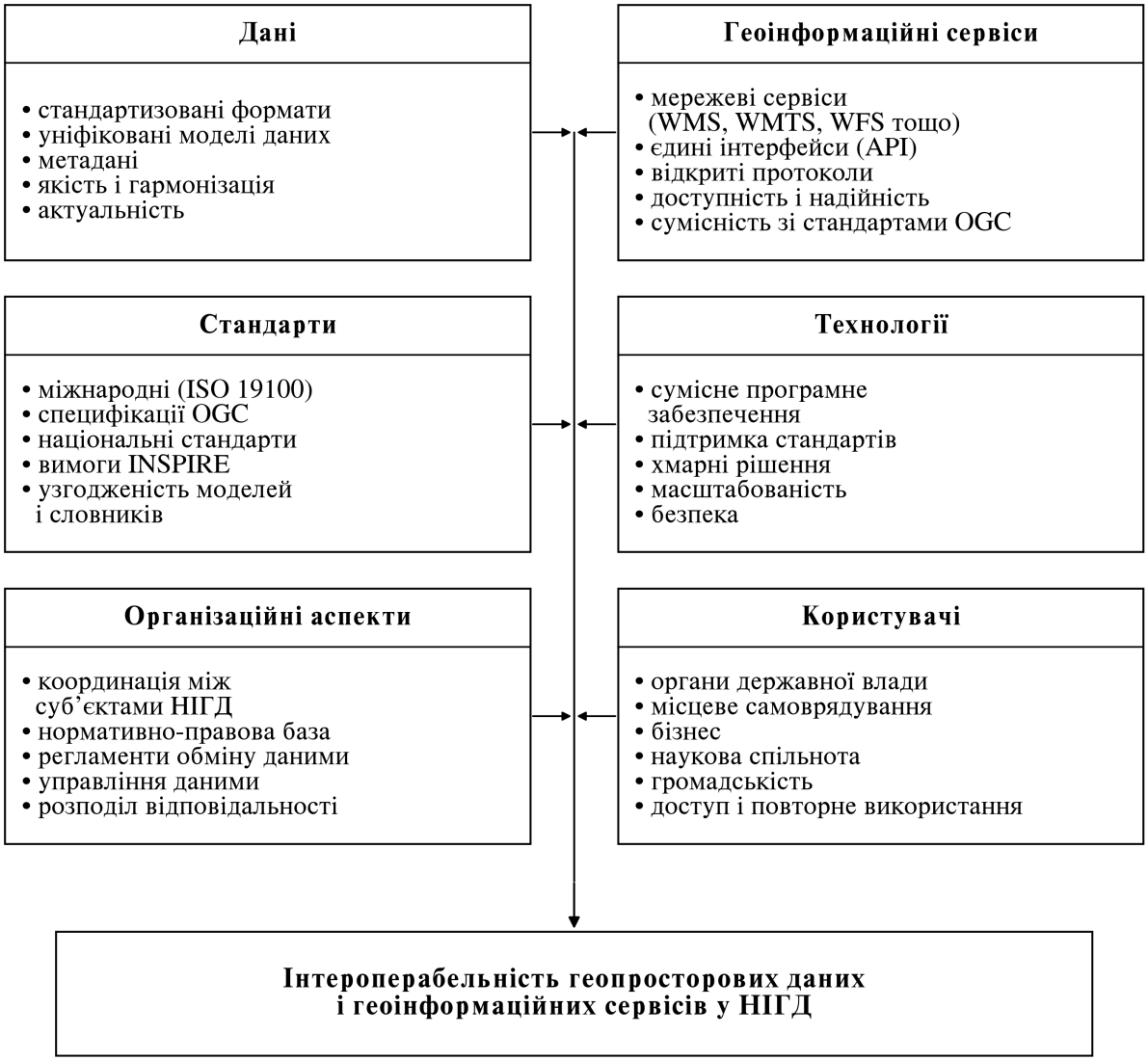


Рисунок 1.3 – Складові інтероперабельності геопросторових даних і геоінформаційних сервісів у НІГД

Джерело: розроблено автором за узагальненням рівнів інтероперабельності [28].

Специфікації OGC визначають сервісні інтерфейси, а Директива 2007/2/ЄС INSPIRE поєднує вимоги до обміну просторовими даними в європейській інфраструктурі [31; 32]. Координатна узгодженість, однак, вимагає самостійного опису референцних систем та операцій перетворення: мережевий протокол не усуває відмінностей між координатними описами [33]. Інтероперабельність має й часовий вимір. Після зміни вихідних даних, прикладної схеми або стилю раніше підготовлене картографічне

представлення може втратити відповідність ресурсу, тож передбачений Технічним проєктом створення Національного геопорталу НІГД моніторинг сервісів слід поєднувати з обліком актуальності наборів і залежностей між базовими та похідними представленнями [2].

1.2 Геоінформаційні сервіси геовізуалізації та доступу до геопросторових даних

Сервісний інтерфейс визначає спосіб запиту й інформаційний склад відповіді, яку одержує клієнт геопорталу. WMS надає картографічне зображення, WMTS — фрагмент заданої тайлової матриці, а WFS — геопросторові об’єкти за оголошеною схемою [32; 34; 35]. У термінах статті 7 Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» WMS і WMTS реалізують сервіси перегляду, а WFS — сервіси доступу (завантаження) [1]. Для дисертаційного завдання важливо встановити зв’язок кожного результату з похідним топографічним представленням.

Крім стандартних сервісів OGC, геопортали використовують REST API та векторні тайли. Архітектурний стиль і формат кодування мають різні функції: REST задає обмеження мережевої взаємодії [36], а векторні тайли передають підготовлені геометрії для клієнтського відображення [2]. Усі канали доступу зіставлено в таблиці 1.3 за складом відповіді, збереженням властивостей і місцем виконання символізації.

1.2.1 Вебсервіс картографічних зображень WMS

WMS формує картографічне зображення для просторового вікна, розмірів кадру та стилів, установлених у запиті [32]. Специфікація WMS 1.3.0 визначає обов’язкові операції GetCapabilities і GetMap та опціональну GetFeatureInfo, а їхні функції відображено також у міжнародному стандарті ISO 19128:2005 «Geographic information — Web map server interface» [37]. Властивості вихідних об’єктів можуть впливати на побудову карти. Проте відповідь GetMap — це вже результат картографічного відображення, і доступ

до нього слід відрізняти від отримання геометрії й атрибутів за прикладною схемою даних.

Таблиця 1.1 розмежовує опис сервісу, картографічне зображення та відомості в позиції запиту. Виконання GetMap і відповідність масштабного відбору оцінюють за різними критеріями: перше регламентовано інтерфейсом WMS [32], друге — правилами топографічної моделі.

Таблиця 1.1 – Операції WMS та функції їхніх відповідей

Операція	**Наявність**	**Результат**
GetCapabilities	Обов’язкова	XML-опис сервісу, шарів, форматів, стилів і координатних систем.
GetMap	Обов’язкова	Картографічне зображення заданої території з визначеними розмірами й оформленням.
GetFeatureInfo	Опціональна	Відомості про об’єкти в позиції пікселя для шарів, які підтримують опитування.

Джерело: сформовано автором за [32].

Документ GetCapabilities задає допустимий контекст звернення: доступні шари, стилі, формати та системи координат конкретного сервісу [32]. Його значення для дослідження полягає у відтворюваності запиту: однакову назву шару потрібно пов’язати з однаковим змістом, стилем і координатним описом.

У WMS 1.3.0 порядок координат BBOX відповідає осям заявленої системи; для системи координат WGS 84 (EPSG:4326) це широта, потім довгота [32]. Помилка порядку змінює запитану територію. Для зіставлення відповідей фіксують BBOX, систему координат, розміри кадру, стиль та масштабне представлення джерела.

GetFeatureInfo надає відомості в контексті зображення та позиції запиту; її інформаційний склад залежить від того, чи підтримує шар опитування, і від установленого формату відповіді [32]. Наведений у дослідженні Національного геопорталу приклад опитування кадастрового об’єкта підтверджує саме цю функцію сервісу [18]. Отже, WMS дає змогу відтворити контекст запиту. Але з готового зображення не завжди видно, чому об’єкт відсутній: це з’ясовують за вихідними даними й правилами відбору.

Операції WMS, параметри запитів і суміщення карт із розподілених сервісів розглянуто в тезах [16], а результати дослідження WMS Національного геопорталу [18] використано в підрозділі 2.7.

1.2.2 Вебсервіс картографічних тайлів WMTS

WMTS надає картографічний фрагмент, положення якого зафіксоване в наперед заданій тайловій матриці [34]. Повторювана адресація створює передумови для кешування та повторного використання зображень.

Таблиця 1.2 містить параметри, що пов’язують ідентифікатор тайла з його просторовим положенням. Вони задають організацію сервісного зображення. Відбір топографічних об’єктів і деталізація їхньої геометрії підпорядковані іншим правилам.

Таблиця 1.2 – Параметри просторової організації та адресації тайлів WMTS

Параметр	**Функція**
TileMatrixSet; SupportedCRS	Ідентифікація набору матриць та його єдиної референцної системи координат.
TileMatrix	Ідентифікація матриці одного рівня роздільної здатності.
ScaleDenominator	Номінальний знаменник масштабу матриці, визначений для стандартного пікселя розміром 0,28 × 0,28 мм.
TopLeftCorner	Координати верхнього лівого кута матриці в системі координат набору.
TileWidth; TileHeight	Ширина та висота окремого тайла в пікселях.
MatrixWidth; MatrixHeight	Кількість тайлів у матриці по горизонталі та вертикалі.
TileRow; TileCol	Номери рядка і стовпця запитуваного тайла в обраній матриці.

Джерело: сформовано автором за [34].

ScaleDenominator визначено для стандартного пікселя 0,28 × 0,28 мм [34]; фактичний розмір екрана не змінює цього означення. TopLeftCorner задає початок матриці, а TileRow і TileCol — індекси тайла з нумерацією від нуля. Ці параметри визначають просторовий контекст, необхідний для зіставлення тайлів WMTS із відповідями WMS для тієї самої території (підрозділ 3.5).

Клієнт установлює доступні шари, стилі й матриці за метаданими сервісу, після чого запитує тайл через передбачений інтерфейс операцій або ресурсний шаблон [34]. Поширені позначення ZOOM та схеми адресування

стають придатними для наукового порівняння лише після зіставлення з оголошеною матрицею, її системою координат і просторовим розрізненням.

Стандарт WMTS допускає як попереднє формування тайлів, так і їх створення за потреби з подальшим кешуванням [34]. В обох випадках діє одне обмеження. Збережений фрагмент є похідним від конкретного стану геопросторових даних і правил зображення, тож після їх актуалізації кеш доводиться оновлювати, інакше користувач одержуватиме картографічний образ попереднього стану території. Відсутність об’єкта в тайлі може бути наслідком відбору, стилю або неактуального кешу. З огляду на це перевірка WMTS охоплює прив’язку, параметри матриці та відповідність зображення зафіксованому стану джерела.

Вимоги до операцій WMTS і параметрів тайлового представлення Національного геопорталу викладено в тезах [14] і статті [15]; відповідність рівнів масштабування шести похідним масштабам [38] розглянуто в підрозділі 2.7.

1.2.3 Сервіси доступу до векторних геопросторових даних

WFS орієнтований на отримання геопросторових об’єктів, їхньої геометрії та властивостей за оголошеною схемою [35]. Клієнт одержує саме дані. Подальший аналіз і картографічне оформлення він виконує сам, у межах фактично отриманого складу даних, і саме тому важливо, що стандарт WFS 2.0.2 розрізняє класи відповідності, які визначають підтримувані операції й можливості запитування. Назва протоколу ще нічого не гарантує. Придатність сервісу для перевірки похідного топографічного набору встановлюють за його схемою, ідентифікаторами об’єктів і доступними запитами.

GetCapabilities описує можливості WFS, DescribeFeatureType — структуру типів, а GetFeature повертає об’єкти за підтримуваним запитом [35]. Клас Simple WFS обмежує читання збереженими запитами, Basic WFS розширює можливості вибірки, а операції зміни даних винесено до самостійного класу Transactional WFS. Читання й редагування, отже, оцінюють незалежно.

REST характеризує організацію взаємодії з ресурсами; властивості конкретного ресурсу визначає прикладний інтерфейс [36]. Відповідь у форматі GeoJSON може містити геометрію та атрибути, проте їхня повнота залежить від установленої схеми й умов запиту, а повторне використання топографічних даних вимагає знати правила ідентифікації, значення властивостей і межі вибірки. Ці відомості має фіксувати документація сервісу.

Векторні тайли передають підготовлені для клієнтського відображення геометричні та атрибутивні компоненти [2], і зміна стилю такого представлення не відновлює деталей, вилучених під час підготовки тайла. Стандарти OGC API розвивають доступ до колекцій об’єктів і тайлів через установлені класи відповідності [39; 40]. Вони можуть надавати підготовлені масштабні представлення, але правила відбору й перетворення об’єктів і тут залишаються складовою моделі даних.

У таблиці 1.3 зіставлено інформаційний склад відповідей та функціональні межі каналів доступу. Придатність каналу залежить від завдання клієнта.

Таблиця 1.3 – Функціональні відмінності способів доступу через сервіси

Технологія	**Що отримує клієнт**	**Функціональна межа**
WMS [32]	Картографічне зображення території.	Не замінює цифрової моделі об’єктів.
WMTS [34]	Картографічний тайл із визначеної матриці.	Не відтворює повної моделі вихідного об’єкта.
WFS [35]	Геометрію, ідентифікатори й атрибути за схемою та запитом.	Операції визначаються класом відповідності сервісу.
REST API [19; 36]	Представлення ресурсу, зокрема у форматі GeoJSON.	Схему ресурсу та доступні операції визначає контракт конкретного API.
VectorTile [2]	Векторні тайли для клієнтського відображення.	Не є тотожним об’єктному інтерфейсу WFS.

Джерело: систематизовано автором за [2; 19; 32; 34; 35; 36].

1.3 Сучасний стан і тенденції застосування сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації в Україні

Українська практика геопорталів показує співіснування різних способів публікації геопросторових даних і метаданих [19]. Для дослідження геовізуалізації істотне їх співвідношення з об'єктним змістом, масштабною деталізацією та повторним використанням даних.

Публікація здобувача поєднує аналіз архітектури Національного геопорталу з кількісним порівнянням шести міських систем [19]. На національному рівні досліджено інтеграцію ресурсів, на місцевому — способи їх публікації.

1.3.1 Порівняльний аналіз геоінформаційних сервісів Національного та місцевих геопорталів

У дослідженій реалізації Національного геопорталу НІГД зовнішні картографічні ресурси підключалися через WMS і WMTS [19]; для місцевих геопорталів виконано кількісне порівняння способів публікації наборів. Стандарт ISO 19119:2016 «Geographic information — Services» [41] розмежовує опис функції сервісу та способу її реалізації. Для топографічної основи з цього випливає практичне правило: перевіряти треба всю послідовність від виявлення ресурсу до одержання представлення. Назва інтерфейсу не засвідчує, що сервіс надає представлення потрібного масштабу [2].

Кількісне порівняння охопило геопортали Чернівців, Житомира, Львова, Рівного, Ужгорода та Хмельницького [19]. Стаття подає кількість наборів, опублікованих засобами WMTS, REST API з GeoJSON та VectorTile. Це вибірка шести місцевих систем, яка характеризує зафіксовані в них способи постачання ресурсів.

Одиницею порівняння є публікація набору певним способом. Оскільки той самий набір може мати кілька інтерфейсів, кількості обліковано для кожного каналу доступу поодинці; значення відтворюють опубліковане спостереження [19]. Таблиця 1.4 подає ці значення для кожного геопорталу за

первинною публікацією [19], а підсумковий рядок містить суми наявних значень за кожним способом публікації.

Таблиця 1.4 – Кількість наборів у межах окремих каналів публікації на досліджених міських геопорталах

Геопортал / ГІС	**WMTS**	REST API (GeoJSON)	**VectorTile**
Чернівецька міська рада	2	30	30
Житомирська міська рада	26	77	77
Львівська міська рада	37	8	8
Рівненська міська територіальна громада	9	11	9
ГІС «Активи міста Ужгород»	5	22	22
Хмельницька міська рада	160	40	—
Сума відомих значень	239	188	146

Джерело: згруповано за [19, с. 38, табл. 1]; підсумки обчислено автором.

Примітка. Тире у стовпці VectorTile для Хмельницького означає відсутність наведеного значення, а не нуль. Сума в цьому стовпці охоплює п’ять геопорталів.

Співвідношення каналів публікації істотно відрізняється між містами: у Хмельницькому переважають ресурси WMTS, у Житомирі — REST API і VectorTile [19].

Картка набору «Будівлі та споруди» Житомирської міської ради поєднує сервісні ресурси, API, файлове завантаження й метадані (рис. 1.4) [19]. Знімок фіксує інтерфейс періоду дослідження. Узгодженість ідентифікаторів та атрибутів між каналами потребує окремої перевірки.

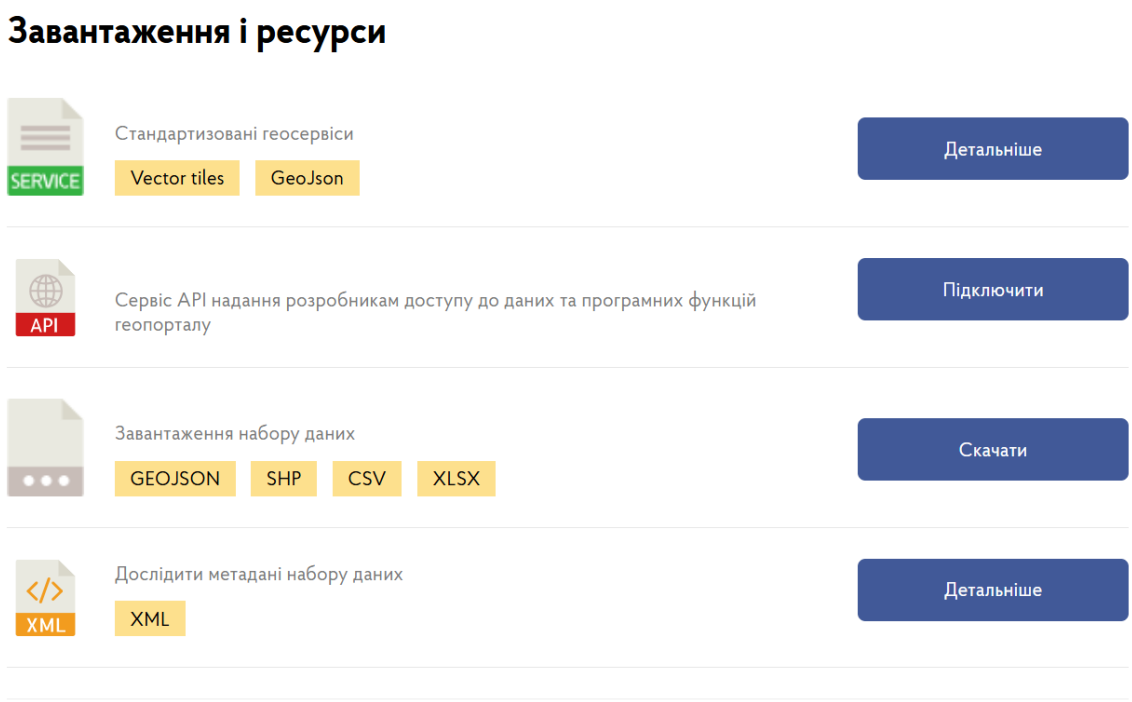


Рисунок 1.4 – Блок завантаження і ресурсів набору «Будівлі та споруди» геопорталу Житомирської міської ради

Джерело: геопортал Житомирської міської ради; фрагмент знімка з публікації [19, с. 37, рис. 3].

У сервісному блоці зазначено Vector tiles і GeoJSON, у завантаженнях — SHP, CSV, XLSX та GeoJSON; XML стосується метаданих. Повторення GeoJSON у різних блоках розмежовує формат кодування та спосіб одержання ресурсу.

Іншу сторону взаємодії ілюструє API Server геопорталу Хмельницької міської ради на рисунку 1.5 [19]. Його інтерфейс містить параметри вибірки, обмеження кількості записів і фільтрування. Приклад показує перехід від вибору способу завантаження до формування запиту з явно заданими умовами отримання ресурсу.

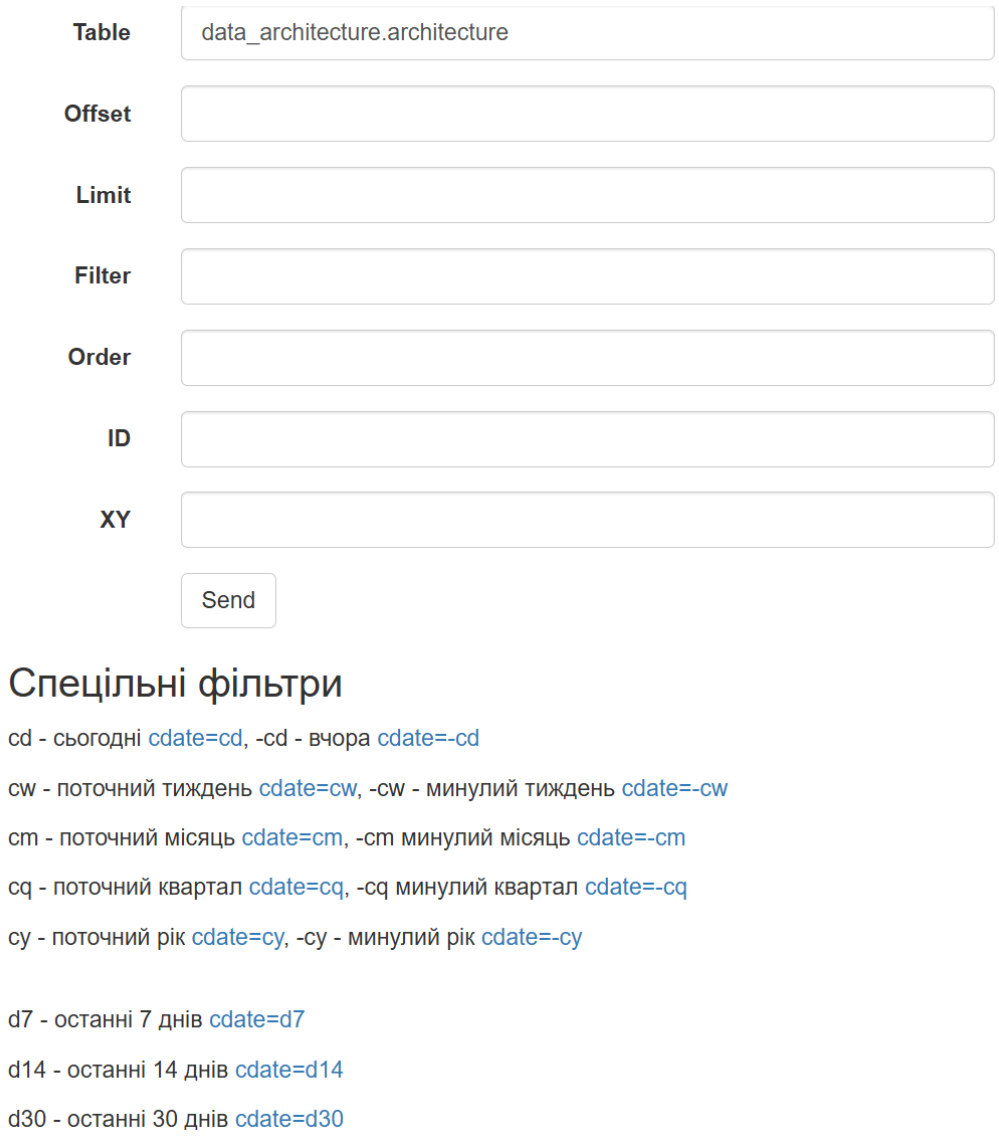


Рисунок 1.5 – Фрагмент інтерфейсу API Server геопорталу Хмельницької міської ради
Джерело: геопортал Хмельницької міської ради; фрагмент знімка з публікації [19, с. 38, рис. 4].

Поля Table, Filter, Limit та Offset задають джерело, відбір і межі вибірки; часові фільтри уточнюють контекст. Відтворюваність вимагає фіксувати ці параметри й версію набору. Такий API ще не засвідчує відповідності WFS.

Стаття містить якісний висновок про недостатню поширеність WFS у дослідженій вибірці [19]. Кількісний розподіл цього інтерфейсу треба встановлювати додатковим обстеженням, оскільки таблиця 1.4 охоплює WMTS, REST API та VectorTile.

1.3.2 Проблеми та тенденції розвитку сервісів геовізуалізації і доступу до геопросторових даних

Порівняння в пункті 1.3.1 виявило три проблеми: різнорідність каналів публікації, недостатню поширеність WFS і потребу окремо перевіряти узгодженість ідентифікаторів та атрибутів між каналами. Водночас розвиваються стандарти, які поєднують виявлення ресурсу з його використанням.

Зокрема, стандарт OGC API — Records розвиває каталогізацію через описи й пошук ресурсів [42]. Для розглянутих геопорталів [19] це доповнює вже наявний перехід до інтерактивного перегляду та програмного доступу.

Семантична сумісність оприлюднених шарів залежить від спільного тлумачення класів, ідентифікаторів і властивостей об’єктів [23]. Спільні настанови W3C і OGC «Spatial Data on the Web Best Practices» пов’язують повторне використання просторових даних у вебі зі сталими ідентифікаторами, зв’язками, придатними геометріями та метаданими [43]. У специфікації геопросторового продукту, зокрема в проєкті Специфікацій [38], ці загальні рекомендації конкретизуються вимогами до певних класів топографічних об’єктів.

Методичні наслідки спостережень систематизовано в таблиці 1.5. Вони пов’язують сервісну публікацію з вимогами до змісту й походження даних.

Таблиця 1.5 – Спостереження за сервісною публікацією та методичні наслідки огляду

Спостереження або напрям, визначений за оглядом	Методичний наслідок для геовізуалізації
Різні співвідношення технологій публікації.	Окремо оцінювати картографічний перегляд і машинне одержання об’єктів.
Якісно встановлена недостатня поширеність WFS у дослідженій вибірці.	Не ототожнювати REST API або VectorTile зі стандартним WFS.
Пошук і доступ через метадані.	Узгоджувати опис ресурсу та спосіб його отримання.
Бази даних множинного представлення (MRDB) та автоматизація генералізації як напрям розвитку.	Формувати узгоджені масштабні представлення даних.

Джерело: узагальнено автором за [13; 19; 44].

Окрім передбаченого Технічним проєктом моніторингу мережевих сервісів (пункт 1.1.3) [2], для похідної топографічної основи потрібен облік вихідного стану й версії правил, оскільки зміна джерела може потребувати повторного відбору, перетворення геометрії або оновлення умовного знака.

Виявлені проблеми зумовлюють потребу в моделях множинного представлення та автоматизованій генералізації, які розглянуто в підрозділі 1.4. Моделі множинного представлення описують залежності між різнодетальними станами об’єктів [6]. Автоматизована генералізація визначає спосіб їх отримання, а ідентифікація й контроль — простежуваність для різних каналів постачання.

1.4 Методи багатомасштабного представлення та генералізації топографічних геопросторових даних

Генералізація узгоджує зміст карти з масштабом. Вона змінює об’єктний склад, геометричну деталізацію та спосіб зображення відповідно до призначення карти, умов розрізнення об’єктів на карті й характерних просторових властивостей території [7].

M. Dumont, G. Touya і C. Duchêne дослідили шістнадцять прикладів багатомасштабних карт, аналізуючи зміни змісту, стилю та візуальної складності під час масштабної навігації [3]. Їхній підхід показує, що оцінювання переходу між масштабами потребує врахування способу сприйняття картографічних об’єктів, а не лише роздільності зображення. У дослідженні альтернативних переходів ті самі автори запропонували проміжні представлення як засіб зменшення відмінностей між картами; оцінювання користувачами на тому етапі залишалося запланованим [45].

1.4.1 Особливості картографічної генералізації в геоінформаційному середовищі

Традиційна картографічна генералізація виконується для конкретної карти або номенклатурного аркуша, а її результатом є автономний

картографічний продукт. Карти різних масштабів у такій парадигмі створюють і оновлюють окремо, тому зміна на місцевості потребує повторного опрацювання кожного масштабу. Прикладом виробництва, орієнтованого на окремий масштаб, є створення (оновлення) цифрової топографічної карти масштабу 1:50 000 та бази топографічних даних на територію України, організоване протягом 2018–2021 років у межах спільного українсько-норвезького проєкту [46].

Похідні масштаби можна одержувати двома способами. За каскадного (сходинкового, ladder) підходу кожен дрібніший масштаб генералізують із попереднього, тобто узагальнюють уже генералізовані дані; за прямого (зіркового, star) підходу всі масштаби формують з єдиної великомасштабної бази [47]. За каскадного підходу метричні й топологічні похибки та спрощення попереднього масштабу переходять до наступного й накопичуються. Прямий підхід зберігає зв’язок кожного похідного об’єкта з вихідним.

Геоінформаційна генералізація — це формалізований автоматизований перехід від єдиної вихідної бази топографічних даних до похідних масштабних наборів зі збереженням стійких ідентифікаторів топографічних об’єктів (TOID), відношення походження агрегованих об’єктів (Lin) і застосованих правил. Її відмінності від традиційної картографічної генералізації зведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняння традиційної картографічної та геоінформаційної генералізації

Ознака	**Традиційна картографічна генералізація**	**Геоінформаційна генералізація**
Вихідні дані	Карта попереднього масштабу або окремі матеріали для кожного аркуша	Єдина база топографічних даних масштабу 1:10 000
Одержання масштабу	Автономно або каскадно з попереднього масштабу	Безпосередньо з бази для кожного масштабу
Оновлення	Повторне редагування кожної карти	Повторне застосування правил до змінених об’єктів
Ідентичність об’єкта	Не простежується між масштабами	Зберігається через стійкий ідентифікатор TOID і відношення Lin
Форма правил	Інструкції та досвід картографа	Формальні предикати й оператори в прикладній схемі
Перевірюваність	Візуальна коректура	Автоматизований геометричний, семантичний і топологічний контроль

Джерело: узагальнено автором за [7; 8; 47; 48].

Традиційна парадигма зумовлює просторову невідповідність, дублювання зусиль під час оновлення та семантичні суперечності між похідними рівнями. Геоінформаційна генералізація усуває ці недоліки лише за наявності формальних правил відбору, допустимих геометричних перетворень і контролю результату. Системну модель топографічного картографування в НІГД, що передбачає створення наборів геопросторових даних у формі баз даних і баз знань, запропоновано в праці [48].

Цифрова генералізація поєднує перетворення моделі даних і підготовку картографічного зображення [7]. Склад, геометрія та відношення об’єктів мають узгоджуватися з розмірами й розташуванням знаків. У колективній монографії за редакцією D. Burghardt, C. Duchêne і W. Mackaness [49] вимоги користувача, специфікації, оператори та оцінювання пов’язано в єдиному процесі.

K. E. Brassel і R. Weibel пов’язали вибір операції з попередньою формалізацією структури географічного змісту [50]. R. B. McMaster і K. S. Shea систематизували потребу, умови та способи генералізації [51]. Обидва підходи

вимагають визначати об’єкт, оточення й мету перетворення до параметризації алгоритму.

Відбір визначає, які об’єкти зберігаються у похідному масштабному наборі. Метричні характеристики можуть бути складовою рішення, проте значущість дороги, водотоку або поселення залежить також від функціональної ролі, зв’язків і положення в просторовій структурі [51]. Класифікація та типізація узагальнюють категорії й характер розподілу об’єктів, тому скорочення їх кількості повинно зберігати істотні властивості явища, а не лише задовольняти однаковий числовий поріг для всіх класів.

Алгоритм Дугласа – Пекера (Douglas–Peucker) [52] відбирає вершини за відстанню, а алгоритм Вісвалінгама – Вайатта (Visvalingam–Whyatt) [53] — за площею локальних трикутників. Їхні параметри не еквівалентні навіть за однакового скорочення вершин. Рішення про включення об’єкта за його семантикою та допустиме геометричне представлення визначають незалежно від алгоритму спрощення. Згладжування коригує локальний характер контуру, а спрощення скорочує координатну деталізацію. Разом ці процедури змінюють форму й можуть вплинути на взаємне розташування об’єктів, тож оцінювання має враховувати не тільки кількість вершин, а й позиційні відхилення, збереження характерної форми та просторових відношень [54].

Оцінювання результату спрощення залежить також від точності картометричних обчислень. Залежність картометричних оцінок від математичної моделі обчислень, координатної основи й деталізації контуру розглянуто у праці [17]; це обґрунтовує роздільне врахування властивостей геометричного представлення та точності використаних числових методів.

Агрегування формує спільне представлення об’єктів зі спільними семантичними ознаками і потребує зв’язку з усіма вихідними об’єктами для підтримання MRDB [55]. Колапс змінює геометричну розмірність одиничного представлення. Ідентичність об’єкта зберігається, якщо клас і масштаб допускають таке перетворення (підрозділ 2.5) [38].

Переміщення та перебільшення дають змогу розрізнити важливі елементи, а випрямлення відтворює характерну форму певних антропогенних об’єктів; допустимі зміни визначаються картографічною метою і просторовими обмеженнями [51]. У таблиці 1.7 зіставлено функції операцій та вимоги до їх формалізації з урахуванням топографічного змісту й залежності від цільового масштабу.

Таблиця 1.7 – Класичні методи й операції картографічної генералізації та вимоги до їх формалізації

Класичний метод або операція	**Картографічне завдання**	**Обмеження для автоматизованої багатомасштабної геовізуалізації**	Вимога до формалізації
1	2	3	4
Відбір	Зменшення складу карти зі збереженням значущих об’єктів	Рішення не може ґрунтуватися лише на одному метричному порозі	Характеристичний предикат для класу, екземпляра і цільового масштабу
Класифікація; типізація	Узагальнення категорій; скорочення повторюваних елементів зі збереженням характерної структури	Потребує семантичного та просторового контексту	Правила класифікації та відбору представницьких об’єктів для кожного класу
Спрощення	Скорочення координатної деталізації	Не визначає, чи повинен об’єкт залишатися в наборі	Оператор застосовується після рішення про участь і геометричне представлення
Згладжування	Коригування локальної форми	Може зміщувати характерні деталі	Параметризована операція з подальшим контролем форми і топології
Агрегування	Формування спільного представлення кількох об’єктів	Можлива втрата семантики й походження	Збереження зв’язків з усіма вихідними об’єктами
Колапс	Зміна просторової розмірності	Не тотожний вилученню об’єкта	Окреме допустиме геометричне представлення для цільового масштабу

Класичний метод або операція	**Картографічне завдання**	**Обмеження для автоматизованої багатомасштабної геовізуалізації**	Вимога до формалізації
1	2	3	4
Переміщення	Усунення графічних конфліктів	Може порушити просторові відношення	Установлення меж зміщення та контролю просторових відношень
Перебільшення	Збереження важливої, але дрібної деталі	Геометрична точність поступається читабельності лише за обґрунтованої значущості	Масштабно залежне правило для визначених класів і станів
Випрямлення	Підтримання характерної форми забудови	Придатне не для всіх типів геометрії	Операція для визначених класів із перевіркою форми
Символізація	Формування читабельного картографічного образу	Не визначається лише геометрією	Окремі правила вибору знака та параметрів його відтворення

Джерело: систематизовано автором за [7; 50; 51; 52; 53; 55; 56; 57]; семантичні вимоги – за Специфікаціями [38].

K. M. Sielicka та I. Karsznia показали, як формалізовані правила специфікації використовуються для відбору поселень і дорожніх мереж із подальшим оцінюванням результатів [58]. Модель загального процесу генералізації L. Harrie і R. Weibel [56] узгоджує оператори, обмеження та оцінювання. Для дисертації вона важлива тим, що обґрунтовує розмежування масштабного відбору, допустимого геометричного представлення, геометричної операції й контролю результату.

У праці M. Sester [57] метод найменших квадратів застосовано до зміщення й спрощення, а самоорганізовувані карти — до типізації зі збереженням щільності. В агентній моделі CartACom об’єкти-агенти узгоджують реляційні обмеження [59]. В обох підходах взаємозалежні рішення приймаються за класами об’єктів і критеріями допустимості. Система ScaleMaster 2.0 розширює керування вибором наявних даних до оркестрації автоматичної генералізації для різних масштабів [60]. Для цього дослідження

в ній суттєве розмежування механізму виконання алгоритмів і моделі топографічних даних, яка задає склад об’єктів та зміст масштабних обмежень.

1.4.2 Моделі множинного представлення геопросторових даних

Бази множинного представлення підтримують взаємопов’язані цифрові стани географічних сутностей для різних рівнів деталізації та способів використання [61; 62]. У семантично збагаченій моделі J. Stoter зі співавторами структури UML доповнено обмеженнями мовою OCL (Object Constraint Language) для опису багатомасштабного змісту й переходів [6]. Звідси видно значення формальних залежностей. Геометрична подібність двох представлень ще не визначає ні тотожності об’єкта, ні правильності успадкування атрибутів, ні умов поширення оновлень між масштабами.

M. Bobzien зі співавторами розмежували горизонтальні, міжмасштабні й часові відношення MRDB [44]. Досвід Картографічного інституту Каталонії (ICC) засвідчив, що похідні об’єкти слід явно пов’язувати з базовими [55]. Обидва підходи обґрунтовують самостійний опис ідентичності географічної сутності, цифрового запису та множинного походження. Інше питання стосується оновлення. Як зміна поширюється на похідне представлення, залежить від характеру зміненого об’єкта та його просторового оточення: X. Zhang зі співавторами дослідили поширення змін житлової забудови за допомогою обмеженої тріангуляції Делоне, і перенесення цього підходу на інші класи вимагає власних правил для кожного класу [63].

У статті про розроблення специфікації топографічних наборів зіставлено незалежні масштабні описи зі спільним пооб’єктним описом, який зберігає критерії кожного масштабу [13, с. 9]. Для випадку, коли шість масштабів специфікують поодинці, структурне дублювання описів оцінено приблизно у 90 %. Спільна організація вимог скорочує саме повторення цих структурних положень. Утім, спосіб організації правил і фізичне зберігання результатів їх застосування — різні речі. Пооб’єктна специфікація може керувати самостійними, фізично збереженими наборами кожного масштабу, а

спільність опису класу не скасовує відмінностей геометрії, складу й символізації похідних представлень [4; 13].

У прототипі Геологічної служби США (USGS) атрибут VisibilityFilter використано для фільтрації об’єктів за вісьмома цільовими масштабами від 1:24 000 до 1:5 000 000 [64]. Він визначає лише масштабну придатність об’єкта. Перетворення геометрії задають інші оператори.

Схема на рисунку 1.6 пов’язує запит території, масштабу, актуальності й складу ресурсу з відбором, генералізацією та постачанням шести похідних продуктів [13]. Джерелом є базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000; для алгоритмів семантичного контролю схема ще не містить формалізації.

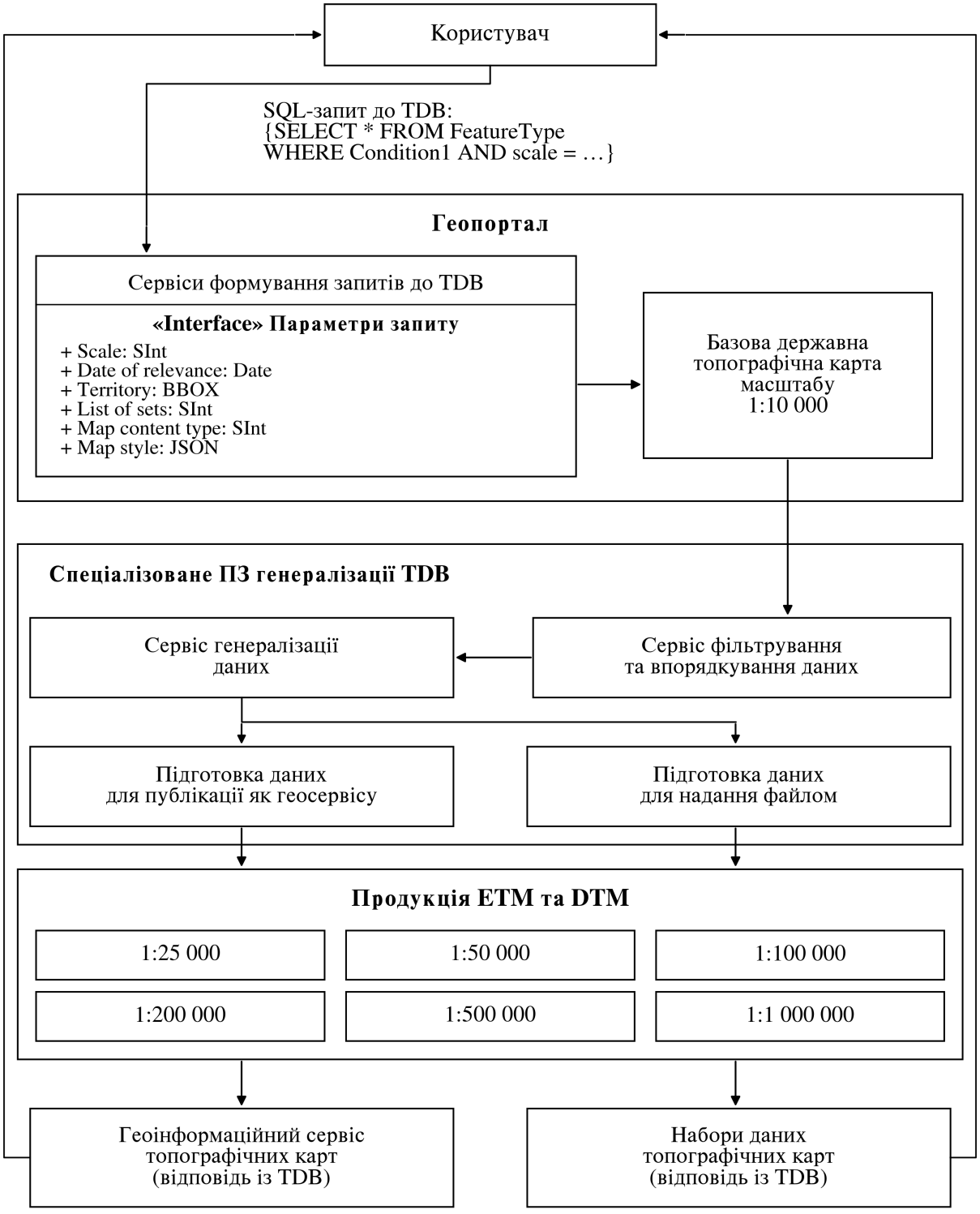


Рисунок 1.6 – Концептуальна модель системи створення топографічних карт на основі базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000

Джерело: адаптовано за [13, с. 13], рис. 3; позначення TDB уніфіковано.

Примітка. TDB — база топографічних даних; DTM у схемі позначає цифрові топографічні карти, ETM — електронні топографічні карти. У концептуальній схемі використано позначення Scale:SInt; у фізичній схемі числовий тип знаменника масштабу має охоплювати значення до 1 000 000.

Пряме формування кожного масштабу з базового стану дає змогу застосовувати власні критерії без обов’язкового успадкування результатів попереднього узагальнення; такий перехід досліджено, зокрема, для автоматизованого отримання карти 1:50 000 з даних 1:10 000 [8]. Його здійсненність у конкретній задачі не скасовує контролю кожного похідного набору.

1.4.3 Узгодження масштабного ряду та рівнів масштабування (ZOOM)

Номер ZOOM позначає рівень навігації в конкретній схемі тайлових матриць. Щоб зіставити його з картографічним масштабом, потрібні система координат, роздільна здатність та параметри цієї тайлової матриці [34; 65]. На рисунку 1.7 зіставлено 27 різнорідних геопорталів і картографічних вебресурсів з дослідження [13, с. 6–7]. Вибірка охоплює державні ресурси, OpenTopoMap, MapBox, GoogleMaps і MapTiler, і її склад відрізняється від шістнадцяти прикладів багатомасштабних карт, проаналізованих M. Dumont зі співавторами [3].

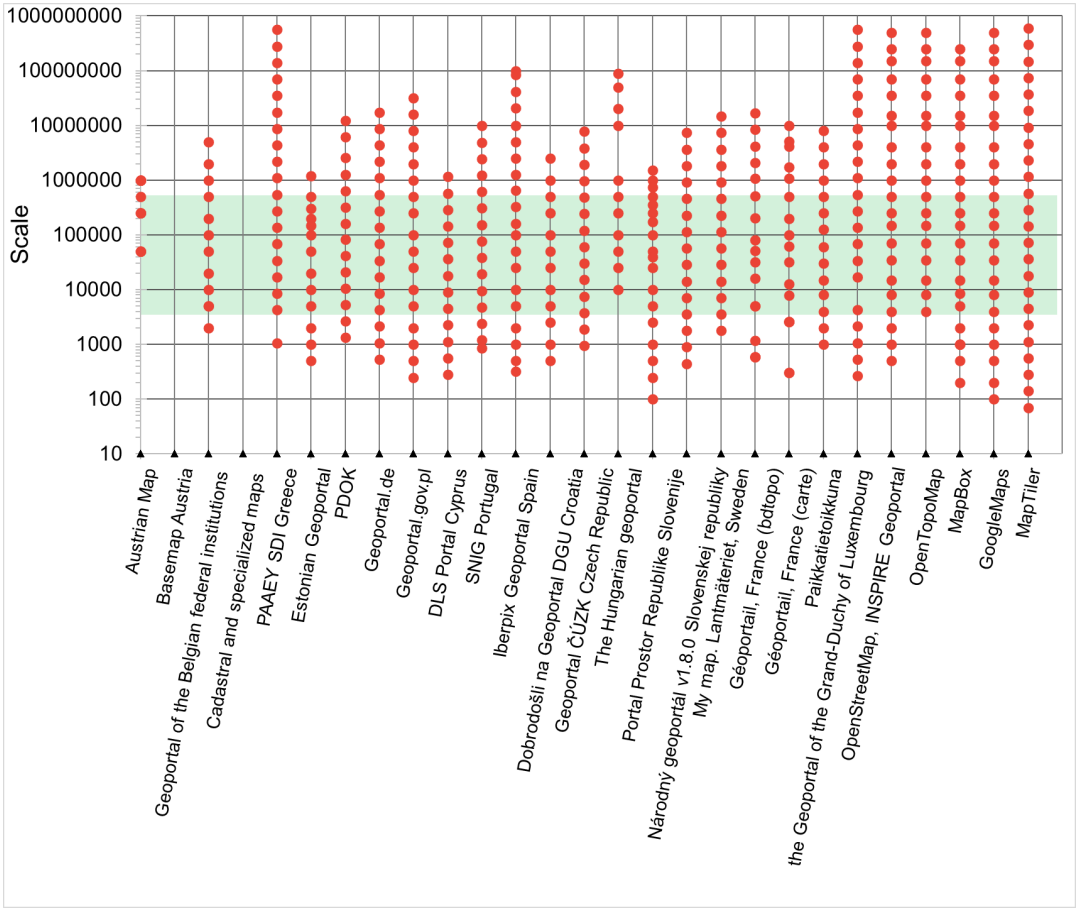


Рисунок 1.7 – Масштабні ряди геопорталів і картографічних вебресурсів, зіставлених у дослідженні

Джерело: відтворено за [13, с. 7], рис. 1; у джерелі зазначено адаптацію за [3].

Для досліджених ресурсів масштабні ряди різняться на три–дванадцять рівнів ZOOM [13, с. 8]. Їх зіставлення залежить від координатної системи, матриці, розміру тайла та прийнятих позначень рівнів.

Графік на рисунку 1.8 зіставляє знаменник масштабу, поданий на логарифмічній осі Scale, з рівнем ZOOM і містить апроксимацію з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0{,}676$ [13, с. 7]. Показник описує наведене зіставлення; застосування відповідності до конкретного сервісу потребує врахування його тайлової конфігурації.

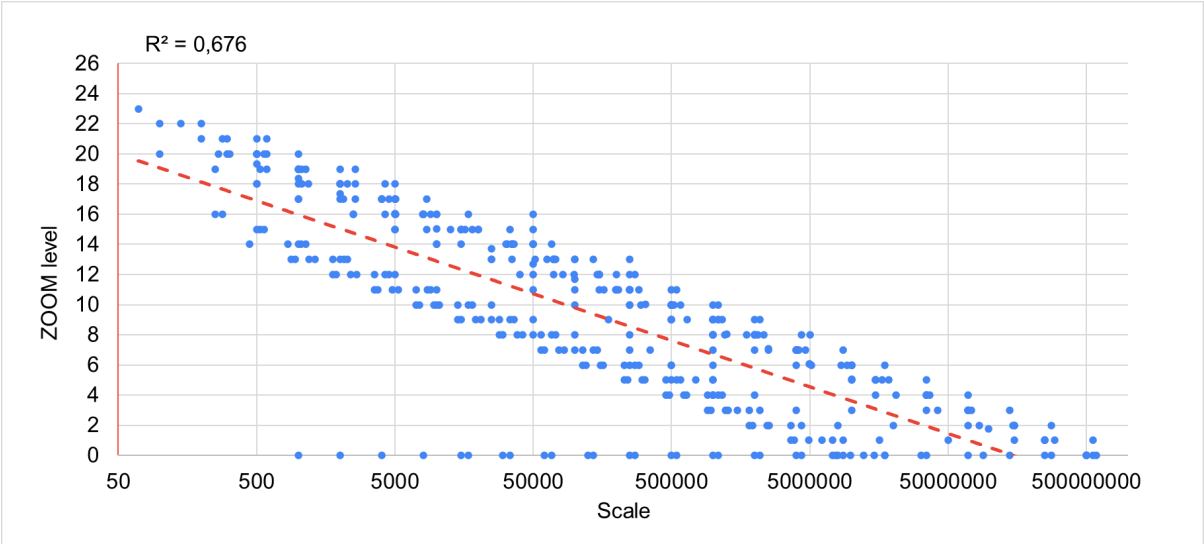


Рисунок 1.8 – Зіставлення знаменників картографічних масштабів і рівнів ZOOM у дослідженні

Джерело: відтворено за [13, с. 7], рис. 2; у джерелі зазначено адаптацію за [3].

Таблиця 1.8 відтворює зіставлення масштабу, рівня ZOOM та ідентифікатора рівня тайлової матриці (Identifier) [13]. Для 1:50 000 наведено ZOOM 13–14 і Identifier 7. Переносити цю відповідність на інший сервіс можна лише після перевірки його TileMatrixSet та розрізнення.

Таблиця 1.8 – Приклад зіставлення рівнів ZOOM, картографічних масштабів та Identifier у дослідженні

ZOOM	**Масштаб**	**Identifier**	**ZOOM**	**Масштаб**	**Identifier**
0	1:500 000 000	—	**11**	**1:200 000**	**5**
1	1:250 000 000	—	**12**	**1:100 000**	**6**
2	1:150 000 000	—	**13–14**	**1:50 000**	**7**
3	1:70 000 000	—	**15**	**1:25 000**	**8**
4	1:35 000 000	—	16	1:10 000	9
5	1:15 000 000	—	17	1:5 000	10
6	1:10 000 000	0	18	1:2 000	11
7	1:5 000 000	1	19	1:1 000	12
8	1:2 000 000	2	20–21	1:500	13
9	**1:1 000 000**	**3**	22–23	1:200	14
10	**1:500 000**	**4**			

Джерело: відтворено за [13, с. 8], табл. 1.

Примітка. Послідовність читається згори вниз: спочатку лівий блок, потім правий. Тире означає відсутність наведеного Identifier, а не нуль.

Наведені рівні відповідають номінальним знаменникам без урахування широти. Для території України відповідність похідних масштабів рівням ZOOM уточнено в підрозділі 2.7 (табл. 2.29).

Структури неперервної генералізації tGAP (topological Generalized Area Partitioning) і SSC (Space-Scale Cube) інтегрують простір та масштаб, утворюючи карту як переріз спільного представлення [66]. У дискретному ряді натомість задаються межі придатності та перемикання готових станів. Ці підходи по-різному забезпечують масштабну безперервність.

1.5 Постановка науково-прикладного завдання дослідження

У працях з автоматизованої картографічної генералізації детально опрацьовано окремі алгоритми геометричного перетворення. Проте практична реалізація багатомасштабних топографічних наборів вимагає ширшої основи: формалізації класів, атрибутів, масштабних критеріїв і просторових обмежень. Ці вимоги не можна підміняти налаштуваннями перегляду. Предметом подальшого дослідження є саме зв’язок між властивостями базового топографічного об’єкта, допустимим похідним представленням та його перевіреним картографічним представленням.

Науково-прикладне завдання полягає у формуванні узгоджених похідних масштабних представлень топографічних геопросторових даних масштабного ряду 1:25 000 – 1:1 000 000 безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 для геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД.

Із базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 безпосередньо формуються шість цільових представлень: 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000 [38]. Кожне має власні правила й контроль міжмасштабних зв’язків. Ці зв’язки фіксують два ідентифікатори — TOID і GID — та відношення Lin. TOID визначає тотожність одиничного топографічного об’єкта, GID — запис цільової моделі, Lin — множинне походження групового представлення; для агрегату зберігаються всі вихідні учасники, і група не успадковує TOID довільного члена [38; 55].

Шість складових формалізації відповідають підрозділам 2.1–2.6 (табл. 1.9) і деталізують модель об’єкта, формування похідних представлень, генералізацію, символізацію, узгодженість і специфікування.

Таблиця 1.9 – Аналітичні складові формалізації та їх розкриття в розділі 2

Підрозділ і складова	Зміст формалізації
2.1 Модель топографічних даних	Формалізувати каталог, ідентифікаційні, геометричні, семантичні, часові та картографічні властивості об’єкта.
2.2 Похідні масштабні представлення	Задати критерії участі та допустимі геометричні представлення для кожного масштабу.
2.3 Автоматизована генералізація	Формалізувати відбір, спрощення, згладжування, агрегування та колапс.
2.4 Картографічне представлення	Розмежувати придатність геометрії, вибір умовного знака і параметри його відтворення.
2.5 Узгодженість представлень	Задати умови тотожності, походження, контролю топології та оновлення.
2.6 Формалізація моделей у специфікації	Закріпити моделі й методи у прикладній схемі, каталозі та правилах зображення.

Джерело: розроблено автором.

Характеристичний предикат визначає участь екземпляра за класом, атрибутами й масштабними умовами [4]. Допустиме геометричне представлення та оператор генералізації визначають самостійно, тож для невключення, спрощення, агрегування й колапсу застосовують різні критерії перевірки. Так само незалежно перевіряють геометричну валідність, відповідність правилам класу й топологічну узгодженість [29; 30]. Контроль придатності має три можливі результати — умову виконано, порушено або не визначено (пункт 2.5.2). Відсутній атрибут ще не доводить непридатності.

Картографічне зображення потребує окремого узгодження геометрії та умовного знака. У цільовій моделі upperScale характеризує масштабну придатність геометричного представлення, Symbol25K–Symbol1M задають коди знаків, а параметричні правила визначають їх графічне відтворення; наявність цих складових у моделі слід відрізняти від їх фізичної реалізації [38].

Проєкт Специфікацій (додаток А) поєднує вимоги до класів, масштабів, геометрії та картографічного зображення [13; 38]. У дисертації розроблено

математичну модель і методи багатомасштабної генералізації, а також каталоги та прикладні моделі шести класів топографічних об’єктів: «Будівлі», «Квартали», «Автомобільні та ґрунтові дороги», «Водойми», «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» і «Деревна рослинність». Їхню експериментальну перевірку описано в розділі 3.

Для актуалізації похідних наборів залежні представлення повторно обчислюють із поточного базового стану за чинними масштабними правилами, як визначено моделлю оновлення розділу 2. Відтворюваність вимагає зберігати походження результатів і версії застосованих правил.

Методи апробовано на Національному геопорталі НІГД для обраних класів топографічних об’єктів. У розділі 3 результати кожного експерименту співвіднесено з реалізованою операцією, контрольними умовами та конфігурацією сервісів. Самих чисел тут замало. Оцінювання генералізації поєднує кількісні обмеження з якісним аналізом зображення, зокрема його читабельності [67], а дані, процедури та умови перевірок, за якими одержано результати розділу 3, подано в додатках Д–Е.

Отже, наукове завдання полягає в тому, щоб обґрунтувати залежність участі об’єкта у похідному масштабному наборі від його класу, семантики, геометричних властивостей і просторових відношень, а потім установити перевірювані способи перетворення. Для цього необхідні математична модель, каталоги шести класів об’єктів і метод незалежного контролю результату.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Аналіз досліджень із картографічної генералізації, баз геопросторових даних множинного представлення та функціонування геопорталів установив, що перехід між масштабами не може зводитися до зміни розміру картографічного зображення. Для збереження топографічного змісту необхідне узгоджене застосування критеріїв відбору, допустимих геометричних перетворень, правил символізації та перевірки просторових відношень [6; 7; 8]. Установлено також, що традиційна картографічна генералізація з автономним або каскадним створенням масштабів призводить

до накопичення похибок, дублювання оновлення й семантичних суперечностей, тому необхідний перехід до геоінформаційної генералізації з єдиного джерела. Цим розв’язано перше завдання дослідження.

2. Обґрунтовано необхідність розділяти правила формування похідних топографічних наборів для класів об’єктів і засоби їх вебкартографічного надання. Стандартизовані сервіси картографічних зображень, картографічних тайлів та геопросторових об’єктів реалізують різні способи доступу; належна робота сервісу ще не засвідчує відповідності топографічного змісту вимогам цільового масштабу [32; 34; 35].

3. Визначено науково-прикладну суперечність між потребою одержувати узгоджені топографічні дані шести похідних масштабів з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 та недостатністю відокремлених геометричних і сервісних процедур для забезпечення узгодженості цих даних. Усунення цієї суперечності потребує перевірюваного зв’язку між властивостями конкретного об’єкта, правилами його масштабної участі, перетворенням геометрії та результатом контролю.

4. Установлено, що розв’язання виявленої проблеми потребує трьох взаємозалежних наукових результатів: математичної моделі масштабного відбору й перетворення, каталогів класів об’єктів і прикладних моделей визначених класів, а також удосконаленого методу отримання та контролю похідних представлень. Для їх перевірки необхідне зіставлення кожного масштабу з базовою державною топографічною картою масштабу 1:10 000 й незалежний контроль геометричних, семантичних та топологічних умов. Ці три результати відповідають завданням 2–4 дослідження. Основні положення розділу висвітлено в працях здобувача [14; 15; 16; 18; 19].

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ БАГАТОМАСШТАБНОЇ ГЕОВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТОПОГРАФІЧНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

2.1 Концептуальна та математична модель топографічних геопросторових даних

Представлення топографічного об’єкта в кількох масштабах поєднує його класифікаційну належність, цифрову геометрію, атрибути, версійність і правила картографічного відображення. Ці характеристики пов’язують похідні набори з єдиним вихідним джерелом та визначають зміст перетворень, потрібних для переходу до дрібнішого масштабу [4; 6].

Запропонована концепція розділяє математичну модель та її реалізацію. Математичні відношення визначають належність екземпляра до класу, множину масштабів, умови відбору й геометричні представлення. Семантичні характеристики шести класів розроблено у каталогах; у підрозділі 2.6 вони наведені разом із UML-схемами, атрибутами, довідниками та правилами контролю.

2.1.1 Базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000 як вихідна модель даних

Джерелом для побудови похідних наборів є об’єктні дані базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000: геометрія, класифікаційна належність і семантичні характеристики об’єктів місцевості [5; 68; 69; 70]. Їх перетворення дає змогу змінювати склад і деталізацію топографічного змісту відповідно до цільового масштабу.

Логічну структуру топографічних даних визначає прикладна схема. Стандарт ISO 19109:2025 описує загальну модель географічних об’єктів і принципи побудови прикладних схем, а ISO 19110:2016 установлює методологію каталогізації класів об’єктів [9; 10]. В Україні методологію каталогізації запроваджено ДСТУ ISO 19110:2017 (ISO 19110:2016, IDT), а структуру специфікації геопросторового продукту визначає ДСТУ ISO 19131:2019 (ISO 19131:2007; Amd 1:2011, IDT); чинне міжнародне видання —

ISO 19131:2022 [11; 12; 71]. Каталог не тотожний фізичній структурі бази геопросторових даних File Geodatabase. Кілька геометричних локалізацій одного класу каталогу можуть зберігатися у відокремлених класах даних, тоді як назва фізичного класу ще не визначає семантичної належності об’єкта.

Із базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 безпосередньо формують шість похідних наборів. Для кожного масштабу розроблено критерії участі об’єкта, допустимі геометричні представлення та правила картографічного представлення для кожного класу; загальні властивості описуються один раз, а конкретні параметри шести класів подано у підрозділі 2.6. Кожне похідне представлення формується безпосередньо з актуальної вихідної моделі [4; 47]. Після зміни базових даних правила цільового масштабу застосовують повторно, зберігаючи походження об’єктів. Обов’язкова залежність від результату сусіднього масштабу при цьому зникає. Геометричну, семантичну й топологічну придатність кожного набору встановлюють контрольними процедурами.

Концепція передбачає відокремлення топографічного змісту від засобів його відображення. Масштабна придатність випливає з класу об’єкта, його семантичних характеристик, дозволеної геометрії та встановлених правил відбору для конкретного похідного набору. Параметри перегляду виконують іншу функцію. Зміна ZOOM або рівня тайлової матриці не може самостійно змінити клас каталогу, породити нову геометрію генералізації чи замінити семантичний масштабний предикат.

2.1.2 Математична модель каталогу топографічних об’єктів та їх атрибутів

Математична модель починається з розмежування класу каталогу та цифрового екземпляра: каталог задає класифікаційний код, склад атрибутів і домени, тоді як екземпляр відтворює конкретну топографічну сутність [9; 10]. Це розмежування визначає подальший масштабний відбір [71; 72].

Множину вихідних цифрових екземплярів позначено U, а сукупність класів каталогу — F; відображення c: U → F встановлює для кожного x ∈ U

клас за атрибутом featureTypeCode, визначаючи однозначну класифікаційну належність у каталозі [4]. Клас об’єктів не тотожний фізичному шару зберігання.

Скінченну множину класів каталогу подано співвідношенням:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \qquad n = |F| \tag{2.1}$$

де F — скінченна множина класів топографічних об’єктів; f_i — окремий клас із цієї множини; n — кількість класів.

Рисунок 2.1 ілюструє співвідношення абстрактного TopographicObject, класів об’єктів та тематичних пакетів. У дисертації досліджуються шість обраних класів; структура решти класів слугує загальним контекстом моделювання. В абстрактному класі показано також операції генералізації, які тематичні класи успадковують і уточнюють.

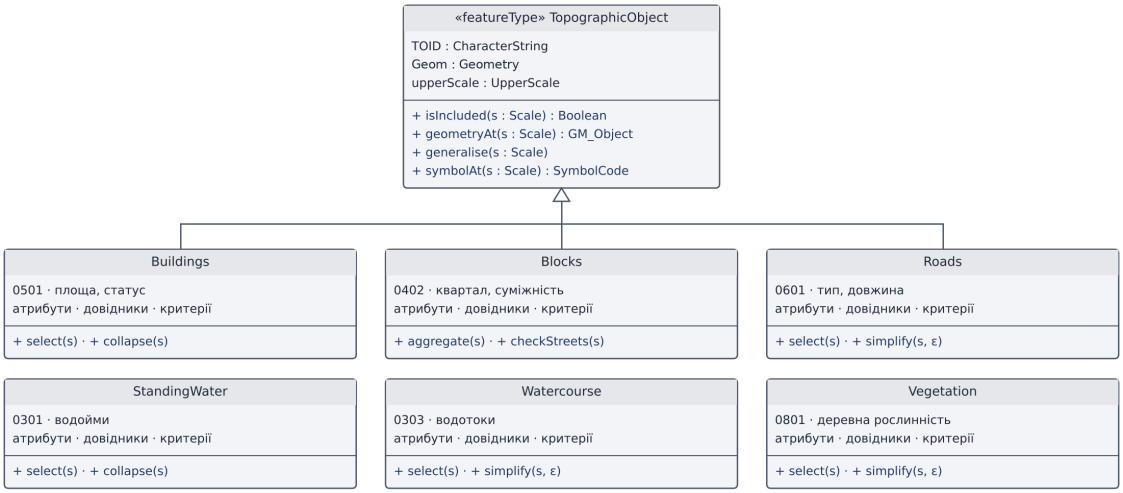


Рисунок 2.1 – UML-представлення загального та тематичних пакетів топографічних даних з операціями генералізації

Джерело: узагальнено за структурою досліджуваної прикладної моделі; методичні засади прикладного моделювання [4; 13].

Для кожного екземпляра виділено взаємопов’язані групи властивостей: ідентифікацію, клас, геометрію, семантику, версійні характеристики та картографічні позначення; сукупність цих компонентів формує єдиний структурований математичний кортеж (2.2). Кортеж не залежить від формату зберігання.

$$x = \langle ID, C, G, A, M_{meta}, S_{symb} \rangle \quad (2.2)$$

де ID — ідентифікатори об’єкта (GID цифрового запису та TOID базової сутності); C ∈ F — клас об’єкта за каталогом; G — геометричне представлення об’єкта; A — множина семантичних атрибутів; M_{meta} — часові межі версії цифрового запису (beginLifespanVersion, endLifespanVersion); S_{symb} — ідентифікатори умовних знаків для цільових масштабів (Symbol25K–Symbol1M).

Для визначення масштабно залежних властивостей уведено множину шести цільових картографічних масштабів:

$$\mathcal{S} = \{25k, 50k, 100k, 200k, 500k, 1M\} \quad (2.3)$$

де 25k, 50k, 100k, 200k, 500k, 1M — скорочені позначення масштабів 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 і 1:1 000 000; вихідний масштаб 1:10 000 позначено 10k.

Модель використовує оператори похідного формування. Відображення Γ із дослідження [4, формула (6)] конкретизовано для кожного масштабу як оператор Γ_s, здатний поєднувати відбір, вилучення та утворення групових представлень із базових даних.

$$\forall s \in \mathcal{S}: \quad \Gamma_s : 2^{U_{10k}} \to 2^{U_s} \quad (2.4)$$

де $\mathcal{S}$ — множина цільових масштабів (2.3); s — цільовий масштаб; Γ_s — оператор утворення похідного набору для масштабу s; U_{10k} — множина вихідних об’єктів базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000; U_s — множина похідних об’єктів масштабу s; 2^X — множина всіх підмножин множини X.

Для кожного s оператор Γ_s отримує дані безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 за правилами своїх класів об’єктів, не використовуючи результати сусіднього масштабу, а геометричну, семантичну та топологічну придатність перевіряють незалежно [4]. Послідовне накопичення спрощень цим виключено.

У запропонованій моделі клас c(x) визначають за семантичним класифікаційним кодом, а не за назвою фізичного шару чи поточною геометричною локалізацією. Таке визначення класу дає змогу одному класу мати різні допустимі масштабні геометрії, зберігати його семантичну тотожність після узагальнення та незалежно визначати правила подальшого картографічного оформлення. Спільну структуру екземпляра формалізовано нижче через TopographicObject.

2.1.3 Формалізоване представлення топографічного об’єкта

Абстрактний клас TopographicObject узагальнює ідентифікаційні, геометричні, семантичні та часові властивості топографічного об’єкта. У дослідженні його загальні реквізити успадковуються прикладними моделями класів «Будівлі», «Квартали», «Автомобільні та ґрунтові дороги», «Водойми», «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» і «Деревна рослинність». Ці моделі мають власні каталожні атрибути, масштабні умови та правила перевірки.

Успадковані атрибути формують логічний опис об’єкта. Під час переходу між моделлю джерела й цільовою схемою необхідно розрізняти визначення атрибута та його фізичну наявність у конкретній базі геопросторових даних File Geodatabase. Відсутність поля у файлі не змінює означення класу. За таких умов потрібне явно задане відображення вихідних характеристик у цільову структуру без довільного приписування джерелу відсутніх значень. Перелік успадкованих атрибутів подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Успадковані атрибути абстрактного класу TopographicObject

Атрибут	**Тип значення**	**Кратність**	**Призначення у моделі**
GID	Char (16)	1	Унікальний ідентифікатор цифрового запису в цільовому наборі.
TOID	Char (16)	1	Ідентифікатор базового топографічного об’єкта для міжмасштабної простежуваності.
featureTypeCode	Char (4)	1	Код класу об’єкта за каталогом.
Geom	Geometry	1	Геометричне представлення екземпляра.
verticalPosition	Char (16)	1	Вертикальне положення за CodeList VerticalPositionValue.
UkrName	CharacterString	0…1	Географічна або власна назва українською мовою.
EngName	CharacterString	0…1	Географічна або власна назва англійською мовою.
beginLifespanVersion	DateTime	1	Час створення або зміни цифрової версії в наборі.
endLifespanVersion	DateTime	0…1	Час заміни або вилучення цифрової версії, якщо відомий.
upperScale	SInteger	1	Код верхньої межі масштабної придатності поточної геометрії (довідник UpperScale).
Symbol25K	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:25 000.
Symbol50K	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:50 000.
Symbol100K	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:100 000.
Symbol200K	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:200 000.
Symbol500K	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:500 000.
Symbol1M	SInteger	1	Ідентифікатор картографічного знака для масштабу 1:1 000 000.

Джерело: складено автором за структурою спільної логічної моделі топографічних даних.

GID ідентифікує цифровий запис; TOID зберігає походження від базової топографічної сутності; featureTypeCode визначає її класифікаційний код. Для групового геометричного кандидата застосовано дослідницьке відношення

Lin, що містить усі вихідні TOID учасників агрегування. Воно не є обов’язковим атрибутом абстрактного класу TopographicObject. До завершення перевірок група має службовий ключ, а її ідентифікація після прийняття відбувається через присвоєння нових GID і TOID, відмінних від ідентифікаторів вихідних об’єктів; перелік їх TOID зберігається у відношенні Lin.

Таблиця 2.1 описує цільову логічну модель, а не фактичний набір полів кожного вихідного файлу. Атрибути TOID, GID, upperScale та Symbol25K–Symbol1M виконують різні функції: тотожність об’єкта, ідентифікацію цифрового запису, масштабну придатність і адресацію умовного знака. Їх не можна механічно ототожнювати. Відображення властивостей джерела в цільову схему має зберігати семантичний зміст значень і документувати правила їх визначення. Наявність відповідних атрибутів із кратністю 1 у цільовій схемі не допускає розгляду їх як необов’язкових: якщо клас каталогу не відображається у певному масштабі, це стосується правила показу, а не довільного вилучення поля Symbol із прикладної моделі.

Значення verticalPosition визначає положення об’єкта: onGround, underGround, underWater, aboveGround або relativeSurface. Службові й невідомі значення перевіряють за семантикою конкретного класу, оскільки для мережевих об’єктів від цього залежить інтерпретація перетинів.

Версійність визначають beginLifespanVersion (кратність 1) та endLifespanVersion (0…1). За наявності обох часових позначок кінець версії має бути пізнішим за початок. Ці дати стосуються цифрового запису, а не обов’язково існування об’єкта на місцевості.

Масштабну придатність геометрії характеризує upperScale, а поля Symbol25K–Symbol1M адресують умовні знаки. Їх застосовують після перевірки масштабного предиката й допустимого геометричного представлення [4].

$$\mathrm{T(x)} = \langle \mathrm{GID},\ \mathrm{TOID},\ \mathrm{featureTypeCode},\ \mathrm{Geom},\ \mathrm{verticalPosition},\ \mathrm{UkrName},\ \mathrm{EngName},\ \mathrm{beginLifespanVersion},\ \mathrm{endLifespanVersion},\ \mathrm{upperScale},\ \mathrm{Symbol25K},\ \mathrm{Symbol50K},\ \mathrm{Symbol100K},\ \mathrm{Symbol200K},\ \mathrm{Symbol500K},\ \mathrm{Symbol1M} \rangle \quad (2.5)$$

$$\mathrm{Geom}\ (\mathrm{s}, \mathrm{x}) \in\ \mathcal{G}(\mathrm{c(x)}, \mathrm{s}) \quad (2.6)$$

де T(x) — набір реквізитів абстрактного класу TopographicObject для екземпляра x (склад і призначення реквізитів наведено в таблиці 2.1); Geom (s,x) — геометричне представлення екземпляра x у масштабі s; $\mathcal{G}$(c(x), s) — множина допустимих геометричних представлень класу c(x) у масштабі s.

Атрибути цифрового запису та межі допустимої геометрії описуються незалежно. Для одиничного об’єкта зберігається походження за TOID, тоді як результат групування фіксується через множинне відношення Lin, яке не підміняє обов’язковий одиничний TOID у прикладній схемі.

Отже, концептуальна модель задає єдиний спосіб опису класу каталогу, цифрового екземпляра, базового походження й масштабно допустимої геометрії. Для одиничного представлення зберігають ідентифікацію базової сутності. Для групового кандидата описують множину вихідних учасників через Lin, не приписуючи йому довільного TOID будь-якого учасника та не розглядаючи кандидата без обов’язкового TOID як готовий екземпляр TopographicObject. Наступний підрозділ формалізує масштабні предикати відбору та допустимі переходи геометричного представлення, спираючись на введені означення.

2.2 Метод формування похідних наборів топографічних геопросторових даних

Перехід від вихідних даних до похідних масштабних наборів охоплює чотири послідовні рішення: включення об’єкта, визначення допустимої

геометрії та роздільної здатності, застосування оператора генералізації, контроль отриманого результату [4].

Вихідним матеріалом методу є об’єктні дані базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000, класифіковані за класами каталогу, атрибутами й початковою геометрією [4]. Саме лише включення ще не визначає способу зображення. Допустимість класу, змістові умови відбору, геометричне представлення та оператор установлюють для кожного цільового масштабу самостійно. Одиничне похідне представлення зберігає зв’язок із вихідною сутністю через TOID, а походження групового кандидата описують множиною зв’язків Lin; прийняття результату залежить від виконання семантичних і топологічних вимог.

Послідовність починається з предиката включення, після чого перевіряють допустиме геометричне представлення і лише тоді застосовують відповідний оператор за масштабом та семантичними вимогами конкретного класу вихідного об’єкта. Непридатне геометричне представлення не підлягає подальшому перетворенню.

2.2.1 Формування масштабного ряду топографічної основи

Масштабний ряд визначено формулою (2.3). До нього входять шість похідних рівнів: 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000. Спільним джерелом для них є геопросторові дані базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Отже, сім рівнів охоплюють один вихідний і шість цільових станів, тоді як інформаційне джерело в них одне [4]. Рівень 1:200 000 прийнято за проєктом специфікації (додаток А). Склад множини $\mathcal{S}$ є параметром методу: заміна рівня, зокрема на 1:250 000, потребує лише інших порогових значень для цього рівня й не змінює правил відбору, допустимих геометричних представлень і контролю.

Для кожного $s \in \mathcal{S}$ оператор Γ_s із формули (2.4) перетворює вихідну множину U_{10k} на набір U_s за правилами цільового масштабу. Наприклад, 1:100 000 формується без попередньої підготовки 1:50 000, а 1:500 000 —

незалежно від результату 1:200 000. Зв’язки цієї моделі прямого формування показано на рисунку 2.2.

На відміну від каскадної генералізації, за якої масштаб може успадковувати похибки попереднього, безпосереднє звернення до вихідної геометрії запобігає накопиченню метричних і топологічних похибок, спричинених попереднім відбором або спрощенням [47]. Узгодженість одержаних представлень установлюють за результатами перевірки геометрії, семантики, просторових зв’язків і тотожності об’єктів [6; 7; 61]. Переваги формування похідних представлень із єдиної актуальної основи підтверджує й дослідження J. Stoter зі співавторами [8]. Тому вже генералізований сусідній масштаб у дисертації не є обов’язковим джерелом.

Порогові значення відбору для різних класів не уніфіковано. У запропонованій моделі метричні та семантичні умови відокремлено для класів «Будівлі», «Квартали», «Автомобільні та ґрунтові дороги», «Водойми», «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» і «Деревна рослинність», оскільки площа, ширина, довжина, функціональна значущість та топологічне оточення мають різне семантичне значення. Для будівель визначальними є придатність за площею і підстава для збереження самостійного знака, для водотоків — довжина та ширина, а для кварталів — площа й допустимість об’єднання без порушення структури осей вулиць (клас «Вулиці», Streets, код 0403).

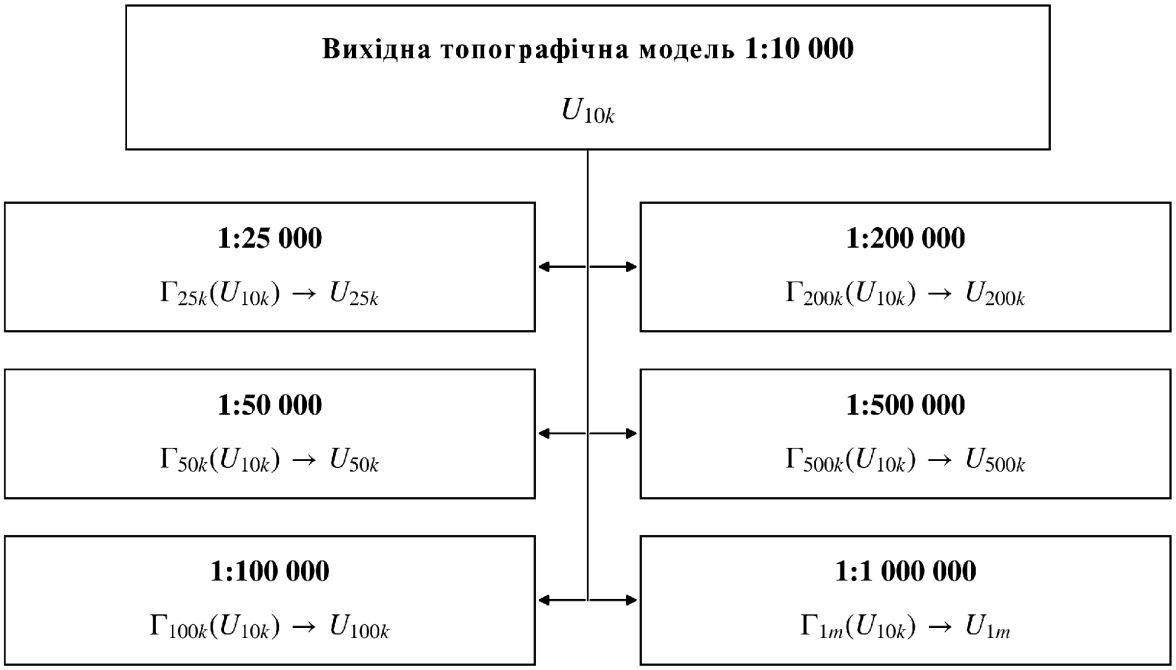


Рисунок 2.2 – Безпосереднє формування шести похідних масштабних наборів із базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000

Джерело: побудовано за запропонованою моделлю безпосереднього формування похідних наборів.

Рішення про цільовий масштаб передує вибору оператора. Метод формує одиничне представлення із збереженим TOID, груповий геометричний кандидат із множинним походженням Lin або фіксує невключення об’єкта до цільового набору за встановленими правилами, з урахуванням семантики та топології.

Отже, формування похідних наборів спирається на шість масштабних переходів від спільної базової моделі, незалежних один від одного. Для кожного переходу застосовують власні семантичні критерії. Визначення допустимості класу каталогу не підміняють перевіркою конкретного екземпляра, а вибір геометричного оператора виконують лише після встановлення правил його включення та допустимого стану. Ці рішення формалізовано в пунктах 2.2.2–2.2.3.

2.2.2 Критерії та предикати відбору топографічних об’єктів

Відбір визначає склад цільового похідного набору. Спочатку перевіряють можливість відображення класу каталогу у масштабі s, потім

метричні показники, семантику, функціональне призначення, статус і просторове оточення екземпляра (його відношення із суміжними об'єктами та мережами) у послідовності, заданій математичною моделлю [4].

$$P(c,s)(x) = \begin{cases} 0, & E(c,s) = 0 \\ \Phi(c,s)(x), & E(c,s) = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

де P(c,s)(x) — предикат включення екземпляра x класу c до похідного набору масштабу s; E(c,s) — ознака допустимості класу c у масштабі s за каталогом (1 — клас відображається, 0 — не відображається); Φ(c,s)(x) — семантичний предикат екземпляра, що поєднує метричні, семантичні та просторові умови класу c для масштабу s.

Неповні вихідні атрибути вимагають додаткової семантичної перевірки. Якщо значення, потрібне для оцінювання Φ(c,s)(x), відсутнє або суперечить домену, рішення з урахуванням вимог якості фіксують як невизначене до семантичного зіставлення і автоматично до нуля не прирівнюють. Булевий предикат визначають після перевірки.

Для «Будівель» (Buildings, 0501) запропоновано перевіряти поріг площі разом із функціональним призначенням, статусом і картографічною значущістю. Перехід від полігонального контуру до точкового знака можливий лише за підтверджених семантичних умов; сама мала площа такої підстави не створює.

$$\mathrm{Geom}(s,b) = \begin{cases} \mathrm{GM_Polygon} & \text{при } \mathrm{Area}(b) > \mathrm{Threshold}(s) \\ \mathrm{GM_Point} & \text{при } \mathrm{Area}(b) \le \mathrm{Threshold}(s) \text{ and } Q_B(b,s) = 1 \\ \emptyset & \text{при } \mathrm{Area}(b) \le \mathrm{Threshold}(s) \text{ and } Q_B(b,s) = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

де Geom(s, b) — геометричне представлення будівлі b у похідному наборі масштабу s; Area(b) — площа контуру будівлі b за даними базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000, м²; Threshold(s) — пороговий розмір площі будівлі для масштабу s, м² (табл. 2.3); Q_B(b, s) — предикат картографічної значущості будівлі b для масштабу s, що дорівнює 1, якщо

призначення, статус або роль орієнтира підтверджують потребу самостійного позначення будівлі, і 0 — в іншому разі; and — логічна кон'юнкція умов; GM_Polygon — полігональне геометричне представлення; GM_Point — точкове геометричне представлення; ∅ — допустиме геометричне представлення не формується, і будівлю до похідного набору масштабу s як самостійний об'єкт не включають.

Для водойм придатність об'єкта не вичерпується метричним критерієм площі. Для ділянок водотоків масштабне рішення пов'язане з шириною й довжиною, а його геометричне представлення підпорядковується вузлам гідрографічної мережі. Повні семантичні пороги подано в підрозділі 2.6.

Для доріг масштабна придатність визначається поєднанням класу дороги, довжини лінійної ділянки та її зв'язності в транспортній мережі. Для кожного з шести рівнів задано власне мінімальне значення; усі вони зведені в семантичному каталозі підрозділу 2.6.

Семантичний предикат для доріг перевіряє одночасно відповідність категорії дозволеному для масштабу опису, мінімальну довжину ($L(x) \geq L_{min}(s)$, де $L(x)$ — довжина ділянки x, $L_{min}(s)$ — мінімальна довжина для масштабу s) і допустимість збереження чи вилучення ділянки з погляду транспортної зв'язності. Параметр $L_{min}(s)$ не є довільним допуском генералізації: його безпосередньо взято з таблиці 2.11. Для вибіркового показу доріг з покриттям (typeRoad = 3) у густій мережі каталог не задає числової формули густоти; вводити її як нову нормативну межу було б некоректно.

У класі «Деревна рослинність» розрізняють полігональні, лінійні й точкові стани за семантикою. Площі застосовують до територіальної рослинності, ширинні критерії — до вузьких лінійних смуг; механічне проріджування точок не визначає нормативного показу поодиноких дерев. Допустимий стан геометрії визначається лише після перевірки масштабного критерію. Точкові зображення в досліджених масштабах залежать від конкретного семантичного класу; випадкове зменшення щільності вихідної вибірки їх не визначає.

Для кварталів (Blocks, 0402) площа самостійного контуру є лише початковою умовою. Якщо модель допускає об’єднання, агрегат-кандидат має пройти перевірку суміжності, функціональної сумісності, вуличних коридорів і обов’язкових топологічних зв’язків.

Код поза доменом і відсутній атрибут потребують уточнення вхідних даних; значення E(c,s)=0 однозначно виключає клас із масштабу. Засади оцінювання якості задає стандарт якості геопросторових даних ISO 19157-1:2023 «Geographic information — Data quality — Part 1: General requirements» [29], а числові пороги картографічного відбору шести класів систематизовано в таблицях 2.3, 2.7, 2.11, 2.15, 2.19 та 2.23. Невизначене значення атрибута не прирівнюють до хибного предиката.

За підтвердженого самостійного включення $P_{ind}(c,s,x)$ або допустимості групової участі $P_{grp}(c,s,x,Q)$ метод визначає процедуру побудови допустимої геометрії, застосовує вибраний оператор і контролює топологічну, семантичну та картографічну придатність кандидата для масштабу s. Результат приймають лише за виконання всіх необхідних умов. Сам факт відбору не гарантує правильної геометрії, а геометрична валідність не усуває потреби контролю просторових відношень з об’єктами суміжних класів.

2.2.3 Методи зміни геометричного представлення топографічних об’єктів

Для самостійно включеного об’єкта або підтвердженої групи екземплярів класу c встановлюють допустиме геометричне представлення у масштабі s за правилами класу. Обрана операція має сформувати цей стан зі збереженням необхідних просторових і топологічних відношень. Геометрична валідність кандидата ще не гарантує його картографічної придатності.

Предикат P(c,s)(x) визначає участь екземпляра у похідному наборі, а множина допустимих геометрій $\mathcal{G}(c,s)$ — його можливий стан після перетворення. Відбір і зміна розмірності є різними операціями: колапс допускається лише за виконання масштабного предиката та спеціальних умов відповідного класу (пункт 2.3.4).

Геометрична розмірність може змінюватися під час генералізації. Перехід полігональної геометрії до точки чи лінії та лінійної геометрії до точки дозволено лише за відповідної семантичної допустимості; спрощення через вилучення вершин зберігає геометричний тип об’єкта [4].

Для класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801) передбачено різні допустимі геометричні представлення, зумовлені семантикою. Вузькі смуги деревної рослинності можуть отримувати лінійне представлення за встановленою картометричною межею ширини не більш як 1,5 мм у цільовому масштабі, тоді як суцільні масиви описуються полігонами (рис. 2.3). Геометричний перехід не є механічним проріджуванням вихідних точок. Точкові об’єкти фізичного класу VegetationP, у тому числі в масштабі 1:100 000, є каталожно допустимими для випадків, визначених у Специфікаціях [38, п. 4.10.2.1.2–4.10.2.1.4]; однак випадкове або суто дистанційне проріджування вихідних точок не встановлює їхньої семантичної значущості. Для рослинного масиву, який підлягає полігональному показу, будують узагальнений полігон, не підмінюючи його набором діагностичних точок.

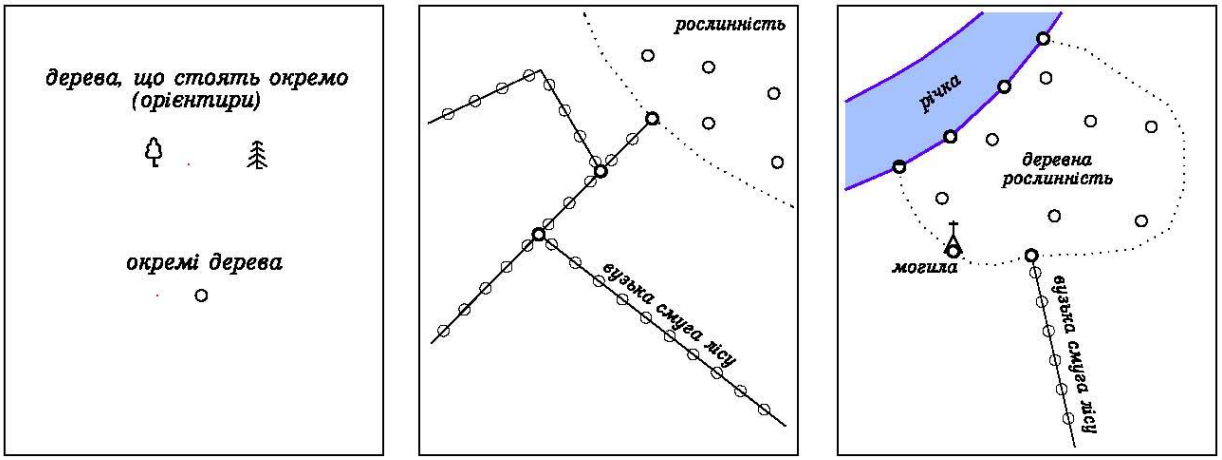


Рисунок 2.3 – Геометричні стани деревної рослинності: точковий, лінійний і полігональний

Джерело: складено за результатами дослідження.

Рисунок 2.3 ілюструє множину можливих геометричних представлень деревної рослинності. Лінійний стан допускається лише за відповідності семантиці лінійного фізичного класу VegetationL та картометричним обмеженням, а полігональне представлення повинно задовольняти

геометричні й топологічні умови цільового масштабу. Допустимість форми та спосіб картографічного оформлення визначають самостійно.

TOID пов’язує одиничне похідне представлення з тією самою вихідною сутністю між масштабами й версіями, а GID ідентифікує цифровий запис відповідного набору. Походження агрегату кількох сутностей описує Lin (пункт 2.3.3). Ці зв’язки перевіряють поряд із топологічною коректністю результату.

Метод формування похідного представлення завершується перевіркою його семантичної коректності. Для водойм розроблено полігональні пороги за площею та семантично обґрунтовані випадки точкових умовних знаків. Допоміжна внутрішня точка, обчислена автоматично, ще не підтверджує право зобразити водойму точковим знаком.

2.3 Методи автоматизованої картографічної генералізації топографічних геопросторових даних

Операції генералізації застосовують до об’єктів, для яких установлено допустимість класу $E(c,s)$, самостійне включення $P_{ind}(c,s,x)$ або семантично дозволену групову участь $P_{grp}(c,s,x,Q)$, а також цільове геометричне представлення. Ці передумови для кожного масштабу визначає формалізація підрозділу 2.2. Наступний крок — вибір способу геометричного перетворення.

Відбір визначає склад даних, спрощення — деталізацію збереженої геометрії, агрегування — спільне представлення групи, а колапс — перехід до меншої просторової розмірності. Зміщення, перебільшення й типізацію також розглянуто в картографії [51]; обсяг реалізації та перевірки конкретних операцій у дослідженні окреслено матеріалами розділу 3.

Результат дослідження стосується правил застосування й контролю відомих геометричних операторів до обраних класів топографічних об’єктів. Алгоритми Дугласа – Пекера і Вісвалінгама – Вайатта застосовано як відомі; удосконалення стосується методів формування похідних масштабних представлень (третій пункт наукової новизни).

Для одержаного результату перевіряють топологічні відношення, семантику, положення знака та походження. Ці вимоги обмежують застосування математичних операторів і визначають прийнятність похідного представлення.

2.3.1 Відбір топографічних об’єктів

Відбір змінює склад набору, вихідної геометрії він не торкається. Оператор відбору самостійних представлень визначає множину екземплярів, для яких установлено допустимість класу каталогу та істинність семантичного предиката індивідуального включення у заданому масштабі [4]. Далі для відібраних об’єктів визначають геометричне представлення, вибирають оператор перетворення й перевіряють, чи відповідає результат просторовим, семантичним і топологічним правилам, установленим для цього масштабу. Квартали з площею, меншою за поріг, допущені до агрегування, відстежують у самостійній множині P_{grp} і логіки безумовного вилучення до них не застосовують.

Для вихідної множини X_c екземплярів класу c оператор $\sigma_{c,s}(X_c)$ повертає лише об’єкти, для яких предикат P(c,s)(x) підтверджено. Їхня геометрія не змінюється: результат відбору лише стає вхідною множиною для вибору допустимого геометричного представлення. Математичний запис оператора подає формула (2.9).

$$\sigma_{c,s}(X_c) = \{ x \in X_c : P(c,s)(x) = 1 \} \qquad (2.9)$$

У формулі оператора відбору X_c позначає сукупність вихідних екземплярів класу c, а P(c,s)(x) — підтверджену допустимість включення екземпляра в масштабі s. Якщо клас не допускається для масштабу, результат порожній. Неповні семантичні ознаки вимагають уточнення; автоматично такий екземпляр не відхиляють.

Відсутність ознаки не означає заперечення. Коли вихідний екземпляр не містить семантичної характеристики, необхідної для визначення значущості чи геометричного представлення, предикат включення залишається невизначеним до уточнення за правилами того класу каталогу, до якого

належить об’єкт. Площа не замінює семантичного критерію. Для будівель підставу самостійного точкового представлення встановлюють за рядком каталогу для цього класу; з площі контуру, меншого за поріг, її автоматично не виводять, бо індивідуальне картографічне представлення будівлі зумовлюють також її призначення, статус і значущість.

Для доріг вирішальним критерієм є збереження зв’язності. Довжину лінійної ділянки оцінюють разом із typeRoad, роллю сегмента у мережі, наявністю ключових з’єднань із суміжними дорожніми ділянками, функціональним статусом дороги та допустимістю вилучення сегмента без руйнування чинних транспортних відношень. Для ділянок водотоків одночасно перевіряють дві метричні характеристики. Якщо ширина або довжина задана службовим кодом, відсутня чи виходить за межі домену, значення спочатку інтерпретують за правилами класу, і лише після цього використовують для визначення допустимого геометричного представлення водотоку.

Осьове представлення дорожньої мережі пов’язує геометрію дороги з її сегментацією та точками приєднання інших об’єктів. Ділянки проходження мостом або тунелем мають збігатися з віссю відповідної споруди, а перетини шляхів у різних рівнях не утворюють спільного транспортного вузла. Ці зв’язки показано на рисунку 2.4.

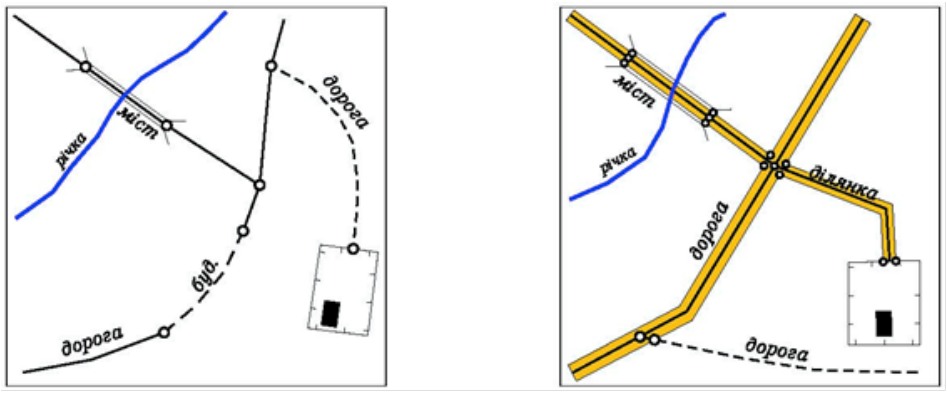


Рисунок 2.4 – Осьове представлення дороги та сегментація її зв’язків зі спорудами й суміжними шляхами

Джерело: розроблено автором на основі прикладного моделювання доріг.

Механічне вилучення навіть короткого дорожнього сегмента неприпустиме. Рішення залежить від дорожньої категорії, зв’язності мережі,

суміжних споруд і вертикального положення шляхів, які перетинаються у двовимірній проєкції, оскільки прості перетини ліній не завжди відтворюють справжню структуру транспортної мережі місцевості. Плановий перетин не доводить існування транспортного вузла. За невизначеного висотного положення геометричне перетинання фіксують як самостійний факт. Топологічне з'єднання встановлюють тільки після семантичного підтвердження, з урахуванням атрибутів дороги та обов'язкових умов збереження мережевої зв'язності.

Самостійний показ і включення до агрегату мають різні умови. Для класу «Квартали» (Blocks, код 0402) від масштабу 1:100 000 перевіряють, чи можна об'єднати суміжні полігони з площею, меншою за поріг. Їх зберігають серед кандидатів, доки не встановлено суміжність, семантичну сумісність та допустимість спільного контуру. Значення P_{grp} тут не означає, що квартал має самостійно з'явитися в цільовому наборі. Воно лише дає змогу перевірити його участь у групі суміжних кварталів, менших за поріг площі, з урахуванням масштабу, площі та умов агрегування, установлених для кварталів у таблицях 2.7 і 2.10.

Просторова близькість не тотожна суміжності кварталів. Для кварталів груповий кандидат формують за наявності встановленого правилами класу зв'язку, а допустимість спільного полігона оцінюють з урахуванням меж кварталів і вуличних коридорів у цільовому масштабі. Якщо об'єднання створює перетини з вулицями або порушує умову суміжності, кандидат не може бути прийнятий до похідного картографічного набору, незважаючи на правильність його кільцевої структури та характеристик площі. Походження кандидата фіксують через Lin.

Одиницею міжмасштабного простежування слугує пара «TOID — масштаб». Для кожного відібраного екземпляра метод зберігає зв'язок із вихідною топографічною сутністю, розмежовуючи її тотожність і цифровий запис конкретного представлення, незалежно від способу побудови одиничного або групового похідного геометричного представлення.

Семантично невизначені випадки щоразу розглядають самостійно. Лише після завершення відбору встановлюють допустиме геометричне представлення, виконують перетворення й перевіряють прийнятність сформованого кандидата за топологічними, семантичними та масштабними умовами.

2.3.2 Спрощення та згладжування геометрії

Після масштабного відбору спрощення зменшує координатну деталізацію допущеної геометрії. Згладжування коригує її обрис і може створювати нові координати, тому ці операції мають різні результати та критерії оцінювання [51; 56].

Для об’єкта x класу c оператор $\omega_{c,s}$ перетворює послідовність вершин V_x за параметром $\theta_{c,s}$, обраним для методу й масштабу s. Під час вилучення вершин результат $V'_{x,s}$ є підпослідовністю V_x та має зберігати визначальні особливості форми. Згладжування зі зміщенням координат виходить за цю умову; топологічні обмеження перевіряють для обох способів перетворення [4; 52].

$$\omega_{c,s}(V_x; \theta_{c,s}) = V'_{x,s}, \qquad V'_{x,s} \subseteq V_x \tag{2.10}$$

де $\omega_{c,s}$ — оператор спрощення для класу c і масштабу s; V_x — упорядкована послідовність вершин геометрії об’єкта x; $\theta_{c,s}$ — параметр спрощення (для алгоритму Дугласа – Пекера — допуск ε_s); $V'_{x,s}$ — послідовність вершин після спрощення.

Алгоритм Дугласа – Пекера [52] оцінює максимальне відхилення проміжних вершин від відрізка між кінцями поточного фрагмента лінії та рекурсивно залишає геометрично значущі вершини за встановленим допуском. Відстань вимірюється в одиницях просторової системи координат вихідного розрахунку. Для вершини з найбільшим відхиленням приймається рішення про розбиття фрагмента; математичний критерій у формулі (2.11) пов’язує найбільшу відстань із положенням усіх проміжних точок на цьому фрагменті.

$$d_{max} = \max_{a<i<b} \operatorname{dist}\left(p_i, \underline{p_a p_b}\right) \tag{2.11}$$

де d_{max} — найбільше відхилення проміжних вершин фрагмента лінії; p_a, p_b — кінцеві вершини фрагмента; p_i — проміжна вершина ($a < i < b$); dist — відстань від вершини p_i до відрізка $p_a p_b$, позначеного рискою зверху. Якщо d_{max} перевищує допуск спрощення ε_s, фрагмент поділяють у вершині з найбільшим відхиленням, інакше проміжні вершини вилучають.

Оцінку відхилення контуру доповнюють перевіркою дорожніх з'єднань, спільних полігональних меж і відношень із суміжними об'єктами. Навіть за малого зміщення та скорочення кількості вершин ці зв'язки можуть порушуватися. Такий контроль установлює допустимість результату спрощення.

Алгоритм Вісвалінгама – Вайатта [53] оцінює внесок вершини за площею трикутника, утвореного нею та двома сусідами. Вершини з найменшим внеском вилучають послідовно, після кожного вилучення оновлюючи площі суміжних трикутників. Поточну площу обчислюють як половину модуля векторного визначника за формулою (2.12).

$$A_i = \frac{1}{2}\left|\det(p_i - p_{i-1},\ p_{i+1} - p_{i-1})\right| \tag{2.12}$$

де A_i — ефективна площа вершини p_i, тобто площа трикутника з вершинами p_{i-1}, p_i, p_{i+1}; det — визначник матриці 2×2, рядками якої є координати векторів $p_i - p_{i-1}$ і $p_{i+1} - p_{i-1}$.

Згладжування змінює координатну форму й може збільшувати кількість вершин. Для його застосування необхідно окремо перевірити топологічні зв'язки, метричні допуски та збереження визначальних деталей, що має більше значення, ніж конкретна програмна реалізація оператора. Різницю між спрощенням і згладжуванням лінійної геометрії показано на рисунку 2.5.

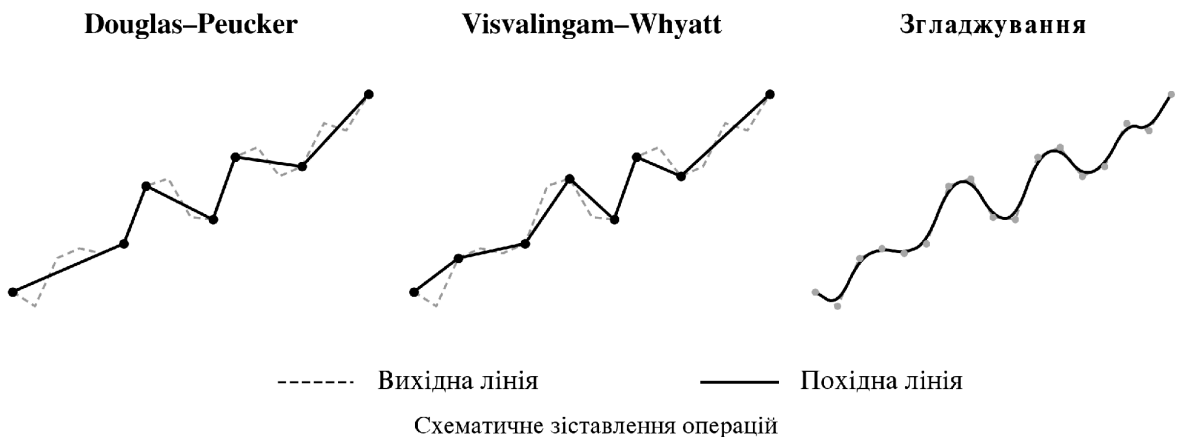


Рисунок 2.5 – Різниця між спрощенням за алгоритмами Дугласа – Пекера, Вісвалінгама – Вайатта та згладжуванням лінійної геометрії (схематично)

Джерело: розроблено автором за [51; 52; 53]; схематичне пояснення операцій генералізації.

Після перетворення перевіряють самоперетини, замкненість кілець, зміщення характерних точок і спільні межі; для мережі — ще й вузли та з’єднання з урахуванням висотного положення. Межі дії інструмента також істотні: функція PostGIS ST_SimplifyPreserveTopology підтримує топологію окремої геометрії, проте спільні межі полігонів потребують додаткового контролю [73]. Для опрацювання полігонального покриття PostGIS передбачає функцію ST_CoverageSimplify [74].

Для доріг спрощення підпорядковують зв’язності мережі. Алгоритм Дугласа – Пекера застосовують із масштабним допуском лише до геометрій, для яких установлено належний стан, зберігаючи кінцеві точки, структурні вузли мережі та їх просторові зв’язки з об’єктами у вихідному наборі. Самої малої відстані відхилення недостатньо: після вилучення вершин перевіряють, чи не змінено відношення між дорожніми сегментами, спорудами та шляхами різних рівнів і чи не утворено нових неприйнятних просторових перетинів, розривів або помилкових вузлів. Для ділянок водотоків захищають вузли гідрографічної мережі. Спрощення лінійної осі має залишати без зміни визначальні з’єднання, не створювати самоперетинів і зберігати допустиме положення водотоку у цільовому масштабі з урахуванням ширини водотоку та просторових відношень ділянок. Інші умови контролю діють для деревної рослинності. Зміна контуру рослинного масиву не повинна створювати непридатних полігональних фрагментів, порушувати топологію полігона або

підмінювати його механічно прорідженими точками, оскільки такий перехід порушує зміст суцільного або смугового деревного покриву території.

2.3.3 Агрегування та об’єднання геопросторових об’єктів

Агрегування утворює спільне картографічне представлення кількох вихідних об’єктів для заданого масштабу [4]. Допустимість групи залежить від каталогу класів, семантики та просторових відношень її учасників. Новому представленню потрібні узагальнені атрибути й опис походження, за яким можна перевірити його зв’язок із базовими об’єктами.

Суміжність полігонів визначають за довжиною перетину їхніх меж: якщо вона більша за нуль, полігони мають спільне ребро. Це лише спосіб перевірити суміжність, а не ще один нормативний поріг. На рисунку 2.6 спільну межу порівняно з дотиком в одній точці та з розташуванням полігонів на малій відстані без дотику [75].

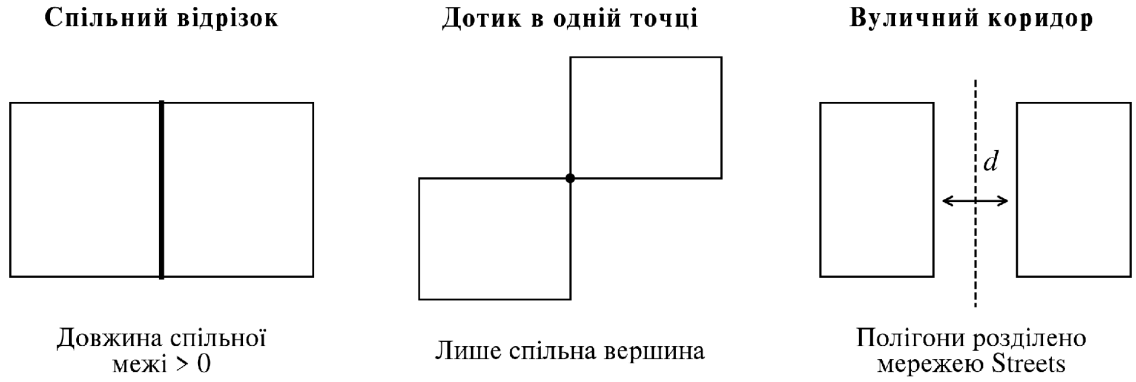


Рисунок 2.6 – Розмежування спільної межі, точкового дотику та просторової близькості кварталів (схематично) [76]

Джерело: розроблено автором за [76]; схема зв’язку геометричної суміжності й семантичного контролю.

$$\mathrm{Dist}\left(\mathrm{G}_{\mathrm{x_i}}, \mathrm{G}_{\mathrm{x_j}}\right) \leq \delta_{\mathrm{c,s}} \qquad (2.13)$$

де Dist — міра відстані між геометріями; G — геометрії об’єктів x_i і x_j (компонента G кортежу (2.2)); $\delta_{c,s}$ — допустима близькість для класу c та масштабу s.

Груповий кандидат Q формується лише з геометрично й семантично сумісних об’єктів. Оператор агрегування $\alpha_{c,s}(Q)$ створює спільну геометрію, а

прийнятність її визначають самостійні тести на топологію, атрибути, масштаб та походження.

$$\alpha_{c,s}(Q) = y_{c,s}, \qquad Q = \{x_1, \dots, x_n\}, \quad n \geq 2 \tag{2.14}$$

де $\alpha_{c,s}$ — оператор агрегування для класу c і масштабу s; Q — група вихідних об’єктів x_1, …, x_n; n — кількість об’єктів у групі; $y_{c,s}$ — утворений груповий кандидат.

Для перевіреної групи Q оператор $\alpha_{c,s}$ формує контур, узагальнює атрибути та зберігає встановлені топологічні відношення. Допустимий склад групи й семантичні правила є передумовами його виконання.

У ГІС-середовищах для геометричного об’єднання застосовують операції Union і Dissolve (у PostGIS — функцію ST_Union), тоді як Merge залежно від реалізації може об’єднувати записи в одному наборі, не усуваючи внутрішніх меж і не забезпечуючи самостійно потрібного узагальнення семантичних атрибутів. Назву, функціональне призначення, клас, масштабну придатність і походження групового представлення встановлюють додатковими правилами, пов’язаними зі змістом об’єктів.

$$\mathrm{Lin}(y_{c,s}) = \{\mathrm{TOID}(x_1), \dots, \mathrm{TOID}(x_n)\} \tag{2.15}$$

де $\mathrm{Lin}(y_{c,s})$ — множина ідентифікаторів TOID вихідних об’єктів, з яких утворено груповий кандидат $y_{c,s}$; $\mathrm{TOID}(x_k)$ — ідентифікатор TOID об’єкта x_k групи Q.

Кандидат групового представлення має службовий ключ процедури та відношення Lin до всіх вихідних TOID. GID прийнятого запису йому до завершення перевірок не присвоюють. Якщо ж прийнятий результат оформлюється як екземпляр TopographicObject, для нього обов’язкові GID і TOID із кратністю 1; дослідницьке Lin цієї вимоги не усуває і нового нормативного способу присвоєння TOID не встановлює. Склад групи описують власні ключі та зв’язки походження, і вихідних TOID вони не змінюють.

Для кварталів порогові площі за шістьма масштабами становлять 625, 2 500, 10 000, 40 000, 250 000 і 1 000 000 м². Починаючи з 1:100 000

допускається формування агрегованого контуру суміжних кварталів, менших за поріг площі, за збереження семантичних обмежень. Наявність двох близьких полігонів ще не означає допустимості їх об’єднання.

Групування кварталів починається з перевірки суміжності. До об’єднання можуть залучатися лише семантично сумісні квартали з площею, меншою за поріг, для яких у цьому масштабі передбачене утворення спільного полігонального представлення, без примусового об’єднання полігонів через роздільні вуличні коридори або інші перешкоди. Граф близькості, побудований за умовою (2.13), формує тільки попередні просторові пари. Рішення про агрегування потребує підтвердженого спільного просторового відношення та виконання картографічних обмежень за умови збереження просторових відношень сусідніх кварталів і вуличної мережі, а не одного тільки малого значення Dist.

Вуличні коридори обмежують геометричне об’єднання кварталів. Буферизація чи побудова оболонки може утворити валідний полігон, проте його нові ділянки не повинні перетинати вулиці й змінювати межі просторово відокремлених кварталів у цільовому масштабному представленні. Геометричну коректність результату перевіряють незалежно від його семантичної та міжкласової топологічної допустимості, бо валідність полігона не підтверджує збереження зв’язків із сусідніми об’єктами та вуличною мережею.

Умова прийняття кожного агрегату є складеною. Для кожної групи послідовно встановлюють масштабну придатність, суміжність вихідних полігонів, сумісність атрибутів, відсутність неприйнятних перетинів з вулицями і повноту походження через Lin з урахуванням умов узагальнення геометрії у масштабі. Порушення обов’язкового критерію зупиняє прийняття. Непридатний кандидат може залишатися діагностичним обчислювальним результатом, але не отримує статусу завершеного похідного картографічного представлення, оскільки придатність форми без відповідності семантичним критеріям не забезпечує коректного представлення об’єктів.

2.3.4 Геометричний колапс та зміна просторової розмірності

Колапс змінює просторову розмірність геометрії об’єкта: полігон перетворюється на лінію чи точку, лінію — на точку. Оператор колапсу записано так:

$$\kappa_{c,s}: D^{d}_{c,s} \to G^{d'}, \qquad D^{d}_{c,s} \subseteq G^{d}, \quad 0 \le d' < d \le 2 \tag{2.16}$$

де $\kappa_{c,s}$ — оператор зміни просторової розмірності для класу c і масштабу s; G^{d} — множина геометрій розмірності d (0 — точка, 1 — лінія, 2 — полігон); $D^{d}_{c,s}$ — множина геометрій розмірності d об’єктів класу c, для яких у масштабі s допущено колапс; d і d' — розмірності вхідної та похідної геометрій.

Для будівель перехід від полігонального контуру до точкового умовного знака має семантичні передумови. Будівля з площею, меншою за поріг, може зберігатися самостійним орієнтирним знаком лише за підтвердженої значущості й допуску, встановленого прикладною моделлю будівель (табл. 2.3). Механічний колапс усіх малих контурів неприпустимий.

$$\mathrm{Apply}(\kappa_{c,s}, x) = 1 \Leftrightarrow P(c,s)(x) = 1 \wedge \mathrm{Geom}_s(x) \neq \emptyset \wedge d_s(x) < d(x) \tag{2.17}$$

де $\mathrm{Apply}(\kappa_{c,s}, x)$ — ознака застосування оператора колапсу до об’єкта x; $P(c,s)(x)$ — предикат включення (2.7); $\mathrm{Geom}_s(x)$ — допустиме геометричне представлення об’єкта в масштабі s (2.6); $d(x)$ і $d_s(x)$ — розмірності вихідної геометрії та геометрії в масштабі s; $\emptyset$ — порожня множина.

Функція PostGIS ST_PointOnSurface [77] розміщує обчислену точку в межах поверхні, тоді як функція ST_Centroid [78] такої властивості не гарантує. Положення остаточного умовного знака визначають під час картографічного оформлення.

Для переходу Polygon→Line у гідрографії необхідне семантичне зіставлення: клас «Поверхня річок і водотоків» (SurfaceRiver, код 0302) і клас «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303) належать до різних класів топографічних об’єктів. Побудовану вісь перевіряють за ознаками водотоку, шириною, довжиною та зв’язністю мережі. Рисунок 2.7 узагальнює три види геометричних переходів. Зображена на схемі

водойма демонструє форму геометричної операції; для водойм точковий стан може бути дозволений за умовами прикладної моделі цього класу, однак його прийняття потребує семантичної підстави, а не лише обчислення внутрішньої точки. Чи допустимий перехід насправді, вирішують лише правила класу. Перехід від класу «Поверхня річок і водотоків» (код 0302) до класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (код 0303) має додатковий класифікаційний крок: відповідність новоутвореного запису каталожному коду 0303 визначають за його власними умовами, а не лише за зміненою розмірністю геометрії. Новоутворений запис не може механічно успадкувати featureTypeCode 0302.

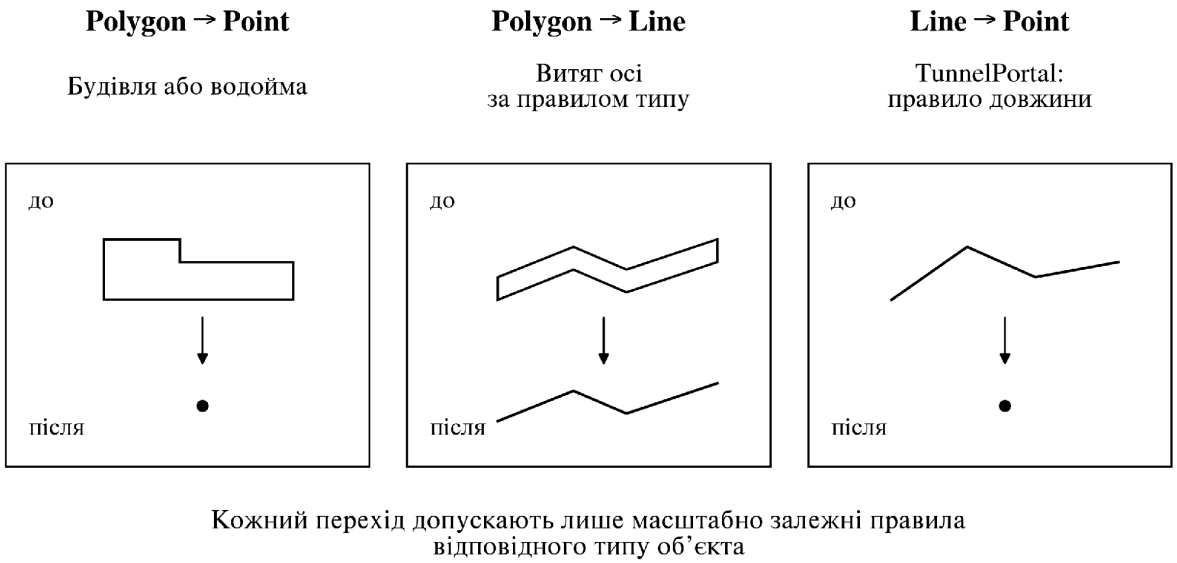


Рисунок 2.7 – Схематичні геометричні переходи; можливість їх застосування визначається класом об'єкта

Джерело: розроблено автором.

Після незалежної перевірки масштабу, семантики, топології та походження похідна геометрія стає основою масштабно залежного картографічного представлення (підрозділ 2.4).

2.4 Масштабно залежне геометричне й картографічне представлення

Картографічне представлення поєднує допустиму геометрію, умовний знак і параметри його відтворення [3; 38]. Геометрію формують методами підрозділів 2.2–2.3; upperScale характеризує межу її масштабної придатності.

Поля Symbol25K, Symbol50K, Symbol100K, Symbol200K, Symbol500K і Symbol1M адресують знаки, графічні властивості яких задано правилами оформлення.

Стиль застосовують до відібраного екземпляра з дозволеним геометричним представленням. Рівень ZOOM керує переглядом, а зв'язок масштабу карти з upperScale визначається моделлю даних [13].

Вихідною основою є базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000. Для кожного із шести похідних рівнів визначається власний картографічний знак за класом, семантичними характеристиками та допустимою геометрією. Такі рішення є складником розроблених прикладних моделей і не залежать від адресації тайлів вебсервісу.

2.4.1 Визначення масштабної придатності геометричного представлення

Масштабна придатність характеризує конкретне геометричне представлення об'єкта. Якщо полігональний контур утрачає придатність у дрібнішому масштабі, правила можуть передбачати лінійний чи точковий стан або невключення до набору. Сам об'єкт місцевості водночас продовжує існувати [4].

Роздільну здатність для цільового масштабу s визначено як $r_s = 0{,}00028$ м $\cdot M_s$, де M_s — знаменник масштабу, а 0,00028 м відповідає умовному розміру пікселя на карті. Цей параметр використовують під час установлення меж, за яких об'єкти ще можна розрізнити, та допусків геометричних перетворень; сам по собі він не визначає допустимості класу об'єктів.

Для класу й масштабу перевіряють предикат P(c,s)(x), допустимість стану $\mathrm{Geom}_s(x) \in \mathcal{G}(c,s)$ та коректність побудованої геометрії (підрозділи 2.2–2.3). Атрибут upperScale узагальнює масштабну придатність уже встановленого стану: він фіксує верхню масштабну межу поточного геометричного представлення. Значення беруть із довідника UpperScale, тому поле містить код масштабної межі, а не довільний числовий знаменник. Значення upperScale належить конкретній геометричній версії, тож за переходу до іншого масштабу той самий TOID може отримати нову геометрію

та інший знак. Відбір і символізацію визначають правила класу, для яких масштабна межа — лише одна з характеристик представлення.

Вихідна схема може бути неповною. Якщо вихідний набір не містить upperScale, GID або Symbol25K–Symbol1M, значення цільових полів не виводять довільно, а встановлюють на підставі класу каталогу, масштабу, семантики й допустимої геометрії. Походження зберігають незалежно від символізації. Для одиничного представлення TOID відтворює тотожність об’єкта, GID ідентифікує конкретний похідний запис, а для групового результату зв’язок з усіма вихідними екземплярами зберігає самостійне відношення Lin.

Поля Symbol25K–Symbol1M адресують умовні знаки після визначення допустимої геометрії; їхнє призначення розкрито у пункті 2.4.2. Підготовлений масштабний набір публікують із параметрами перегляду. ZOOM регулює наближення, тоді як склад даних і дозволена геометрія залишаються підпорядкованими правилам каталогу [15; 34].

Знаменник масштабу тайлової матриці не визначає складу об’єктів. У WMTS параметри TileMatrixSet, включно з ScaleDenominator, розміром комірки й системою координат, задають просторову адресацію тайлів на обраному рівні деталізації, але не самі правила відбору топографічних об’єктів [34; 65]. Рівні перегляду встановлює конфігурація геопорталу. Їх зіставляють із підготовленими масштабними наборами за технічною конфігурацією Національного геопорталу НІГД, перевіряючи відповідно до правил тематичний склад і геометрію; самого збігу знаменників upperScale та ScaleDenominator недостатньо.

На рисунку 2.8 простежено послідовність від допуску об’єкта й геометричного представлення до масштабної межі upperScale та прототипу Symbol. Публікацію WMS або WMTS налаштовують для вже підготовлених представлень. Завдяки цьому зміна ZOOM під час перегляду керує вибором відображення без повторного запуску генералізації.

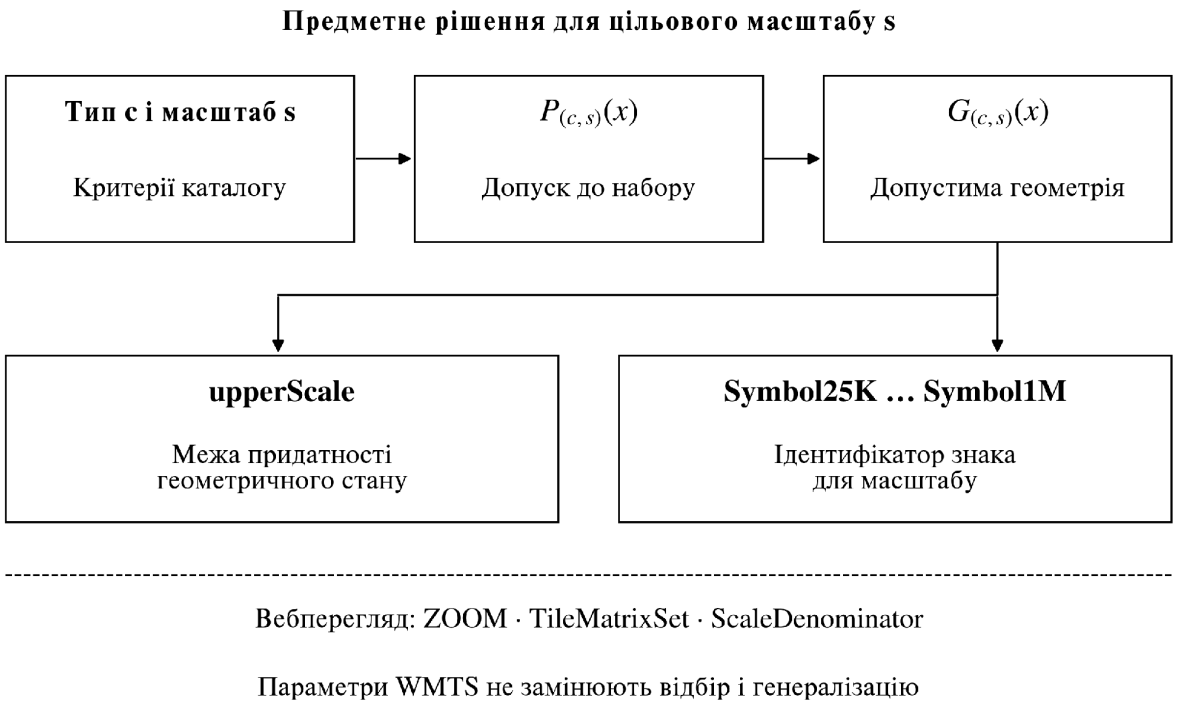


Рисунок 2.8 – Розмежування масштабної придатності геометрії, символізації та рівнів масштабування (ZOOM)

Джерело: розроблено автором.

2.4.2 Формування масштабно залежних умовних знаків

Власні атрибути Symbol25K, Symbol50K, Symbol100K, Symbol200K, Symbol500K і Symbol1M пов’язують цифрове представлення із зареєстрованим умовним знаком кожного масштабу. Знак вибирають лише після перевірки масштабної придатності й геометричного представлення. Коди Symbol25K–Symbol1M є категоріальними ідентифікаторами, тож числова близькість або інтерполяція між ними не має картографічного змісту. Знак обирають за масштабом, featureTypeCode, геометрією та семантикою екземпляра в таблицях цільової моделі. За допустимого переходу від полігона до точки для того самого TOID може знадобитися інший знак; символізація враховує перевірений результат генералізації.

У математичній моделі статті [4] передбачено вектор ідентифікаторів масштабних символів. У дисертації правило Symbol(o,s) задає вибір зареєстрованого графічного прототипу для екземпляра o в масштабі s після перевірки його класу, семантичних ознак, допустимої геометрії та наявності умовного знака для цього поєднання.

Відповідність кодів умовним знакам задано для поєднань «клас — масштаб — геометрія», внесених до каталогу умовних знаків Специфікацій [38]. Відсутній код у вихідному матеріалі потребує зіставлення з цільовою схемою, а незаповнене обов’язкове поле вже сформованого екземпляра TopographicObject не дає змоги визнати представлення завершеним.

Коди умовних знаків не обчислюються арифметично. За відсутності готових полів Symbol25K–Symbol1M у початковій схемі код визначають через таблиці цільової моделі, допустиме геометричне представлення та обов’язкові семантичні ознаки обраного топографічного об’єкта. Поки необхідну передумову не підтверджено, зіставлення з каталогом умовних знаків залишають невизначеним, зберігають походження об’єкта й не підміняють відсутній прототип для цього цільового масштабу випадковим чи узагальненим графічним рішенням.

На вебкарті масштабний знак застосовують після прийняття рішення за даними. ZOOM і TileMatrixSet задають параметри перегляду, але не підміняють правила визначення Symbol(o,s) для класу каталогу та цільового масштабу [34; 65]; цю послідовність показано на рисунку 2.9.

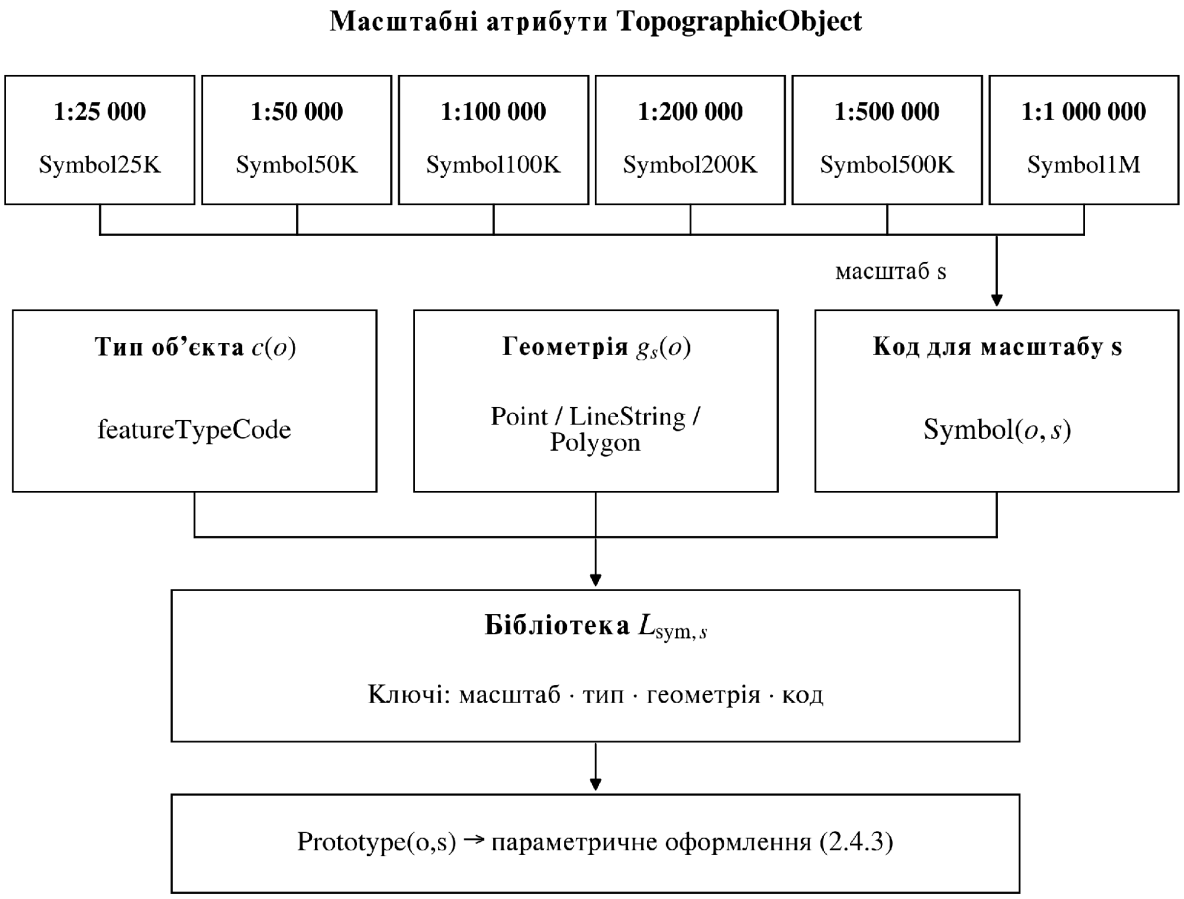


Рисунок 2.9 – Вибір прототипу умовного знака за масштабом

Джерело: розроблено автором.

Рисунок 2.9 відтворює вибір прототипу за масштабом, класом і геометрією, не змінюючи координат об'єкта.

2.4.3 Параметричні правила картографічного представлення

Після визначення геометричного представлення і прототипу знака задають масштабно залежні параметри його відтворення: колір, товщину контуру, заповнення, підпис і порядок накладання. Семантика від цього не змінюється. Ці параметри впливають лише на картографічне представлення і зберігаються незалежно від даних про геометричне положення топографічного об'єкта.

Для класу «Водойми» прикладна модель передбачає відображення певних класів водойм полігональними умовними знаками. Товщина контуру і підпис — графічні характеристики, до критеріїв допуску геометрії вони не належать; між класом водойми та її умовним знаком зберігається формальна відповідність.

Щоб відтворити встановлені графічні розміри на екрані, враховують параметри візуалізації: пряме прирівнювання міліметрів до сталої кількості пікселів змінювало б вигляд знака. Мінімальний рівень масштабування (Min ZOOM), з якого шар показують на вебкарті, — самостійна умова вебпоказу, тож картографічний масштаб і рівень тайлової матриці враховують як різні аргументи конфігурації публікації [34; 65].

Для однакового набору даних і масштабу необхідні однакові правила, версії бібліотеки умовних знаків та порядок накладання. Інакше два сервісні зображення можуть бути геометрично правильними, але мати різні підписи або неоднакові графічні пріоритети. Структуру параметричного правила картографічного представлення показано на рисунку 2.10.

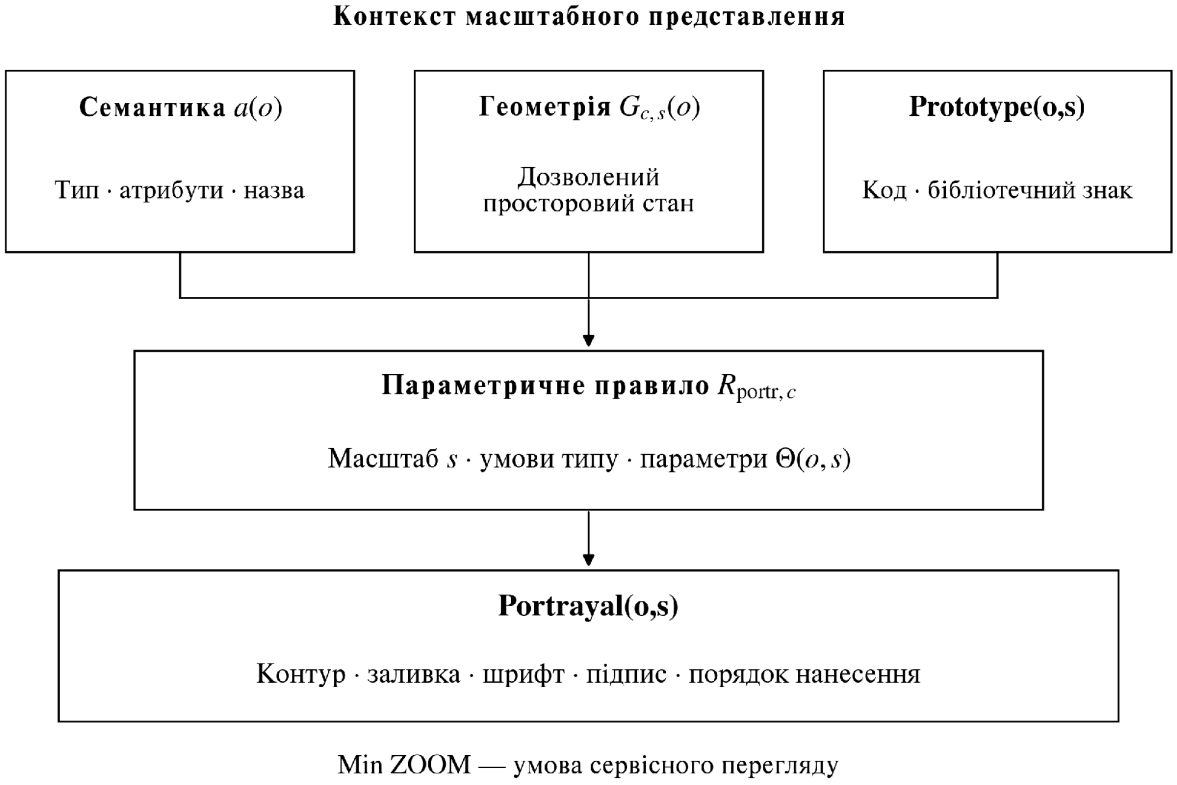


Рисунок 2.10 – Структура параметричного правила картографічного представлення
Джерело: розроблено автором.

Правила застосовують до допущених геометрій. Для будівель самостійний точковий знак залежить від підтвердженої значущості, для кварталів потрібне збереження вуличних коридорів, а для доріг і ділянок водотоків — зв’язності своєї мережі без втрати топологічних зв’язків. Для

водойм застосовують GM_Polygon або, за спеціальною семантичною умовою меншої водойми, GM_Point. Для деревної рослинності точковий стан може бути нормативно дозволений за підтвердженої значущості, але механічне проріджування не доводить такої підстави, зокрема в масштабі 1:100 000; допустимість умовного знака визначають за правилами каталогу й масштабної генералізації, а не за візуальною щільністю.

Сервісний формат не визначає зміст карти. WMS GetMap і WMTS GetTile можуть передавати однакові за змістом підготовлені представлення, однак побайтова тотожність PNG можлива лише за узгоджених просторового охоплення, розмірів, стилю й параметрів растеризації. Звичайні запити можуть мати різні розміри. Тому відповіді GetMap і GetTile різних розмірів зіставляють за просторовим охопленням і графічними характеристиками, не прирівнюючи різні піксельні матриці до однакових байтових послідовностей (пункт 3.5.3) [34; 79].

2.5 Узгодженість масштабних представлень топографічних геопросторових даних

Узгодженість не обмежується подібністю геометрій. Для кожного похідного представлення метод поєднує перевірку тотожності об’єкта, семантики, геометричної допустимості, міжоб’єктних топологічних відношень і відповідності версії вихідних даних та правил на кожному з шести цільових масштабів [4].

Контроль має сталу послідовність етапів. Після масштабного відбору, перетворення геометрії та вибору умовного знака, описаних у підрозділах 2.2–2.4, перевіряють взаємну сумісність сформованих станів для кожного класу каталогу поодинці. Порушення зумовлює коригування або відхилення.

2.5.1 Збереження ідентичності топографічного об’єкта

Під час переходу від базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 до похідного представлення можуть змінюватися контур, деталізація та знак тієї самої сутності. Міжмасштабну тотожність тому встановлюють за

документованим зв’язком із базовим екземпляром, його класом і походженням. Координатний збіг або відмінність контурів перевіряють уже в межах цього зв’язку [4; 80].

Ідентифікатори GID і TOID мають різне призначення: перший описує цифровий запис прикладної моделі, другий як стійкий ідентифікатор дає змогу простежити базову топографічну сутність в усіх масштабних представленнях. В обох випадках визначено кратність 1. Для групових кандидатів повну множину початкових TOID фіксують самостійним відношенням Lin.

За featureTypeCode встановлюють класифікаційну належність екземпляра. Для обліку масштабних результатів цей клас поєднують із вихідним TOID та масштабом; геометрію оцінюють за власними критеріями підрозділів 2.2–2.3.

Ідентифікатор ресурсу WFS має бути унікальним і стійким у межах сервісу відповідно до стандарту OGC Web Feature Service 2.0.2 (OGC 09-025r2) [35]. Він адресує сервісний ресурс, тому ідентифікатор об’єкта мовою GML (gml:id) [81] і TOID виконують різні функції: відповідно сервісну ідентифікацію та зв’язок із топографічною сутністю.

Тотожність не встановлюють збігом координат. У вихідних класах TOID використовують для ідентифікації топографічної сутності, тоді як GID належить до цільової схеми її цифрових представлень і не повинен механічно ототожнюватися з TOID [4]. Один TOID простежують у кількох масштабах. За відсутності готового поля GID у вихідній структурі запис похідного набору ідентифікують за правилом цільової моделі, не змінюючи початкової тотожності об’єкта, класифікаційного коду та встановлених часових атрибутів.

Одиницею обліку є пара «TOID — масштаб». Кількість цифрових представлень у шести наборах тому може перевищувати число різних базових сутностей; повторення TOID між масштабами ще не свідчить про дублювання об’єктів [4]. Таке розмежування потрібне для версійного контролю.

Груповий контур має множинне походження. Для похідного результату, що поєднує кілька базових сутностей, перевіряють повноту відношення Lin, відповідність кожного TOID початковому учасникові та допустимість групової геометрії за правилами обраного цільового масштабу [4]. Лише наявність усіх посилань недостатня. Якщо утворений агрегат порушує суміжність, вуличний коридор або інші міжкласові обмеження, такий кандидат відхиляють у цьому масштабі незалежно від геометричної валідності й коректно відтворених посилань на всіх вихідних учасників.

Часові межі цифрової версії описують beginLifespanVersion із кратністю 1 та endLifespanVersion із кратністю 0…1. Якщо обидві відмітки задані, завершення версії має бути пізнішим за початок. Ці дати фіксують життєвий цикл запису; час існування об’єкта на місцевості є іншою характеристикою [82].

Коригування геометрії тієї самої сутності зберігає TOID; цифрові версії розрізняють засобами прикладної схеми [4; 63]. Під час злиття або поділу перевіряють склад походження. Для нового групового представлення визначають Lin і власний ідентифікатор запису, зберігаючи базові TOID та часові зв’язки учасників. Ідентифікацію, множинне походження та версійність похідних представлень показано на рисунку 2.11.

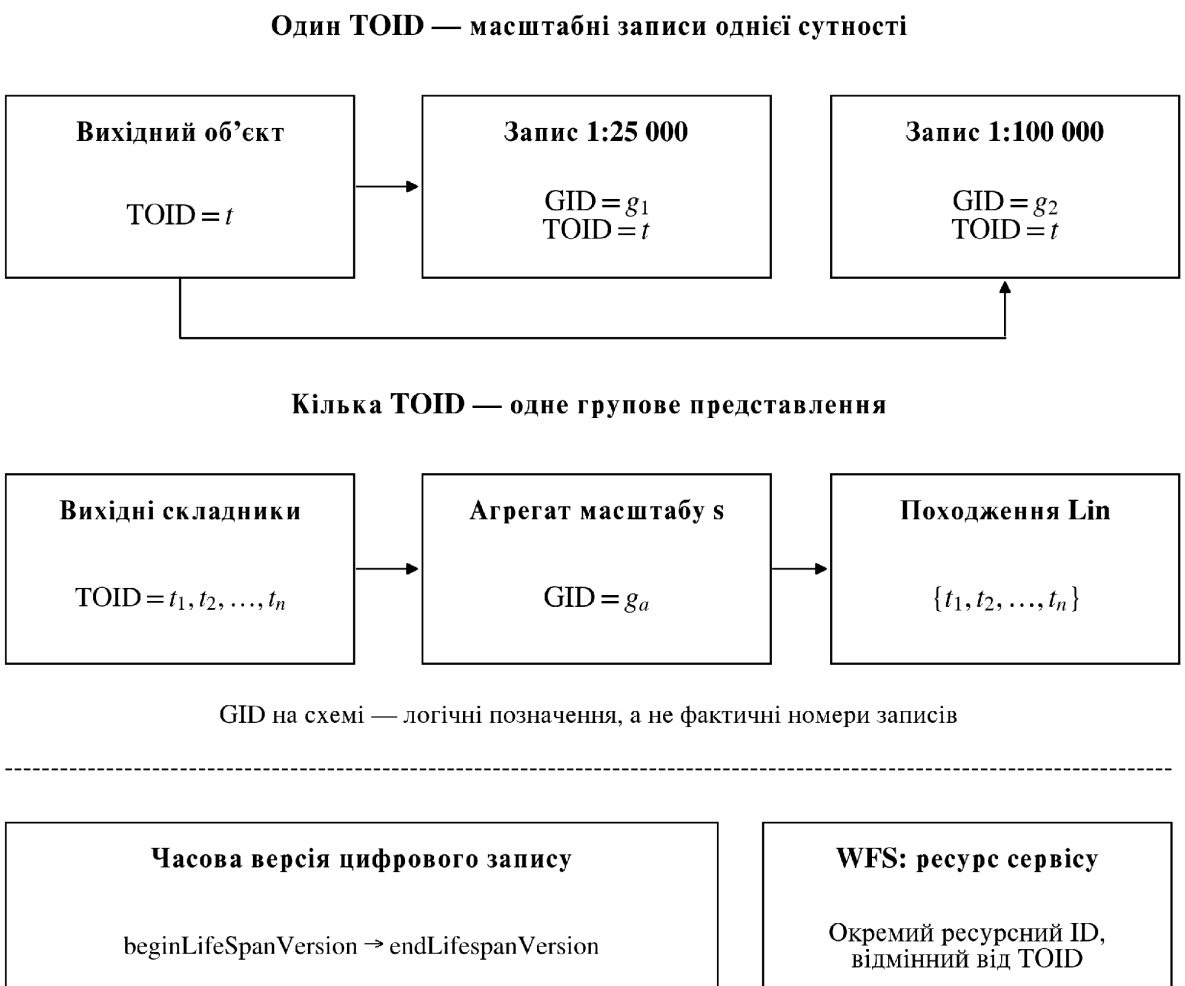


Рисунок 2.11 – Ідентифікація, множинне походження та версійність похідних представлень

Джерело: розроблено автором.

Сервісна ідентифікація не замінює походження. У відповіді WFS GetFeature перевіряють, щоб адреса ресурсу, цифровий запис і вихідний TOID залишалися розмежованими, а його featureTypeCode та масштаб відповідали підготовленій прикладній моделі в межах цільового набору [4; 35]. Ця вимога стосується й агрегатів через Lin. Для одиничного представлення перевіряють TOID, клас, допустиму геометрію, масштаб і цифрову версію, а для групового — додатково повний склад походження Lin, установлені семантичні характеристики й каталожні обмеження. Після ідентифікації виконують топологічні перевірки. Результати кожної перевірки зберігають прив'язаними до цільового масштабу та редакції правил, щоб надалі розмежовувати зміни

даних і картографічного представлення під час незалежного формування наборів шести масштабів.

2.5.2 Топологічні правила та обмеження

Після формування похідного представлення перевіряють його просторові відношення з іншими об’єктами. Полігон без самоперетинів може накладатися на суміжну територію; прості лінії можуть перетинатися без мережевого з’єднання. Тому топологічні обмеження пов’язують із локалізацією, семантикою, масштабом і допустимими відношеннями задіяних класів об’єктів.

Контроль охоплює три рівні. Для кожної геометрії перевіряють непорожність, тип, кільця, самоперетини та самонакладання. У межах одного класу об’єктів оцінюють перекриття, дотики, спільні межі й повторювані точки, а між різними класами — встановлені просторові відношення та мережеві зв’язки. Функція PostGIS ST_IsValid оцінює валідність геометрії; непорожність, тип та внутрішньо- й міжкласові відношення перевіряють іншими засобами [83; 84; 85].

Топологічні обмеження записано правилами топології бази геоданих [84]. Правило Must Not Overlap («не накладатися») забороняє накладання внутрішніх частин однорідних полігонів, допускаючи спільне ребро чи вершину. Правило Must Not Have Gaps («не мати прогалин») застосовується лише до тих сукупностей полігонів, які повинні утворювати суцільне покриття. Семантичні винятки і міжкласові зв’язки встановлюються в каталогах шести досліджених класів.

Семантичний виняток потребує підтверджених семантичних ознак. Для класу «Водойми» (StandingWater, код 0301) правило Must Not Overlap With має виняток щодо класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303) за MainWatercourse = Yes та TypeStandingWater = 3 (озеро) або 4 (водосховище). Службове значення не підтверджує ознаку. Якщо семантичне поле відсутнє, не інтерпретується або не належить до допустимого

домену, рішення про застосування винятку залишають невизначеним до уточнення згідно з доменами семантичних ознак цього класу каталогу.

Оригінальна схема гідрографічної мережі на рисунку 2.12 показує, як осі водотоків з'єднуються через полігональні водні об'єкти. Умовні внутрішні ділянки мають значення verticalPosition «relativeSurface»; їхню роль визначає зв'язність мережі, тому така вісь не створює додаткового самостійного водного об'єкта. У лінійній мережі розрізняють самоперетин, контакт кінців, перехрещення на площині та семантично підтверджене з'єднання. Після спрощення кінцеві точки й структуру графа перевіряють саме з урахуванням цих відмінностей [83; 84], а щоб трактувати двовимірний перетин як вузол мережі, потрібні дані про висотне положення.

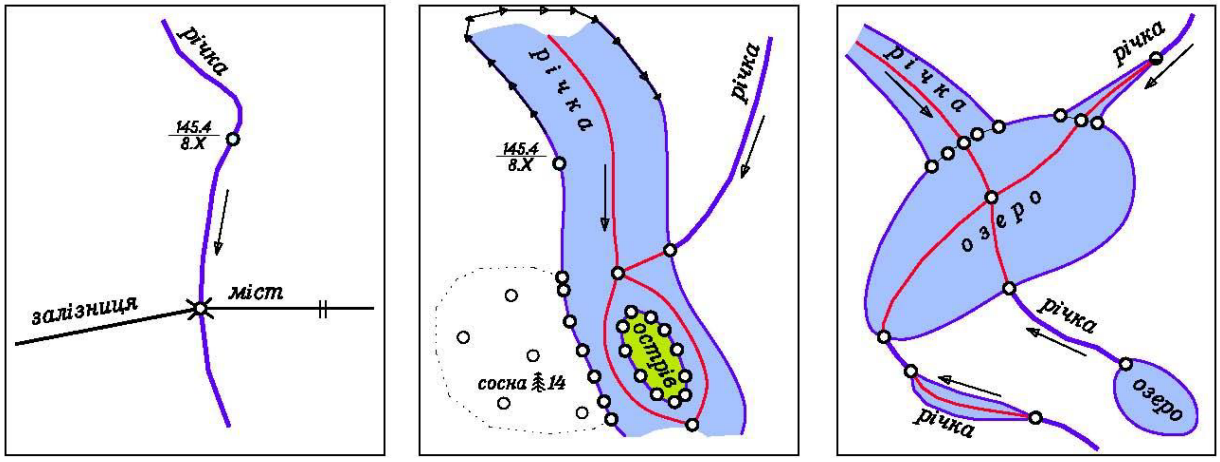


Рисунок 2.12 – Осьові лінії та вузлові зв'язки гідрографічної мережі

Джерело: ілюстрація просторових зв'язків із матеріалів опрацювання прикладної моделі Watercourse.

Просторовий перетин не гарантує транспортного вузла. Для доріг і вулиць розрізняють перехрещення осей на площині та підтверджене мережеве з'єднання; останнє визначають за положенням відносно поверхні (verticalPosition) та конструктивними характеристиками дороги. Якщо даних недостатньо, перетин залишається лише геометричним фактом і новим вузлом графа не стає. Збереження кінцевих точок не вичерпує мережевого контролю. Після спрощення доріг перевіряють проміжні вузли, приєднання мостів і тунелів, ізольовані компоненти й рівні перетину, адже навіть мале координатне зміщення може змінити зміст транспортного зв'язку.

Для водотоків мережевий контроль ведуть за власними правилами. Для класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303) зіставляють кінцеві точки, приєднання до інших лінійних ділянок і полігональних водних об’єктів, допустимість осьового представлення та умови збереження гідрографічної зв’язності в похідному масштабному наборі топографічних геопросторових даних. Відсутність контакту не доводить помилки. Якщо ізольована ділянка відповідає фактичному типу та геометричним правилам, її не відхиляють лише через брак спільного кінцевого вузла або відсутність сусідньої ділянки у заданому цільовому масштабі.

Близькість кварталів не означає суміжності. Для класу «Квартали» (Blocks, код 0402) спільне представлення допустиме тільки за підтвердженого правилами класу зв’язку, сумісності атрибутів та збереження меж і вуличних коридорів до застосування операції геометричного об’єднання. Буферне зближення, що створює неприйнятне накладання на вулиці, залишається діагностичним кандидатом і прийнятим агрегованим картографічним об’єктом не стає — незалежно від геометричної близькості вихідних контурів і правильності відношення походження Lin.

Міжмасштабний контроль застосовують за правилами кожного класу. Для будівель у масштабах 1:50 000 і 1:100 000 рядову щільну забудову узагальнюють у квартали, а визначні будівлі можуть залишатися самостійними орієнтирами. Для деревної рослинності перевіряють контури масивів; діагностичне проріджування точок ще не є прийняттям точкових знаків на 1:100 000. Для водойм спеціальне точкове представлення допускають лише за встановленою семантичною значущістю (табл. 2.15).

Результати геометричних, внутрішньокласових і міжкласових тестів зіставляють з масштабом, вихідними TOID, множинним походженням Lin та станом вихідних даних. Це дає змогу локалізувати порушення й визначити склад повторних перевірок після виправлення. Контроль на цьому не завершується. Після геометричного коригування суміжні об’єкти перевіряють знову, бо усунення перекриття здатне утворити прогалину, а переміщення лінії

— порушити мережеве з'єднання. Контроль якості організовано згідно зі стандартом ISO 19157-1:2023 [29], з урахуванням обмежень конкретних класів.

Валідна геометрія не гарантує прийнятності масштабного представлення. Для кожного обов'язкового тесту розрізняють три результати: 1 — виконано, 0 — порушено, ⊥ — не визначено через нестачу підтверджених ознак. Складене рішення приймають лише за виконання всіх застосовних умов; установлене порушення відхиляє кандидата, а невизначеність передбачає уточнення вихідних характеристик.

$$\begin{gathered} Q_s(o) = \delta_s^a(o) \wedge \delta_s^g(o) \wedge \delta_s^t(o) \wedge \delta_s^p(o), \\ \delta_s^j(o) \in \{1,0,\perp\}, \qquad j \in \{a,g,t,p\} \end{gathered} \tag{2.18}$$

де $Q_s(o)$ — результат контролю придатності об'єкта o похідного набору в масштабі s; δ_s^a, δ_s^g, δ_s^t, δ_s^p — відповідно семантична, геометрична, топологічна й картографічна складові перевірки; j — позначення складової; 1 — умову виконано, 0 — порушено, ⊥ — невизначеність.

Кон'юнкцію у формулі (2.18) обчислюють за правилами сильної тризначної логіки, тобто як мінімум за порядком $0 < \perp < 1$: результат дорівнює 0, якщо хоча б одна складова дорівнює 0; дорівнює 1, якщо всі складові дорівнюють 1; в інших випадках дорівнює ⊥. Так само діє оператор AND у SQL, де невизначеність подано значенням NULL, тому реалізація в PostgreSQL/PostGIS не потребує додаткових правил (пункт Д.6).

2.5.3 Узгоджене оновлення похідних масштабних представлень

Для кожного з шести масштабів установлено процедуру повторного формування похідного набору з актуального стану базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Вона передбачає збереження походження, перевірку масштабу й повторний топологічний контроль. Для кожного s застосовують власні умови відбору, геометричні представлення, параметри операторів і правила оформлення, тож спільне джерело дає різні геометрії. Зміна координат впливає на просторове перетворення та пов'язані

об’єкти. Коригування кольору або шрифту стосується лише картографічного вигляду.

Обсяг повторних обчислень визначають зміни об’єкта та конфігурації масштабу. Поява або припинення існування сутності, коригування координат, типу чи значущості змінюють вхідні дані; перегляд порогів, геометричних переходів або знаків — правила. Наслідки оцінюють для кожного випадку: новий колір підпису зберігає координати полігона, а зміна площі біля порога може змінити рішення про включення [4].

Залежність одиничного представлення від вихідного об’єкта простежується за TOID, який зберігає тотожність об’єкта між масштабами; атрибут GID розрізняє цифровий запис похідного набору й не замінює зв’язку з вихідною сутністю. Для агрегованих геометрій застосовується відношення множинного походження Lin, оскільки до одного похідного контуру можуть увійти кілька вихідних об’єктів. За зміни будь-якого учасника такої групи повторно перевіряють умови її утворення, допустимість меж і збереження всіх зв’язків походження [63; 86].

Аналіз походження доповнюють просторовим оточенням. Новий квартал, дорога чи водотік може змінити суміжність, групування або мережеві зв’язки об’єктів, до Lin яких раніше не входив. Область перерахунку охоплює ці залежності та тематичні класи, на які поширюється змінений предикат; кожний масштаб опрацьовують незалежно.

Для окресленої області впливу повторно формують представлення й перевіряють їх масштаб, базові TOID, склад Lin та версію правил. Просторові залежності можуть розширити цю область до групи об’єктів або ділянки мережі.

$$D_s^{t+1} = F_s(B^{t+1}; \Theta_s) \qquad (2.19)$$

де D_s^{t+1} — похідний набір масштабу s після оновлення; t — порядковий номер стану даних (t + 1 — стан після оновлення); F_s — процедура формування похідного набору масштабу s; B^{t+1} — актуальний стан даних базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000; Θ_s — правила масштабу s (умови

відбору, геометричні представлення, параметри операторів і правила оформлення).

Оновлені представлення перевіряють за класом, атрибутами, геометрією, топологією, умовним знаком і походженням. Для мереж контролюють вузли, для суміжних покриттів — узгодженість меж. Придатним є лише результат, який виконує всі встановлені для нього обов’язкові умови.

Під час оновлення фіксують стан вихідної топографічної основи, масштаб, версію правил та зв’язки походження. Часові межі версії цифрового запису характеризують атрибути beginLifespanVersion і endLifespanVersion. TOID зберігає зв’язок з вихідною сутністю. GID ідентифікує конкретний похідний запис.

На рисунку 2.13 показано аналіз залежностей за TOID, Lin і просторовим оточенням у разі зміни даних або правил. Область повторних операцій визначають для кожного з шести масштабів самостійно; перед випуском контролюють геометрію, семантику, топологію, версії та незалежність масштабних гілок.

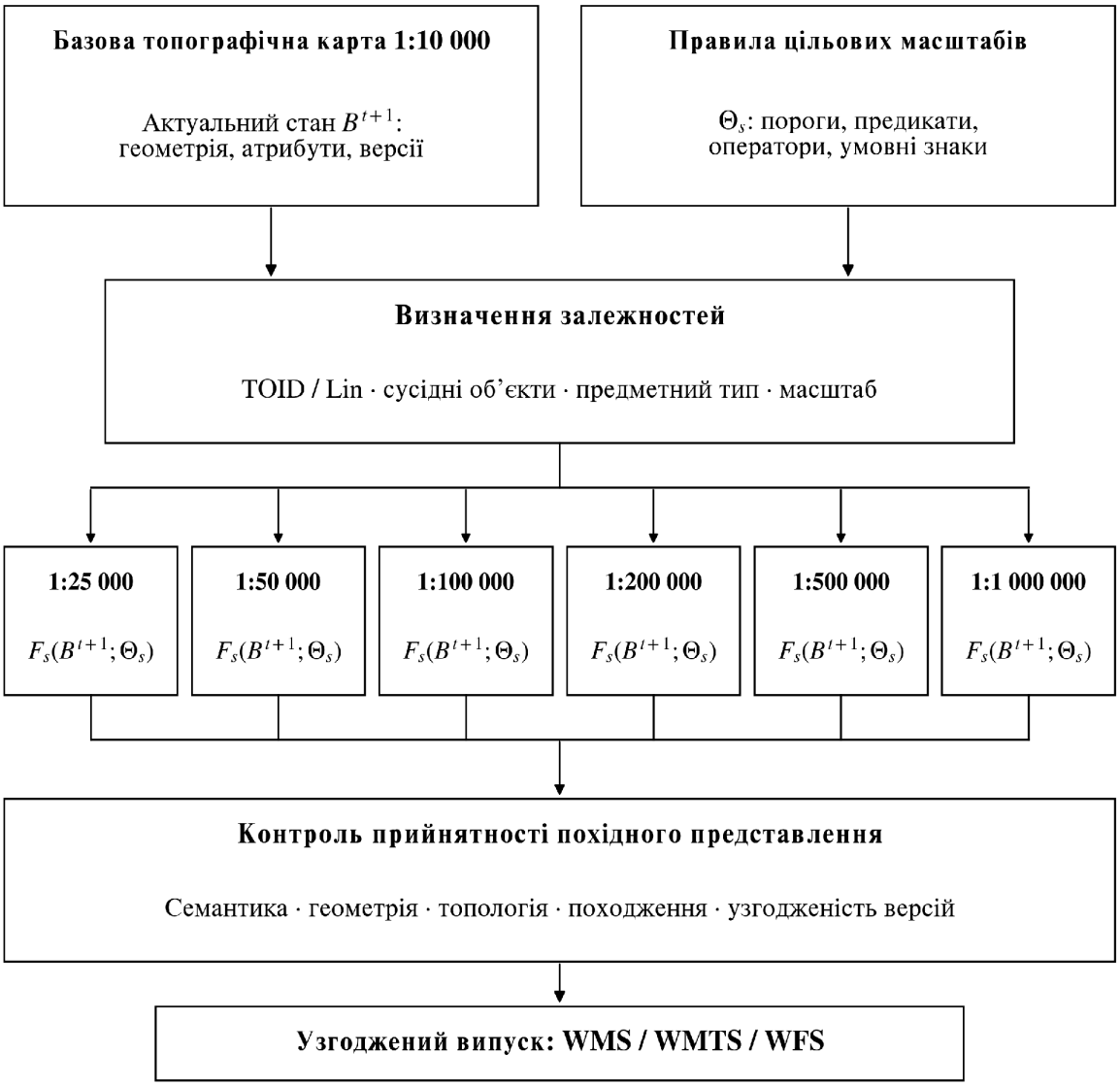


Рисунок 2.13 – Узгоджене оновлення похідних масштабних представлень
Джерело: розроблено автором.

Масштабні гілки мають спільне джерело. Після зміни базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 кожен похідний набір повторно формують незалежною масштабною процедурою з нового базового стану; результат попереднього масштабу для цього не використовують [4]. Так вхідна модель лишається однозначною. Оновлення вихідного об'єкта поширюється на всі пов'язані через TOID або Lin представлення та на суміжні просторові залежності, де могли змінитися семантичні умови за фіксованою редакцією прикладної моделі. Для кожного масштабу область перерахунку визначають самостійно.

Версії не можна поєднувати довільно. Для узгодженого публікування геопросторових і картографічних представлень фіксують єдину редакцію базових даних, правила шести масштабів і пов’язані бібліотечні параметри відтворення, зберігаючи ідентифікатори походження та налаштування картографічного стилю [4]. Сервіси надають лише узгоджену редакцію наборів. Якщо змінено геометрію або семантику, перед доступом нової редакції перевіряють залежності та топологічні обмеження, не підмінюючи семантичний контроль технічним порівнянням файлів або растрових результатів, підготовлених різними вебкартографічними сервісами.

Отже, запропонована модель узгодженості розмежовує ідентичність топографічної сутності, цифрову версію, групове походження та просторові відношення, поєднуючи їх із незалежним оновленням шести масштабів від базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 та належними тематичними обмеженнями. Розділ 3 містить опис застосування й перевірки запропонованого підходу для шести масштабів на Національному геопорталі НІГД з використанням контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

2.6 Розроблення прикладних моделей шести класів топографічних об’єктів

Математичні предикати набувають топографічного змісту лише тоді, коли для топографічного класу встановлено його код, набір атрибутів, класифікаційні домени, допустимі геометрії, масштабні пороги та топологічні відношення. Сформульовані в підрозділах 2.1–2.5 принципи покладено в основу шести прикладних моделей.

Для будівлі критичним є поєднання площі, функції та значущості, для дороги — клас, довжина і зв’язність мережі, а водотік вимагає одночасного контролю ширини, довжини й вузлів гідрографії. Квартали, водойми та деревна рослинність мають інші масштабні й просторові умови.

Універсальних порогів модель не запроваджує: для різних класів вони були б непридатні. Відмінності формалізовано для кожного класу.

Розроблення кожної моделі включало побудову UML-фрагмента, визначення атрибутів і кодових списків, опис масштабних критеріїв, допустимих геометричних представлень та перевірюваних просторових відношень. Критерії зібрано з урахуванням природи кожного класу та формально пов’язано з пооб’єктним методом, а сукупність цих правил конкретизує загальну модель підрозділів 2.1–2.5. Шість прикладних моделей мають спільні успадковані реквізити TopographicObject. Системне поле TOID зберігає тотожність одиничного об’єкта; відношення Lin фіксує множину джерел групового кандидата. Відмінності між класами визначаються їхніми власними атрибутами, доменами та топологічними умовами.

2.6.1 Спільна структура прикладної моделі і системні атрибути

Спільна структура атрибутів визначає однаковий спосіб ідентифікації й оновлення похідних представлень: зміни вихідного об’єкта контролюють за TOID і часовими реквізитами, а групове походження — за відношенням Lin. Відбір об’єкта не завершує його картографічного оформлення. Умовний знак застосовується після підтвердження допустимого геометричного представлення, масштабу та семантичних умов. ZOOM — лише технічний рівень перегляду; масштабним критерієм відбору об’єктів він не є.

Прикладна схема визначає класи й відношення між ними. Каталог фіксує найменування, коди, атрибути, масштабні умови та обмеження класів, а UML-діаграма показує їхню структурну взаємодію; спільні ознаки при цьому не дублюються в кожному масштабному представленні. Спільну структурну основу побудовано на абстрактному класі TopographicObject та тематичних пакетах. Від нього успадковуються системні атрибути, потрібні для автоматизованої генералізації. Семантичні атрибути й масштабні обмеження кожен із шести класів має власні.

Поведінку класів описано операціями. Абстрактний клас TopographicObject інкапсулює операції isIncluded(s), geometryAt(s),

generalise(s) і symbolAt(s), які відповідно перевіряють характеристичний предикат, визначають допустиме геометричне представлення, застосовують оператори генералізації та вибирають умовний знак для масштабу s (рис. 2.1). Тематичні класи успадковують ці операції й уточнюють їх власними правилами: будівлі й водойми — колапсом до точки полігонів, менших за поріг площі, квартали — агрегуванням із контролем осей вулиць, дороги, ділянки водотоків і деревна рослинність — спрощенням геометрії з топологічним контролем. Така інкапсуляція дає змогу інтегрувати прикладну схему в об’єктно-реляційну СКБД, зокрема PostgreSQL/PostGIS, передбачену проєктною архітектурою Національного геопорталу НІГД [2], для автоматизованого виконання просторових трансформацій.

Шість розроблених моделей задають повний перехід від вихідного топографічного об’єкта до похідних масштабних представлень. Далі для кожного класу подано UML-схему, таблицю масштабних критеріїв, власні атрибути, кодові довідники та допустимі топологічні відношення. Кожне похідне представлення формується безпосередньо з актуальної базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000, після чого результат проходить послідовні перевірки: належності до масштабу, допустимості геометрії, топографічного змісту, просторових відношень і картографічного знака.

Спільні системні реквізити використовуються в шести класах; відмінності зосереджено у власних атрибутах, довідниках і правилах класу. Наявність цільового атрибута в моделі та його фізична присутність у кожній вихідній базі геопросторових даних File Geodatabase — різні речі. Базова топографічна сутність зберігає ідентифікатор TOID, тоді як кожне похідне представлення має власний цифровий запис. Системні реквізити визначають версійність, код масштабу, геометрію та індекси умовних знаків. Їхній склад подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Спільні системні реквізити шести класів топографічних об’єктів

Атрибут / група	**Тип та кратність**	**Зміст і обмеження**
GID	Char (16); 1	Унікальний ідентифікатор цифрового екземпляра; Voidable=False
TOID	Char (16); 1	Зв’язок із топографічною сутністю базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000; Voidable=False
featureTypeCode	Char (4); 1	Чотиризначний код відповідного класу; Voidable=False
Geom	Геометричний тип; 1	Допустимі стани деталізуються для конкретного класу та масштабу
verticalPosition	Char (16); 1	Довідник VerticalPositionValue; Voidable=False
UkrName, EngName	Char (64/128); 0…1	Власні назви, якщо вони передбачені для класу; довжину перевіряють за його каталогом
beginLifespanVersion	DateTime; 1	Час початку версії запису; Voidable=False
endLifespanVersion	DateTime; 0…1	Час завершення версії; зв’язок із оновленням
upperScale	SInteger; 1	Код із довідника UpperScale; не тотожний довільному числовому знаменнику
Symbol25K, Symbol50K, Symbol100K	SInteger; кожен 1	Ідентифікатори знаків для трьох перших похідних масштабів
Symbol200K, Symbol500K, Symbol1M	SInteger; кожен 1	Ідентифікатори знаків для трьох наступних похідних масштабів

Джерело: складено за результатами дослідження.

Цифрове представлення і топографічну сутність не слід ототожнювати. Поле TOID зберігає вихідну тотожність, а GID характеризує конкретний цифровий запис. Для кожного масштабу передбачено адресу умовного знака, тоді як upperScale характеризує придатність наявної геометрії.

2.6.2 Прикладна модель класу «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Будівлі моделюються як топографічні об’єкти з притаманними їм функціональними й конструктивними властивостями. У застосованій прикладній схемі власні атрибути пов’язують геометричне представлення із призначенням будівлі, статусом, значущістю, поверховістю та площею (рис. 2.14).

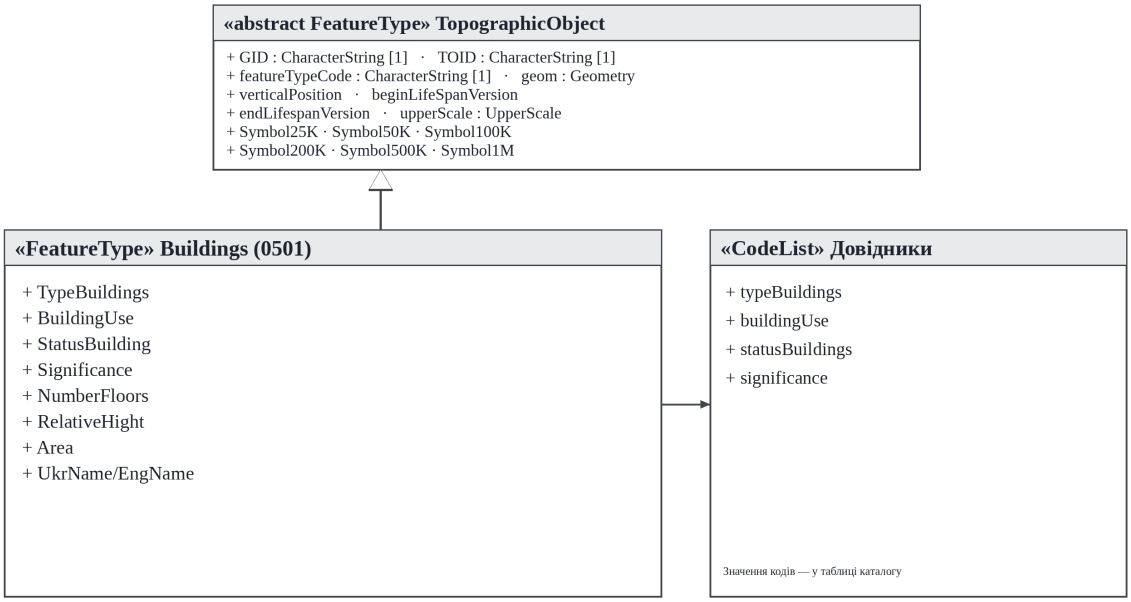


Рисунок 2.14 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Джерело: складено за результатами дослідження.

Каталог відрізняє вимогу до полігонального контуру від можливості точкового умовного знака. Для масштабу 1:25 000 порогом полігонального відтворення є площа понад 625 м²; для решти масштабів пороги послідовно змінюються. Менший контур не набуває точкового знака автоматично: необхідне обґрунтування його орієнтирного або іншого істотного значення.

Таблиця 2.3 – Масштабні умови відбору класу «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Площа понад 625 м²	GM_Polygon	Менші визначні об’єкти можуть бути показані точковим знаком
1:50 000	Площа понад 2 500 м²	GM_Polygon	Спеціальний орієнтирний випадок — GM_Point
1:100 000	Площа понад 10 000 м²	GM_Polygon	Рядову забудову узагальнюють у кварталах; орієнтири відбирають окремо
1:200 000	Площа понад 80 000 м²	GM_Polygon	Інші випадки — лише за семантичним значенням
1:500 000	Площа понад 500 000 м²	GM_Polygon	Окремі визначні споруди — за правилами каталогу
1:1 000 000	Площа понад 2 000 000 м²	GM_Polygon	В іншому — умовний знак за підтвердженою значущістю

Джерело: складено за результатами дослідження.

Формальна умова збереження одиничної будівлі не тотожна правилу представлення забудови кварталу. У масштабах 1:50 000 та 1:100 000 щільна внутрішньоквартальна забудова узагальнюється, тоді як визначні будівлі й споруди можуть зберігатися як самостійні об’єкти за семантичними ознаками. Рядовий об’єкт від орієнтира відрізняє зміст каталогу. Довільний геометричний поріг цього не вирішує. Власні атрибути класу зведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Власні атрибути класу «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeBuildings	SInteger; 1	CodeList typeBuildings; обов’язкове значення
BuildingUse	SInteger; 1	CodeList buildingUse; кратність 1, Voidable = True: поле обов’язкове в структурі запису, але допускає невизначене значення.
StatusBuilding	SInteger; 1	Атрибут StatusBuilding (SInteger; кратність 1, Voidable = True) використовує окремо названий довідник statusBuildings; назви атрибута й довідника мають різні ролі в прикладній схемі.
Significance	SInteger; 1	CodeList significance: визначна або звичайна
NumberFloors	SInteger; 1	Допустимий інтервал [0; 100]
RelativeHight	Real; 0…1	Відносна висота [0; 500] м; машинне ім’я RelativeHight збережено без виправлення написання.
Area	Double Precision; 1	Площа в м²
UkrName / EngName	Char (128); 0…1	Власні назви; саме для цього класу каталог установлює 128 символів

Джерело: складено за результатами дослідження.

У вихідних даних масштабу 1:10 000 цифровий контур будівлі визначено за дешифрованою спорудою з урахуванням перспективного зміщення верхніх частин будівлі відносно її основи. За звичайної прямокутної конструкції кути контуру зберігають прямокутність, тоді як архітектурно обґрунтовані складні форми не випрямляють механічно. У місцях суміжності спільні вершини та відрізки мають збігатися. Класифікаційні довідники та просторові обмеження класу подано в таблицях 2.5 і 2.6.

Таблиця 2.5 – Класифікаційні довідники класу «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Довідник	Значення класифікатора
typeBuildings	1 — визначні окремі будівлі; 2 — звичайні; 5 — підприємства без димарів; 6 — млини; 7 — лісопилки; 8 — печі для випалювання; 10 — заправні станції; 11 — градирні; 14 — будинки лісників; 17 — оранжереї й теплиці на фундаменті; 18 — парники; 19 — поодинокі двори
buildingUse	1 — житлові; 2 — нежитлові
statusBuildings	1 — в експлуатації; 2 — споруджується; 3 — підведені під дах; 4 — зруйновані; 5 — напівзруйновані
significance	1 — визначні; 2 — звичайні

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.6 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Будівлі» (Buildings, код 0501)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
У межах класу	Must Not Overlap	Внутрішні частини полігонів будівель не накладаються; спільні межі допустимі
Інші поверхні	Must Not Overlap With	StandingWater, SurfaceRiver, StreetSurface. Виняток: будівлі на палях або конструкціях, для яких verticalPosition=aboveGround.
Забудована територія	Must Be Covered By Feature Class Of	Полігони Buildings містяться в Settlements і Blocks відповідно до правила Must Be Covered By Feature Class Of; просторову придатність перевіряють за відповідними контурами.
Точкові знаки	Must Be Disjoint (Point)	Збіг точок одного класу/підтипу є помилкою
Суміжні контури	Узгодження вершин	Спільні точки та відрізки з суміжними геометріями мають збігатися

Джерело: складено за результатами дослідження.

Зв’язок з об’єктами класу «Квартали» перевіряють самостійно. Не можна вважати допустимою геометрично правильну будівлю, якщо її розташування суперечить умовам покриття або міжкласовим обмеженням. Водночас для об’єктів поза кварталами та спеціальних споруд застосовують прямо передбачені винятки.

2.6.3 Прикладна модель класу «Квартали» (Blocks, код 0402)

Квартал є структурною одиницею поділу населеного пункту. Його полігон має зберігати конфігурацію забудови та межі, сформовані вулицями, дорогами й іншими виразними елементами території. На відміну від одиничної будівлі, для кварталу встановлено мінімальну площу, а на дрібніших масштабах — допустиме об’єднання суміжних контурів. Фрагмент прикладної схеми класу показано на рисунку 2.15.

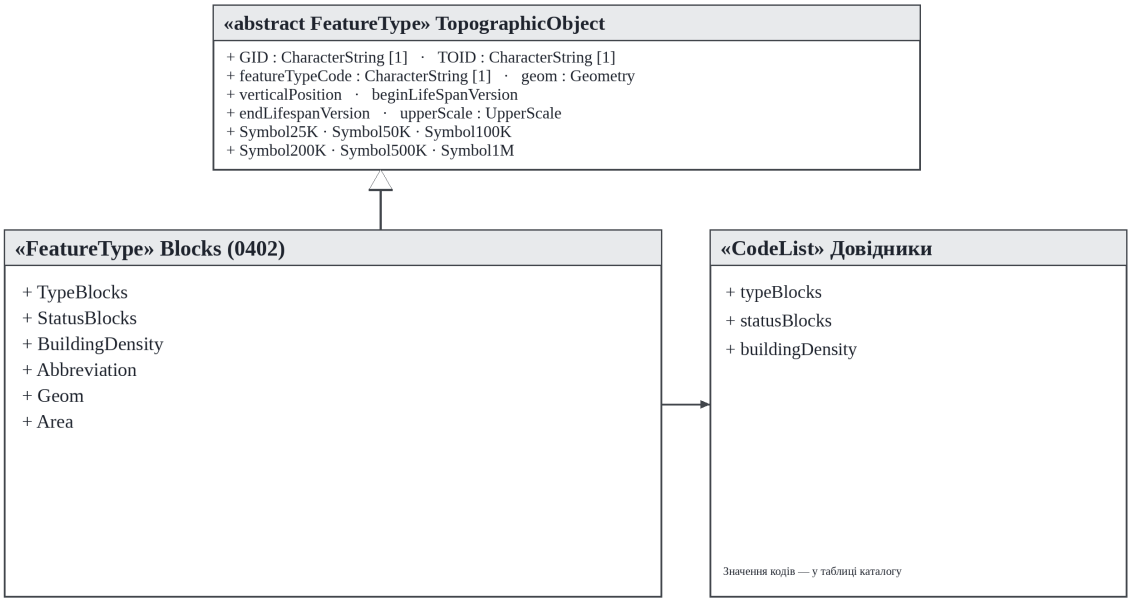


Рисунок 2.15 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Квартали» (Blocks, код 0402)

Джерело: складено за результатами дослідження.

Для масштабів 1:25 000 і 1:50 000 модель визначає мінімальні площі самостійного відображення кварталу. Від 1:100 000 розглядається об’єднання суміжних кварталів, менших за поріг площі, але лише за сумісності їхнього використання й узгодженості з вуличним простором. Ці умови зведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Масштабні умови відбору класу «Квартали» (Blocks, код 0402)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Мінімальна площа 625 м²	GM_Polygon	Збереження детальності квартальної забудови
1:50 000	Мінімальна площа 2 500 м²	GM_Polygon	Детальне планування з узагальненням щільної внутрішньої забудови
1:100 000	Мінімальна площа 10 000 м²	GM_Polygon	Малі суміжні квартали можуть об’єднуватися в спільний контур за умови прийнятності
1:200 000	Мінімальна площа 40 000 м²	GM_Polygon	Узагальнення квартальної структури; об’єднання малих суміжних контурів
1:500 000	Мінімальна площа 250 000 м²	GM_Polygon	Переважає узагальнене планування й зовнішній контур
1:1 000 000	Мінімальна площа 1 000 000 м²	GM_Polygon	Об’єднання суміжних контурів за умови прийнятності

Джерело: складено за результатами дослідження.

Квартали різного переважного функціонального використання навіть за відсутності розмежувальної вулиці описують як різні об’єкти з точно узгодженою межею. Це правило стосується географічного змісту, і звичайне об’єднання всіх сусідніх полігонів його не замінює. Математичний оператор агрегування застосовується лише до кандидатів, що проходять передбачені перевірки. Атрибути класу перелічено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Власні атрибути класу «Квартали» (Blocks, код 0402)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeBlocks	SInteger; 1	CodeList typeBlocks; обов’язкове значення
StatusBlocks	SInteger; 1	CodeList statusBlocks
BuildingDensity	SInteger; 1	CodeList buildingDensity
Abbreviation	Char (10); 0…1	Набір допустимих символів
Geom	GM_Polygon; 1	GM_Polygon; 1. Для класу Blocks використовується полігональна геометрія.
Area	Double Precision; 1	Площа в м²

Джерело: складено за результатами дослідження.

Межі кварталів повинні узгоджуватися з дорожньою та вуличною мережею, а самі квартали — з об’єктами забудови і територіального охоплення. Тому валідність результату геометричного об’єднання ще не означає прийнятності для картографічного представлення.

Саме на цій відмінності в дослідженні побудовано семантичне відбракування груп-кандидатів, а потрібні для нього довідники й обмеження класу містять таблиці 2.9 і 2.10.

Таблиця 2.9 – Класифікаційні довідники класу «Квартали» (Blocks, код 0402)

Довідник	Значення класифікатора
typeBlocks	1 — квартали населених пунктів; 2 — квартали дачних поселень; 3 — квартали нового будівництва; 4 — частини населеного пункту
statusBlocks	1 — жилий; 2 — що будується; 3 — зруйновані та напівзруйновані; 4 — нежилий
buildingDensity	1 — щільно забудовані; 2 — рідко забудовані

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.10 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Квартали» (Blocks, код 0402)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
Полігони кварталів	Must Not Overlap	Внутрішні частини не накладаються; спільні ребра та вершини допустимі
Суміжні квартали	Must Not Have Gaps	Не створювати необґрунтовані прогалини між суміжними полігонами
Взаємодія з іншими полігональними класами	Must Not Overlap With	Перелік класів Must Not Overlap With: StandingWater, Watercourse, Islands, Drain, HydroManMade Constructions, Shoreline, WaterLevel, Coastalline, WaterVegetation, FloodZones, MiningSites, ReligiousBuilding, SpecialConstructions, SportLeisure, Landfills, MeteorologicalStation, RailwayConstructions, AirTransport, Ports, PowerConstructions, PipeConstructions, Vegetation, CulturalVegetation, Shrub, Grass, Swamp, LandCover, Alkali, PositiveTopographicForm, NegativeTopographicForm. Заборонено перетин внутрішніх областей полігонів; спільні межі можуть збігатися.
Будівлі	Must Contain	Must Contain Buildings: квартал повинен містити щонайменше один об’єкт класу Buildings.
Вулична поверхня	Area Boundary Must Be Covered By Boundary Of	Межі кварталів повинні узгоджуватися з межами полігонів StreetSurface (GM_Polygon).
Територіальне охоплення	Must Be Covered By Feature Class Of	Територіальні відношення: Settlements, UnitAdminTerritory відповідного рівня та StateTerritory. Для StateTerritory установлено Must Be Covered By Feature Class Of; покриття населеним пунктом й адміністративно-територіальною одиницею визначається змістовими правилами.

Джерело: складено за результатами дослідження.

Під час розроблення моделі кварталів зіставлено семантичні атрибути та класифікаційні довідники, а також їхні відношення у UML. Обмеження класу застосовуються до геометричних і семантичних станів, які вони безпосередньо визначають. На рисунку 2.16 показано межі кварталів відносно вулиць, водотоку й рослинності, а на рисунку 2.17 — зіставлення виділених контурів кварталів з ортофотопланом.

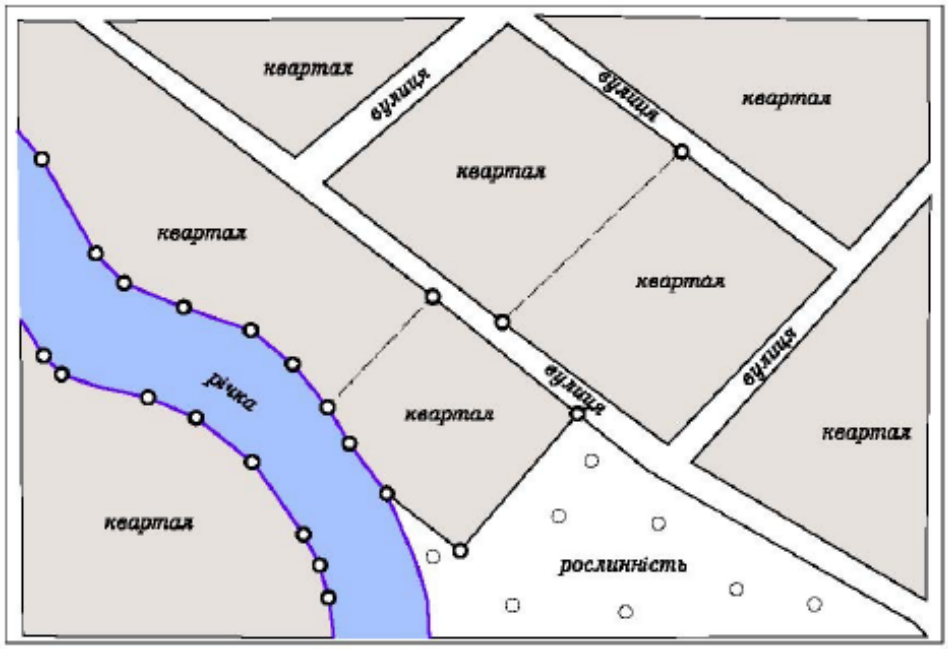


Рисунок 2.16 – Просторові межі кварталів, вулиць, водотоку та рослинності (приклад цифрового опису)

Джерело: матеріали розроблення прикладної моделі кварталів.



Рисунок 2.17 – Порівняння виділених контурів кварталів з ортофотопланом

Джерело: матеріали розроблення прикладної моделі кварталів.

2.6.4 Прикладна модель класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Дорожній об’єкт описується осьовою лінією, її класифікаційними ознаками та зв’язками транспортної мережі. Для дорожніх типів одного математичного критерію довжини недостатньо: склад мережі визначається також видом дороги, покриттям, функціональним призначенням і густотою дорожніх зв’язків. Схему класу подає рисунок 2.18.

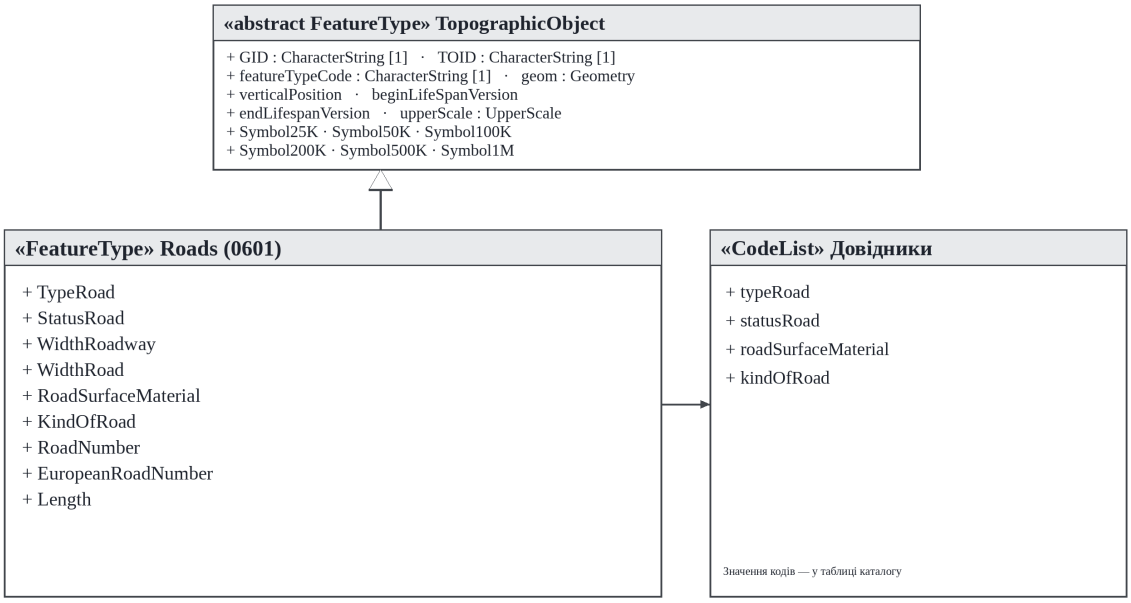


Рисунок 2.18 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Джерело: складено за результатами дослідження.

У масштабах 1:25 000 – 1:100 000 прикладна модель передбачає всі автомагістралі, дороги з удосконаленим покриттям і дороги з покриттям за встановлених мінімальних довжин. На рівнях 1:200 000 – 1:1 000 000 автомагістралі й дороги з удосконаленим покриттям залишаються основою мережі, а дороги з покриттям у густих мережах відбирають вибірково. Дороги нижчих категорій (typeRoad 4–9) до похідних масштабів не включають (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Масштабні умови відбору класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Дороги типів 1–3; довжина не менше 25 м	GM_LineString	Основні дорожні категорії включаються за правилом каталогу
1:50 000	Дороги типів 1–3; довжина не менше 50 м	GM_LineString	Зберігаються автомагістралі та дороги з покриттям
1:100 000	Дороги типів 1–3; довжина не менше 100 м	GM_LineString	Дороги типів 4–9 до похідного набору не включають
1:200 000	Типи 1–2; тип 3 — вибірково; довжина не менше 200 м	GM_LineString	Залежність від густоти дорожньої мережі
1:500 000	Типи 1–2; тип 3 — вибірково; довжина не менше 500 м	GM_LineString	Забезпечення структури основних маршрутів
1:1 000 000	Типи 1–2; тип 3 — вибірково; довжина не менше 1 000 м	GM_LineString	Відбір за класом дороги, довжиною та зв’язністю мережі

Джерело: складено за результатами дослідження.

Лінії ділять на сегменти в місцях справжніх вузлів, розгалужень і зміни визначальних атрибутів. Розв’язка в різних рівнях не утворює звичайного вузла в точці планового перетину. Для мосту застосовують verticalPosition=aboveGround, для тунелю — verticalPosition=underGround; це семантична умова, відмінна від суто координатного тесту перетину ліній. Атрибути класу подано в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Власні атрибути класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeRoad	SInteger; 1	CodeList typeRoad; обов’язкове значення
StatusRoad	SInteger; 1	CodeList statusRoad
WidthRoadway	Real; 0…1	Ширина проїжджої частини [8; 60] м
WidthRoad	Real; 1	Загальна ширина дороги [8; 100] м
RoadSurfaceMaterial	SInteger; 0…1	CodeList roadSurfaceMaterial
KindOfRoad	SInteger; 1	CodeList kindOfRoad; територіальне значення дороги
RoadNumber	Char (10); 1…*	Офіційний індекс / номер
EuropeanRoadNumber	Char (10); 0…1	Європейський номер маршруту
Length	Real; 1	Довжина в метрах

Джерело: складено за результатами дослідження.

Звичайний алгоритм спрощення може зменшити кількість вершин, але не має права руйнувати з’єднаність доріг, змінювати функціональну категорію або створювати вузол там, де фізичного з’єднання немає. Отже, семантичний контроль після геометричного перетворення — необхідна частина запропонованого методу. Довідники класу зведено в таблицю 2.13, просторові обмеження — у таблицю 2.14.

Таблиця 2.13 – Класифікаційні довідники класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Довідник	Значення класифікатора
typeRoad	1 — автомагістралі; 2 — удосконалене покриття; 3 — дороги з покриттям; 4 — без покриття; 5 — ґрунтові; 6 — польові й лісові; 7 — великий ухил; 8 — малий радіус повороту; 9 — пішохідні доріжки і стежки
statusRoad	1 — діючі; 2 — недіючі; 3 — споруджувані; 4 — зруйновані
roadSurfaceMaterial	1 — асфальт; 2 — цементобетон; 3 — бетон; 4 — булижник; 5 — брущатка; 6 — гравій; 7 — колотий камінь; 8 — клінкер; 9 — шлак; 10 — щебінь; 11 — бітумомінеральна суміш
kindOfRoad	1 — міжнародна; 2 — національна; 3 — регіональна; 4 — територіальна; 5 — обласна; 6 — районна; 7 — відомча; 8 — на приватних територіях

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.14 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
Власна мережа	Must Not Overlap / Must Not Self-Overlap	Сегменти не накладаються на себе або на інші сегменти того самого класу
Самоперетини	Must Not Self-Intersect	Не створювати самоперетинів ліній одного цифрового екземпляра
Мережні вузли	Must Not Intersect Or Touch Interior	Коректні стики переважно збігаються з пограничними точками сегментів
Висячі вершини	Must Not Have Dangles	Контроль нез’єднаних кінців із передбаченими дорожніми винятками
Суміжні мережі	Must Not Intersect With / Must Not Overlap With	Must Not Intersect With: Railway, Watercourse, Ferry, Streets, Metro, Tramway, Pipelines, Powerlines. Must Not Intersect Or Touch Interior With і Must Not Overlap With: Streets, Watercourse, Shoreline, Railway. Різні рівні за verticalPosition становлять спеціальний виняток для перетину.
Мости й тунелі	Непланарний граф	Плановий перетин різних рівнів не породжує дорожнього вузла

Джерело: складено за результатами дослідження.

Для класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» визначено атрибути TypeRoad, StatusRoad і KindOfRoad та довідники typeRoad, statusRoad і kindOfRoad. Вони дають змогу семантично розрізнити категорію, стан і вид автомобільної дороги під час масштабного відбору.

2.6.5 Прикладна модель класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Водойма характеризується просторовою формою замкнутого накопичення води, а також її типом, станом і можливим зв’язком із гідрографічним реєстром. Каталог поєднує пороги площі полігонального представлення зі спеціальними умовами точкової символізації, і відбір визначають за властивостями конкретного об’єкта (схему класу показано на рисунку 2.19).

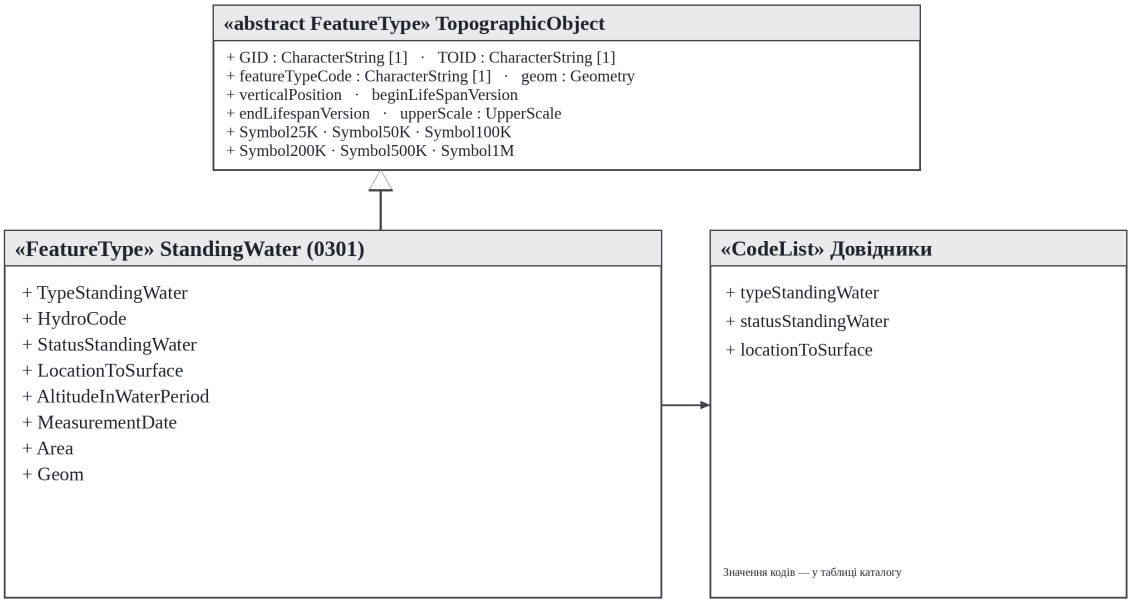


Рисунок 2.19 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Джерело: складено за результатами дослідження.

Площинну геометрію допускають за перевищення встановленого масштабного порога. Для менших водойм масштабна таблиця передбачає точкове позначення у випадках істотного орієнтирного або іншого семантичного значення. Водночас в описі класу «Водойми» спеціально охарактеризовано точкову форму невеликих підземних водосховищ та басейнів площею меншою за 100 м²; ці положення не можна підміняти

загальним правилом автоматичного перетворення будь-якого полігона на точку.

Таблиця 2.15 – Масштабні умови відбору класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Площа понад 625 м²	GM_Polygon	Менші важливі водойми можуть мати спеціальне GM_Point
1:50 000	Площа понад 2 500 м²	GM_Polygon	Точковий знак лише за обґрунтованих умов
1:100 000	Площа понад 10 000 м²	GM_Polygon	Розрізняти вимоги до масштабу й конкретного типу водойми
1:200 000	Площа понад 80 000 м²	GM_Polygon	Малі значущі водойми — спеціальне символічне представлення
1:500 000	Площа понад 500 000 м²	GM_Polygon	Точковий знак лише за підтвердженої значущості водойми
1:1 000 000	Площа понад 2 000 000 м²	GM_Polygon	Точкова форма не є універсальним наслідком зменшення масштабу

Джерело: складено за результатами дослідження.

У вихідних даних масштабу 1:10 000 геометрію водного дзеркала визначено за дешифрованою межею, за потреби з урахуванням водної рослинності та перспективних спотворень ортозображення. Внутрішні кільця водойм мають збігатися з контурами островів. Межі з суміжними об’єктами топологічно узгоджують до спільних точок і відрізків. Таблиця 2.16 містить атрибути класу.

Таблиця 2.16 – Власні атрибути класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeStandingWater	SInteger; 1	CodeList typeStandingWater
HydroCode	Char (10); 0…1	Код реєстру гідрографічних об’єктів
StatusStandingWater	SInteger; 1	CodeList statusStandingWater
LocationToSurface	SInteger; 1	CodeList locationToSurface
AltitudeInWaterPeriod	Real; 0…1	Абсолютна висота рівня води у межень [0; 1 000] м
MeasurementDate	Date; 0…1	Дата виміру
Area	Double Precision; 1	Площа водойми в м²
Geom	GM_Collection; 1	GM_Polygon / GM_Point згідно з умовами каталогу

Джерело: складено за результатами дослідження.

Зв’язок водойми з ділянками водотоків залежить від типу водойми й належності лінії до головного водотоку, і для ліній головного водотоку, пов’язаних з певними класами водойм, розроблена прикладна модель встановлює спеціальні винятки. Через це універсальна заборона перетину будь-якої лінії водотоку з полігоном водойми була б неточною. Довідники класу та його семантичні й топологічні обмеження подано в таблицях 2.17 і 2.18.

Таблиця 2.17 – Класифікаційні довідники класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Довідник	Значення класифікатора
typeStandingWater	1 — океан; 2 — море; 3 — озеро; 4 — водосховище; 5 — ставок; 6 — басейн
statusStandingWater	1 — діюча; 2 — недіюча; 3 — споруджувана
locationToSurface	1 — наземна; 2 — підземна; 3 — тимчасово зникаюча

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.18 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Водойми» (StandingWater, код 0301)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
Точкові об’єкти	Must Be Disjoint	Збіг двох точок одного класу/підтипу помилковий
Полігони водойм	Must Not Overlap	Внутрішні частини полігонів одного класу не перетинаються
Суміжні поверхні	Must Not Overlap With	Must Not Overlap With для полігонів StandingWater: Watercourse, Islands, Drain, Blocks, MiningSites, Buildings, Constructions, ReligiousBuilding, Monuments, RoadConstructions, RailwayConstructions, AirTransport, TeleCommConstructions, PowerConstructions, PipeConstructions, Landfills, Vegetation, LandUse, LandAgricultural, Shrub, Opening, Grass, Swamp, LandCover, Alkali, PositiveTopographicForm, NegativeTopographicForm. Дозволено спільні ребра й вершини без перекриття внутрішніх областей.
Зв’язок із водотоками	Must Not Intersect / Must Not Overlap With	Взаємодія з Watercourse (GM_LineString): Must Not Overlap With і Must Not Intersect; виняток застосовується лише за MainWatercourse=Yes і TypeStandingWater ∈ {3, 4}.
Острови та берегова межа	Узгоджені контури	Внутрішні кільця мають відповідати островам; спільні точки збігаються з вузлами водотоків

Джерело: складено за результатами дослідження.

Контрольна точка, обчислена всередині полігона для діагностики геометрії, не засвідчує дотримання вимог до точкового картографічного позначення. Такий знак прийнятний лише за відповідності класу, статусу, масштабу та семантичному значенню об’єкта.

2.6.6 Прикладна модель класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Клас ділянок водотоків та каналів описує осьові лінії гідрографічної мережі. На відміну від водойм, масштабні критерії для цього класу сполучають мінімальну довжину ділянки з максимальною шириною. Обидві умови застосовують разом, і жодна перевірка не замінює іншої. Прикладну схему класу зображено на рисунку 2.20.

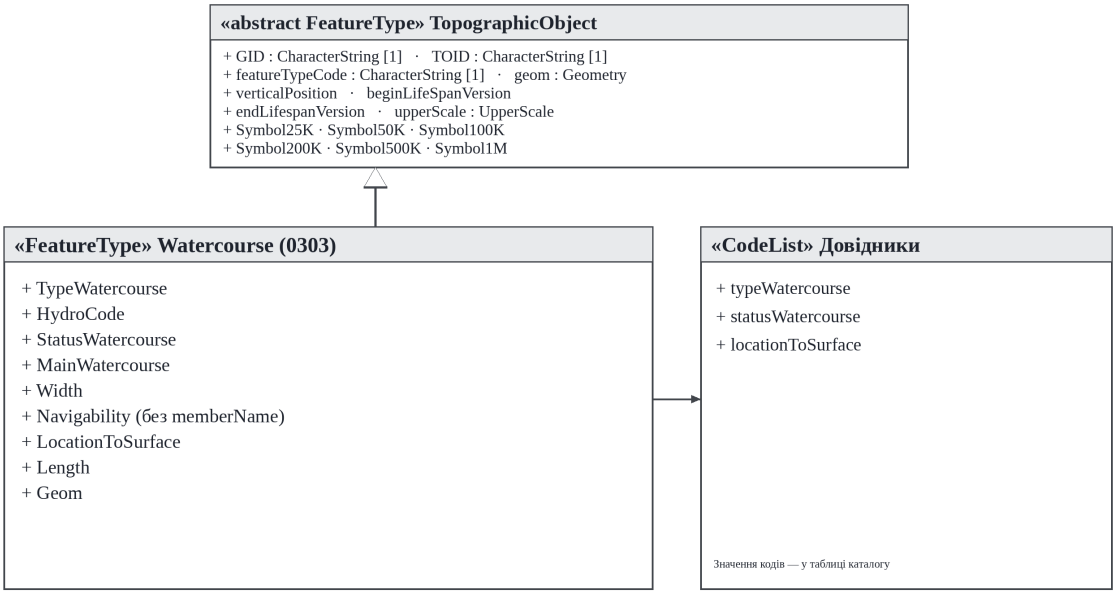


Рисунок 2.20 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Джерело: складено за результатами дослідження.

Для масштабу 1:25 000 каталог включає всі водотоки незалежно від довжини, якщо їхня ширина менша за 15 м. Для 1:50 000 – 1:1 000 000 одночасно зростають мінімальні довжини й допустимі максимальні ширини. Обмеження ширини визначає сферу лінійного представлення: для ширших водотоків передбачено інший спосіб зображення поверхні, і довільно з

топографічної основи їх не вилучають. Масштабні умови класу зведено в таблиці 2.19.

Таблиця 2.19 – Масштабні умови відбору класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Усі ділянки; ширина менш як 15 м	GM_LineString	Мінімальну довжину не встановлено
1:50 000	Довжина понад 500 м; ширина менш як 30 м	GM_LineString	Обидві умови застосовують одночасно
1:100 000	Довжина понад 1 000 м; ширина менш як 60 м	GM_LineString	Не ототожнювати вісь із полігоном водної поверхні
1:200 000	Довжина понад 2 000 м; ширина менш як 120 м	GM_LineString	Зберігати гідрографічні вузли та напрямок
1:500 000	Довжина понад 7 500 м; ширина менш як 300 м	GM_LineString	Контроль безперервності мережі
1:1 000 000	Довжина понад 15 000 м; ширина менш як 500 м	GM_LineString	Одночасне виконання умов ширини й довжини

Джерело: складено за результатами дослідження.

Вісь водотоку орієнтують від витоку до гирла або за напрямком ухилу штучної конструкції. Сегментують її у справжніх вузлах, місцях розгалуження, входу/виходу з водойм і зміни змістовних атрибутів. Узгодження пограничних точок дає змогу зберігати спрямовану гідрографічну мережу під час формування похідних масштабів. Атрибути класу перелічено в таблиці 2.20.

Таблиця 2.20 – Власні атрибути класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeWatercourse	SInteger; 1	CodeList typeWatercourse
HydroCode	Char (10); 0…1	Гідрографічний ідентифікатор
StatusWatercourse	SInteger; 1	CodeList statusWatercourse
MainWatercourse	Boolean; 1	Ознака головного водотоку / каналу
Width	Real; 1	Ширина [0,3; 20 000] м
LocationToSurface	SInteger; 1	CodeList locationToSurface
Length	Double Precision; 1	Довжина в метрах
Geom	GM_LineString; 1	Осьова лінія; UML-фрагмент має узагальнений контейнер

Джерело: складено за результатами дослідження.

У місцях проходження головного водотоку через водосховище або іншу проточну водойму прикладна модель передбачає умовні лінійні з’єднання всередині водного полігона. Їх позначають значенням verticalPosition=relativeSurface. Для непроточних водойм і морів такі умовні відрізки не формують, хоча вузли на береговому контурі мають збігатися з межами вхідних і вихідних ділянок. Довідники класу містить таблиця 2.21, семантичні й топологічні обмеження — таблиця 2.22.

Таблиця 2.21 – Класифікаційні довідники класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Довідник	Значення класифікатора
typeWatercourse	1 — річки; 2 — канали; 4 — струмки; 5 — бетоновані зрошувальні канали
statusWatercourse	1 — постійний; 2 — пересихаючий; 3 — зникаючий; 4 — споруджується
locationToSurface	1 — наземний; 2 — підземний

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.22 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
Власна мережа	Must Not Overlap / Must Not Self-Overlap	Лінійні ділянки не перекриваються та не самонакладаються
Окремі лінії	Must Not Self-Intersect	Лінії не утворюють самоперетинів
Справжні вузли	Must Not Intersect Or Touch Interior	З’єднання у пограничних точках; невизначене внутрішнє перетинання є помилкою
Зв’язність	Must Not Have Dangles	Перевіряти висячі кінці з урахуванням семантичних винятків мережі
Лінія та водні поверхні	Must Be Inside — умовне відношення	SurfaceRiver / StandingWater: застосування залежить від MainWatercourse; для StandingWater правило не застосовують за TypeStandingWater ∈ {1, 2, 5, 6}, як зазначено в прикладній моделі. Це не універсальна вимога до всіх сегментів.
Вхід і вихід з водойм	Вузлові точки	Точки осей водотоків мають збігатися з відповідними точками берегових контурів

Джерело: складено за результатами дослідження.

Цифровий опис класу містить атрибути MainWatercourse, Width, TypeWatercourse, StatusWatercourse, HydroCode та LocationToSurface. Ознака судноплавності в прикладній схемі не має власного імені атрибута, тому в моделі її не використано як самостійний атрибут.

2.6.7 Прикладна модель класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Деревна рослинність охоплює поодинокі дерева, лінійні смуги деревостою та територіальні масиви. За описом класу прикладна модель допускає точкову, лінійну та полігональну геометрії, однак конкретна форма визначається семантичною категорією й масштабом. Безумовного перетворення всіх полігонів на точки розроблена модель не передбачає. Її схему подано на рисунку 2.21.

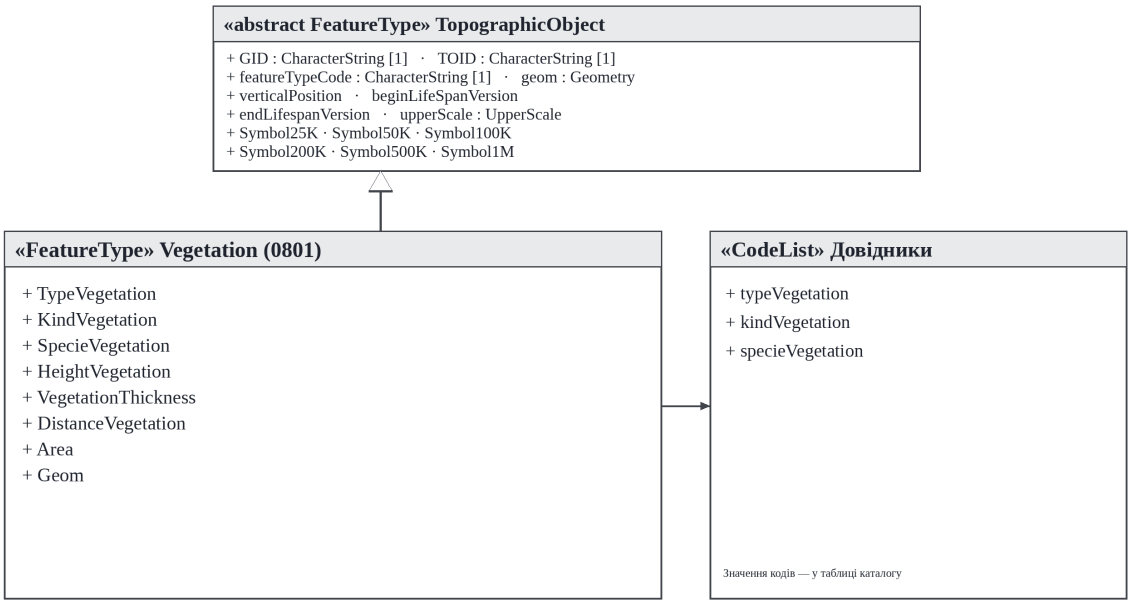


Рисунок 2.21 – Фрагмент прикладної схеми класу топографічних об’єктів «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Джерело: складено за результатами дослідження.

У таблиці масштабного відбору встановлено пороги площі для рослинності. Для полігонального представлення застосовуються значення понад 625 м², 2 500 м², 10 000 м², 80 000 м², 500 000 м² і 2 000 000 м² відповідно. Разом із цим таблиця містить GM_Point як допустиму форму для спеціальних випадків. Підставою слугує орієнтирне значення чи категорія рослинності; автоматичне проріджування точкових записів такої підстави не дає. Повний перелік масштабних умов класу подано в таблиці 2.23.

Таблиця 2.23 – Масштабні умови відбору класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Масштаб	**Критерій включення**	**Геометрія**	Умови застосування
1:25 000	Площа понад 625 м²	GM_Polygon / GM_Point	Допускаються спеціальні орієнтирні точкові стани
1:50 000	Площа понад 2 500 м²	GM_Polygon / GM_Point	Лінійні смуги описують окремим правилом цифрового представлення
1:100 000	Площа понад 10 000 м²	GM_Polygon / GM_Point	Точковий знак не отримують механічним проріджуванням
1:200 000	Площа понад 80 000 м²	GM_Polygon / GM_Point	Зберігається семантична відповідність типу рослинності
1:500 000	Площа понад 500 000 м²	GM_Polygon / GM_Point	Потрібне обґрунтування спеціального знака
1:1 000 000	Площа понад 2 000 000 м²	GM_Polygon / GM_Point	Точковий стан лише за підтвердженої орієнтирної значущості

Джерело: складено за результатами дослідження.

Лінійне представлення використовується для вузьких смуг деревної рослинності, зокрема вздовж доріг і водотоків. Для смуг шириною не більш як 1,5 мм у масштабі карти визначено можливість лінійної геометрії, якщо це допускає вид рослинності. У вихідних даних масштабу 1:10 000 контур масиву визначено за дешифрованою межею рослинності з урахуванням перспективних зміщень крон. Атрибути класу зведено в таблиці 2.24.

Таблиця 2.24 – Власні атрибути класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Ідентифікатор	**Тип; кратність**	**Домен, інтервал або призначення**
TypeVegetation	SInteger; 1	CodeList typeVegetation
KindVegetation	SInteger; 1	CodeList kindVegetation
SpecieVegetation	SInteger; 1…*	CodeList specieVegetation; можливе множинне значення
HeightVegetation	Real; 0…1	Середня висота [1; 50] м
VegetationThickness	Real; 0…1	Середня товщина стовбура [0,1; 0,7] м
DistanceVegetation	Real; 0…1	Середня відстань між деревами [1; 10] м
Area	Double Precision; 1	Площа масиву в м²
Geom	GM_Collection; 1	GM_Point, GM_LineString, GM_Polygon за формою

Джерело: складено за результатами дослідження.

Каталог використовує самостійні класифікатори типу, виду й породи деревної рослинності. Атрибути HeightVegetation, VegetationThickness і DistanceVegetation описують додаткові метричні властивості деревостою, а значення SpecieVegetation може бути множинним. Так об'єкти розрізняються ще до виконання оператора генералізації. Класифікаційні довідники подано в таблиці 2.25, просторові обмеження — у таблиці 2.26.

Таблиця 2.25 – Класифікаційні довідники класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Довідник	Значення класифікатора
typeVegetation	1 — ліс високий; 2 — низькорослий; 3 — рідкий високий; 4 — рідкий низькорослий; 5 — буреломи; 6 — горілий і сухостійний; 7 — вирубаний; 8 — поросль; 11 — розсадник; 12 — криволісся; 13 — обсадження; 14 — поодинокі дерева-орієнтири
kindVegetation	1 — хвойна; 2 — листяна; 3 — мішана
specieVegetation	1 — кедр; 2 — кипарис; 3 — модрина; 4 — секвоя; 5 — сосна; 6 — тис; 7 — туя; 8 — ялина; 9 — ялиця; 10 — береза; 11 — бук; 12 — в'яз; 13 — верба; 14 — вільха; 15 — горіх; 16 — граб; 17 — дуб; 18 — евкаліпт; 19 — ільм, берест; 20 — каштан; 21 — клен; 22 — липа; 23 — осика; 24 — пальма; 25 — тополя; 26 — ясен

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця 2.26 – Семантичні та топологічні обмеження класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Відношення	**Правило**	**Умова застосування**
Точкове представлення	Must Be Disjoint (Point)	Збіг точок одного класу/підтипу є помилкою
Лінії рослинності	Must Not Overlap / Must Not Self-Overlap	Неперекриття ліній і заборона самонакладань
Самоперетини ліній	Must Not Self-Intersect	Обов'язкова лінійна валідність
Полігональні масиви	Must Not Overlap (Area)	Внутрішні області одного класу не перекриваються
Суміжні класи	Must Not Overlap With (Area-Area)	Неперекриття площинних об'єктів різних відповідних класів
Покриття територій	Must Be Covered By Feature Class Of	Перевірка покриття застосовується лише до визначених пар класів і геометрій із відповідною семантикою, без універсального поширення на всю деревну рослинність.

Джерело: складено за результатами дослідження.

Топологічний контроль має враховувати всі три геометричні форми. Для точок діє відокремленість, для ліній — відсутність самоперетинів і накладань,

для полігонів — неперекриття внутрішніх областей та узгодження суміжних контурів. Діагностична серія одиничних точок (пункт 3.2.5) не встановлює картографічної прийнятності кожного такого знака.

2.6.8 Міжкласова узгодженість шести прикладних моделей

Масштабна умова не має універсальної форми для всіх шести класів. Для будівель, водойм і деревної рослинності визначальним є поріг площі разом із семантичною значущістю; для кварталів — мінімальна площа та правило агрегування суміжних контурів; для доріг — клас дорожньої мережі та мінімальна довжина; для водотоків — одночасне дотримання критеріїв довжини й ширини. Формальна послідовність методу залишається спільною, а параметри та обмеження змінюються залежно від класу.

Каталоги також задають міжкласові відношення. Геометрично коректна будівля може порушити умову розташування в кварталі; об’єднаний контур кварталу — перетнути мережу вулиць; лінія дороги — створити уявне з’єднання на мостовому перетині; водотік — втратити вузол зв’язку з водоймою. Кожен із цих випадків вимагає власного контролю результату. Отже, геометрична правильність є необхідною, але недостатньою передумовою прийняття похідного представлення. Таблиця 2.27 зводить взаємні зв’язки шести класів.

Таблиця 2.27 – Взаємні зв’язки шести класів у багатомасштабному представленні

Класи	**Ключова умова узгодження**	**Методичний наслідок**
Будівлі (Buildings) — Квартали (Blocks)	Розташування будівель, окремі орієнтири, сумісність контурів	Перевірка переходу від окремої споруди до узагальненої забудови
Квартали (Blocks) — Вулиці (Streets)	Межі кварталів, перетини вуличної мережі, відсутність неприйнятного накладання	Відбракування геометрично правильних, але семантично непридатних агрегатів
Дороги (Roads) — Streets / Watercourse	Транспортні й міжкласові вузли; verticalPosition для різних рівнів	Збереження непланарної мережної структури
Водойми (StandingWater) — Водотоки (Watercourse)	Спільні берегові вузли; винятки для головного водотоку в озерах і водосховищах	Відновлення гідрографічної зв’язності без довільних перетинів
Водойми (StandingWater) — Рослинність (Vegetation)	Узгодження суміжних поверхонь і берегової рослинності	Неперекриття полігонів та обґрунтоване проведення контурів
Рослинність (Vegetation) — Дороги (Roads)	Узгодження вузьких лісосмуг і транспортних коридорів	Відокремлення лінійного представлення деревостою від дорожньої геометрії

Джерело: складено за результатами дослідження.

Ідентифікатор TOID пов’язує похідне представлення з вихідною топографічною сутністю там, де її тотожність зберігається. Новий груповий контур — інший випадок. Його походження від кількох вихідних об’єктів описують самостійно, а прийнятому груповому представленню присвоюють нові GID і TOID, що не збігаються з ідентифікаторами вихідних об’єктів. Відношення Lin зберігає всі вихідні TOID і дає змогу простежити походження; групові кандидати, відхилені під час контролю, нових прийнятих об’єктів не утворюють.

Сукупність шести прикладних моделей становить результат дослідження. Вони конкретизують області визначення масштабних предикатів, задають допустимі геометрії та необхідні обмеження для контрольованого формування похідних наборів. Перевірку моделей на вихідних топографічних даних подано в розділі 3.

2.7 Модель надання похідних масштабних представлень через сервіси Національного геопорталу НІГД

Похідні масштабні представлення стають доступними користувачеві лише через сервіси Національного геопорталу НІГД. Тому методи формування похідних наборів доповнено моделлю їх надання. Вона визначає для кожного масштабного набору сервіс, рівень масштабування (ZOOM) та спосіб перевірки відповіді. Підґрунтям моделі стали дослідження сервісу картографічних зображень WMS [18] і сервісу картографічних тайлів WMTS [15] Національного геопорталу.

Вихідні характеристики чинного сервісу WMS, на які спирається модель надання, встановлено в попередньому дослідженні [18] за методикою, що поєднує вимоги специфікації Відкритого геопросторового консорціуму «OpenGIS Web Map Server Implementation Specification» версії 1.3.0 [32], стандарту ISO 19128:2005 «Geographic information — Web map server interface» [37] і технічного керівництва INSPIRE щодо сервісів перегляду (View Services) [87]. До сервісу надсилали тестові запити GetCapabilities, GetMap і GetFeatureInfo, а відповіді зіставляли з нормативними вимогами: наявністю обов’язкових операцій і елементів метаданих шарів, підтримкою систем координат і форматів зображення. Сумісність із клієнтськими програмами перевіряли підключенням сервісу в QGIS. Критерії та результати оцінювання зведено в таблиці 2.28.

Таблиця 2.28 – Критерії та результати оцінювання сервісу WMS Національного геопорталу НІГД

Критерій	**Нормативна вимога**	**Результат**
Обов'язкові операції	GetCapabilities, GetMap [32]	Підтримуються
Опціональна операція	GetFeatureInfo [32]	Реалізовано; відповідь у форматі XML з атрибутами об'єкта
Метадані шару	Name, Title, Abstract, CRS, BoundingBox, Style [32; 37]	Наявні
Елементи INSPIRE	стилі, посилання на легенду, перелік систем координат	Наявні
Системи координат	EPSG:4326, EPSG:3857	Підтримуються
Формати зображення	image/png (з TRANSPARENT=TRUE), image/jpeg, image/gif, image/svg+xml	Підтримуються
Сумісність із клієнтом	підключення в QGIS, відображення на різних масштабах	Підтверджено

Джерело: за результатами дослідження [18].

Оцінювання показало, що WMS Національного геопорталу відповідає базовим вимогам специфікації вебсервісу картографічних зображень WMS 1.3.0 [32] і стандарту інтерфейсу вебкартографічного сервера ISO 19128:2005 [37] та узгоджується з рекомендаціями INSPIRE [18]. Для багатомасштабної геовізуалізації визначальною є динамічна побудова зображення за актуальним станом даних, тож кожен похідний масштабний набір публікують самостійним шаром із межами відображення MinScaleDenominator і MaxScaleDenominator. Запит GetMap тоді повертає набір, що відповідає масштабу клієнта. Зменшеного зображення базової карти користувач не одержує. GetFeatureInfo повертає атрибути об'єкта, зокрема TOID, і пов'язує зображення з вихідним топографічним об'єктом.

Сервіс WMTS досліджено за стандартом OGC Web Map Tile Service 1.0.0 (OGC 07-057r7) [34]. На відміну від WMS, він надає тайли, адресовані за оголошеною матрицею тайлів; їх можна сформувати заздалегідь і кешувати або генерувати під час запиту. Тому WMTS придатний насамперед для базової топографічної основи, зміст якої змінюється рідше. За результатами дослідження [15] визначено вимоги до файл-сервера тайлів Національного геопорталу:

– растрові формати PNG, JPEG або GeoTIFF у системі координат із реєстру EPSG;

– структура адреси тайла /z/x/y.png, де z — рівень масштабування, x — стовпець, y — рядок матриці;

– початок нумерації (0, 0) у верхній лівій комірці на будь-якому рівні;

– фіксовані рівні масштабування, узгоджені з масштабним рядом топографічних карт.

Узгоджуючи рівні масштабування з масштабним рядом, слід ураховувати широту. Для набору матриць у системі WGS 84 / Pseudo-Mercator (EPSG:3857) з тайлами 256 × 256 пікселів і стандартним пікселем 0,28 мм знаменник масштабу рівня z визначено для екватора [34]:

$$S(z) = \frac{559\,082\,264}{2^z} \tag{2.20}$$

де S(z) — номінальний знаменник масштабу матриці тайлів рівня z; z — номер рівня масштабування (ZOOM); 559 082 264 — знаменник масштабу рівня 0 на екваторі для тайлів 256 × 256 пікселів і стандартного пікселя 0,28 мм.

На широті φ лінійний масштаб проєкції Меркатора збільшується в 1/cos φ раза, тому фактичний знаменник масштабу зображення становить:

$$S_\varphi(z) = S(z) \cdot \cos\varphi \tag{2.21}$$

де $S_\varphi(z)$ — фактичний знаменник масштабу зображення рівня z на широті φ; φ — географічна широта.

Для території України (φ = 44–52°) множник cos φ дорівнює 0,62–0,72. Отже, похідний набір масштабу 1:M відповідає рівню, номер якого на одиницю менший від визначеного за номінальним знаменником. Відповідність шести похідних наборів рівням масштабування (ZOOM) подано в таблиці 2.29. Це розрахунковий приклад для набору матриць EPSG:3857, тайлів 256 × 256 пікселів і пікселя 0,28 мм; для іншої системи координат, набору матриць чи роздільної здатності відповідність обчислюють за формулами (2.20)–(2.21) заново.

Таблиця 2.29 – Відповідність похідних масштабних наборів рівням масштабування (ZOOM) WMTS (φ = 49°)

Похідний набір	**Рівень z**	**Номінальний масштаб S(z)**	**Фактичний масштаб $S_φ(z)$**	**Рівень за табл. 1.8**
1:25 000	14	1:34 124	≈ 1:22 400	15
1:50 000	13	1:68 247	≈ 1:44 800	13–14
1:100 000	12	1:136 495	≈ 1:89 500	12
1:200 000	11	1:272 989	≈ 1:179 100	11
1:500 000	9–10	1:1 091 958 – 1:545 979	≈ 1:716 400 – 1:358 200	10
1:1 000 000	8–9	1:2 183 915 – 1:1 091 958	≈ 1:1 432 800 – 1:716 400	9

Джерело: розраховано за формулами (2.20)–(2.21).

Звідси випливає правило надання: похідний набір масштабу 1:M показують на рівні z, для якого $S_φ(z)$ найближчий до M, а перемикання між наборами відбувається на межі сусідніх рівнів. Тайли кожного рівня формують лише з похідного набору свого масштабу. Після узгодженого оновлення похідних наборів (п. 2.5.3) кеш тайлів перегенеровують лише для рівнів, де змінилися об’єкти.

Сервіс WFS доповнює сервіси перегляду. Він надає об’єкти похідного набору з геометрією, ідентифікатором TOID і масштабним атрибутом за оголошеною схемою [35]. Це дає змогу перевірити склад кожного набору за кількістю записів і ідентифікаторами незалежно від картографічного зображення (п. 3.5.4).

Узагальнену модель надання похідних масштабних представлень показано на рисунку 2.22. Вона пов’язує результати підрозділів 2.1–2.6 з тим, що фактично бачить користувач геопорталу, і визначає, які відповіді сервісів перевіряються в розділі 3.

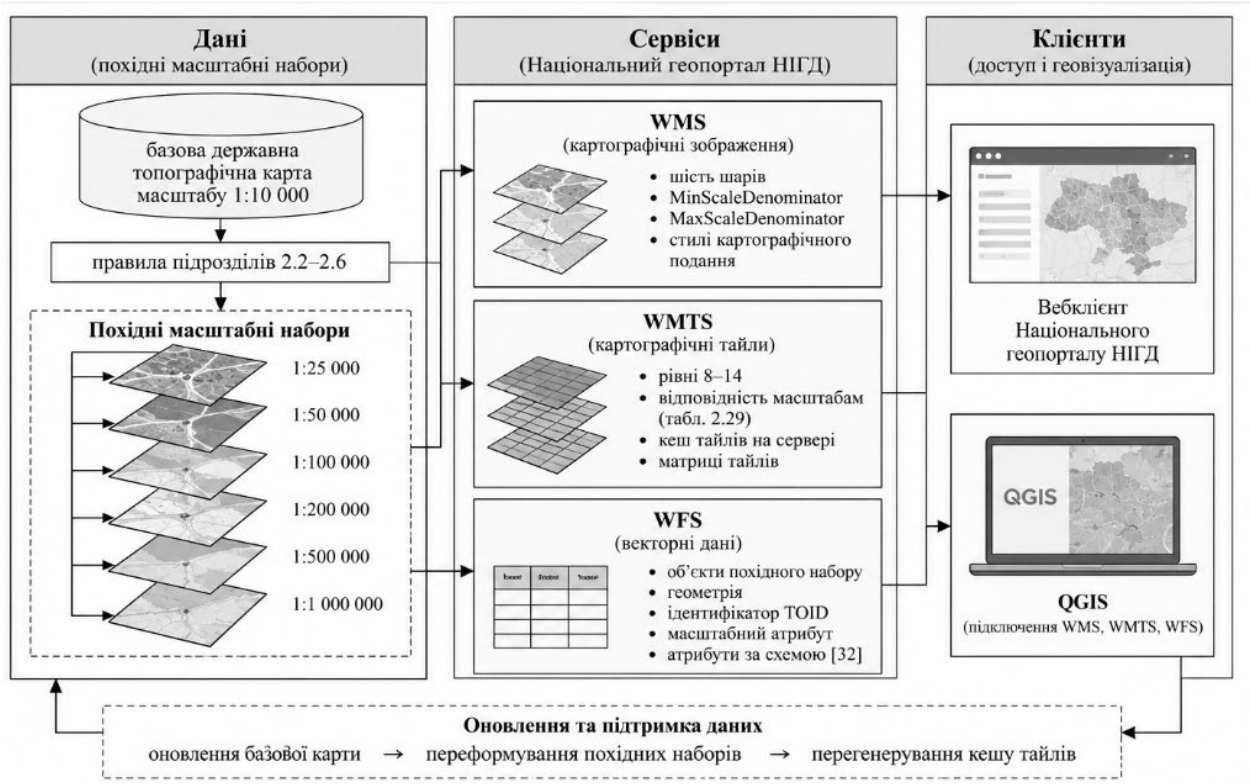


Рисунок 2.22 – Модель надання похідних масштабних представлень через сервіси WMS, WMTS і WFS Національного геопорталу НІГД

Джерело: складено за результатами дослідження [15; 18].

2.8 Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичну модель генералізації об'єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів, у якій рішення про включення об'єкта до похідного набору визначається з урахуванням семантичних ознак, функціонального призначення та статусу. Відокремлення масштабу, класу й конкретного екземпляра забезпечує однозначне формулювання умов відбору та перевірюваність результатів. Цим розв'язано друге завдання дослідження.

2. Розроблено каталоги й уніфіковані прикладні моделі шести класів топографічних об'єктів: «Будівлі», «Квартали», «Автомобільні та ґрунтові дороги», «Водойми», «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» і «Деревна рослинність». Прикладні UML-діаграми, атрибути, кодові довідники, масштабні критерії та топологічні обмеження дають змогу перейти від загального математичного предиката до перевірюваного рішення для конкретного об'єкта. Цим розв'язано третє завдання дослідження.

3. Удосконалено методи формування похідних масштабних представлень через послідовне відокремлення масштабного відбору, визначення допустимого геометричного представлення та роздільної здатності, застосування оператора генералізації та контролю прийнятності результату. Встановлено, що правильність геометричного перетворення не є достатньою умовою збереження змістової й топологічної узгодженості. Тому до методу включено самостійні перевірки семантики, походження і просторових відношень. Цим розв’язано четверте завдання дослідження.

4. Обґрунтовано правило незалежного формування кожного похідного масштабного набору безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Воно усуває залежність результатів від проміжних генералізованих станів, підтримує простежуваність походження та створює основу для узгодженої актуалізації геопросторових даних різних масштабів. Це є складовою розв’язання четвертого завдання. Основні положення розділу висвітлено в працях здобувача [4; 13].

5. Розроблено модель надання похідних масштабних представлень через сервіси Національного геопорталу НІГД. Кожен набір публікують самостійним шаром WMS із межами масштабу, рівні WMTS зіставлено з похідними масштабами з урахуванням широти, а WFS дає змогу перевірити склад наборів. Це пов’язує масштабну модель даних з картою, яку бачить користувач, і усуває розбіжність на один рівень між номінальним і фактичним масштабом тайлів на території України.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І ПРИКЛАДНИХ МОДЕЛЕЙ НА НАЦІОНАЛЬНОМУ ГЕОПОРТАЛІ НІГД

3.1 Вихідні дані, середовище та організація випробувань

У розділі 2 розроблено три взаємопов’язані наукові результати: математичну модель, каталоги й прикладні моделі шести класів, удосконалені методи формування похідних масштабних представлень. Розділ 3 присвячено їх експериментальній перевірці на Національному геопорталі НІГД. Перевірка полягає у зіставленні результатів операцій з вихідними атрибутами, масштабними критеріями, просторовими відношеннями та допустимими картографічними станами.

Експериментальний підхід ґрунтувався на трьох складниках. Математична модель визначала масштабні предикати й обмеження, розроблені прикладні моделі шести класів конкретизували семантичні умови, а незалежний контроль відрізняв геометричний кандидат від прийнятого похідного представлення. Такий поділ дає змогу пояснювати позитивний результат і причину відхилення неприйнятної геометрії.

3.1.1 Програмно-технологічна архітектура Національного геопорталу НІГД

Технічний проєкт Національного геопорталу НІГД [2] визначає клієнт-серверну організацію: PostgreSQL/PostGIS для зберігання геопросторових даних і стандартизовані інтерфейси зовнішнього доступу. Програмний стек геопорталу поєднує PostgreSQL/PostGIS для зберігання й просторових операцій, серверну частину на Node.js і вебклієнт на Vue. Дослідницькі обчислення виконували в PostgreSQL/PostGIS (бібліотеки GEOS і PROJ): масштабні предикати, геометричні оператори й перевірки реалізовано SQL-запитами та функціями, а вихідну File Geodatabase зчитували засобами GDAL. Випробування виконано в середовищі розробки та тестування геопорталу, яке

має той самий програмний код і конфігурацію, що й інші середовища Національного геопорталу НІГД.

Опрацювання починали з визначення класу каталогу, атрибутів і масштабних умов вихідного об’єкта. Після відбору застосовували геометричні оператори. Цільова схема розрізняє ідентифікатори TOID та GID [4]; у досліді одиничні результати зіставляли за TOID, а походження агрегатів — за відношенням Lin, запровадженим у пункті 2.5.1. Функціональну схему багатомасштабної геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД наведено на рисунку 3.1, а програмно-технологічні складові реалізації — у таблиці 3.1.

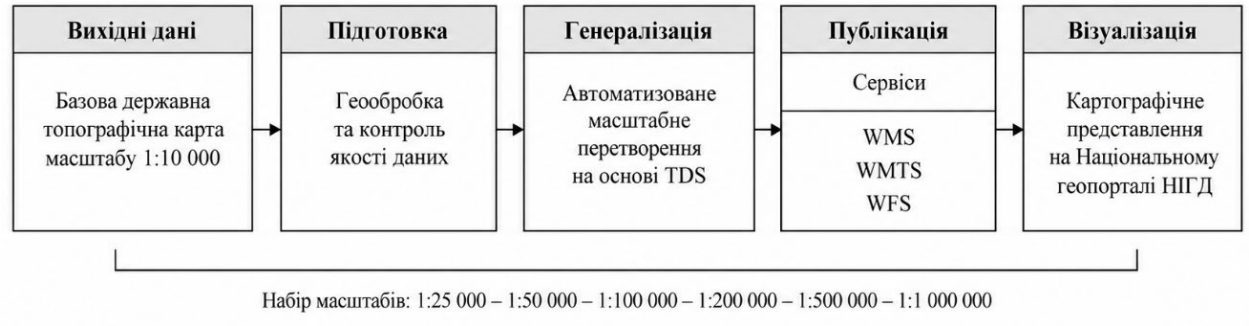


Рисунок 3.1 – Функціональна схема багатомасштабної геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.1 – Програмно-технологічні складові реалізації багатомасштабної геовізуалізації

Складова	Засоби та дані	Функція й результат
Зберігання та каталог	PostgreSQL/PostGIS; каталог класів	Сервісна архітектура Національного геопорталу за Технічним проєктом [2]; підтримка геопросторових даних і атрибутів.
Вихідна топографічна основа	Esri File Geodatabase	137 класів, із них 57 непорожніх; 20 165 вихідних записів у контрольному фрагменті.
Геометричне опрацювання	PostgreSQL/PostGIS (GEOS, PROJ); GDAL	Трансформування координат, полігональні та лінійні критерії, спрощення, агрегування й контроль геометрії.
Масштабні правила	Розроблені масштабні критерії й предикати розділу 2	Формування шести похідних масштабних рівнів із розмежуванням відбору, геометрії та символізації.
Векторні результати	GeoPackage; чотири фізичні шари	11 316 експериментальних записів «об’єкт — масштаб», серед яких 3 408 основних геометричних кандидатів, 192 діагностичні результати Roads та окрема діагностична серія VegetationP (7 716 записів).
Доступ через сервіси	WMS, WMTS, WFS	Відображення картографічних зображень, тайлів і надання векторних даних; перевірки описано в підрозділі 3.5.
Геовізуалізація	Вебклієнт Національного геопорталу; QGIS	Перегляд масштабних шарів і незалежна перевірка сервісного представлення.

Джерело: складено за результатами дослідження.

Сформовані результати обліковували за вихідним TOID, класом об’єкта за каталогом і цільовим масштабом. GID у прикладній схемі ідентифікує цифровий запис [4]. Походження складеного агрегату встановлювали за всіма TOID його учасників за моделлю пункту 2.5.1.

Загальний вигляд вебклієнта Національного геопорталу НІГД з переліком шарів топографічної основи показано на рисунку 3.2.

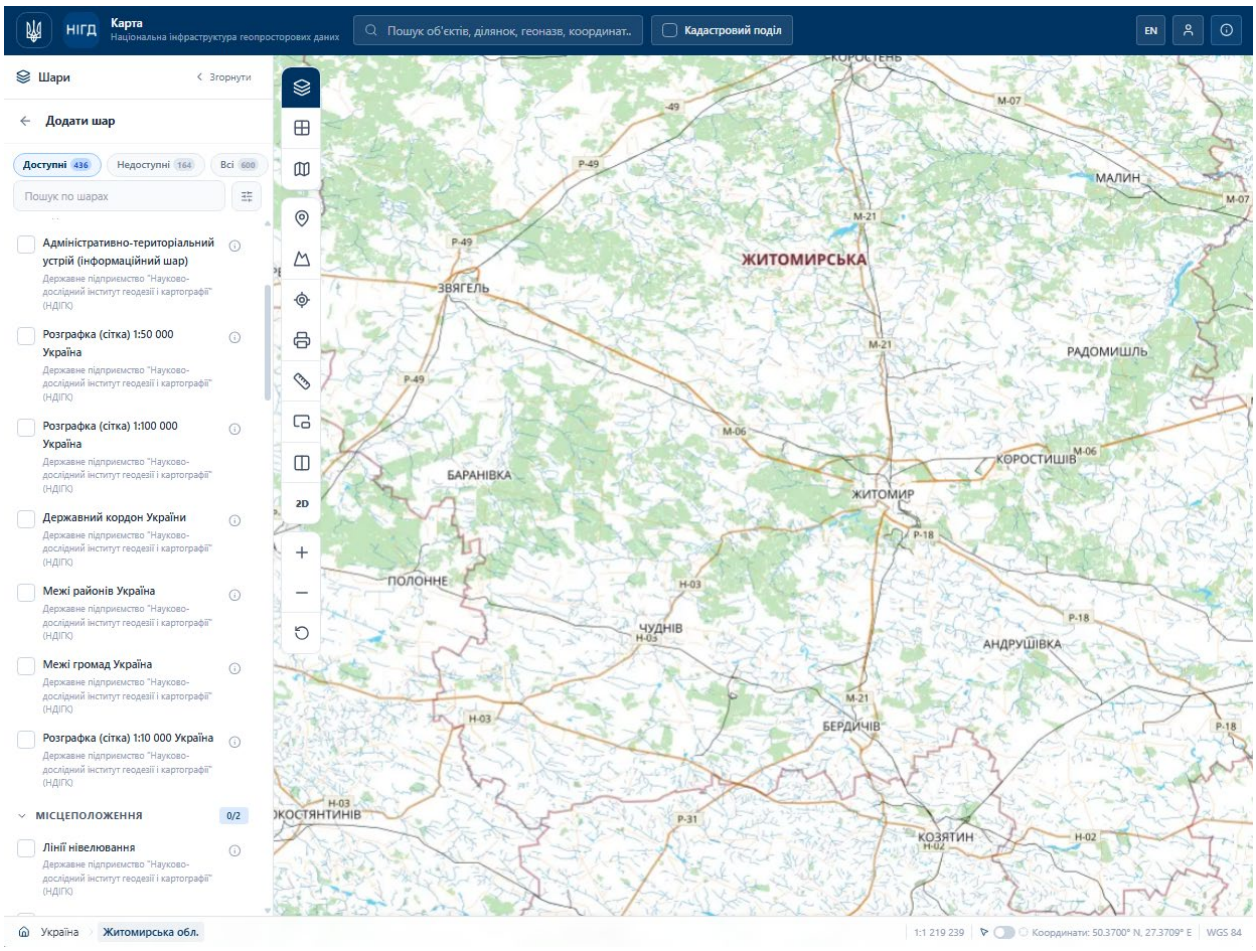


Рисунок 3.2 – Вебклієнт Національного геопорталу НІГД: перелік шарів і вибір топографічної основи

Джерело: знімок екрана вебклієнта Національного геопорталу НІГД, 2026 р.

3.1.2 Фізична модель вихідних даних і відповідність атрибутів

Вихідна File Geodatabase містила 137 фізичних класів зберігання, серед яких 57 непорожніх, із загальною кількістю 20 165 цифрових записів. Назви фізичних класів мають суфікси POL, L і P — відповідно для полігональної, лінійної та точкової локалізації (наприклад, BuildingsPOL і BuildingsP). Для об’єктів із наявним TOID перевірено однозначність ідентифікаторів. Семантичну відповідність установлено за цільовими доменами.

Абстрактний клас TopographicObject задає поля GID, TOID, featureTypeCode, Geom, verticalPosition, часові реквізити, upperScale та шість масштабних ідентифікаторів Symbol25K–Symbol1M. У досліджених вихідних класах зафіксовано TOID; GID, upperScale та Symbol25K–Symbol1M належать

до цільової схеми й фізично відсутні в цій File Geodatabase. Під час реалізації моделей враховано саме такий склад вихідних полів.

Фізична наявність певного атрибута у конкретному вихідному класі не тотожна його формальній обов'язковості в цільовій прикладній схемі, оскільки формат надходження даних і модель похідного набору мають принципово різні завдання. Кожне зіставлення вимагало чіткого правила перенесення атрибутів. Зокрема, значення TOID використовували для простежування вихідної топографічної сутності, натомість GID описує ідентифікацію конкретного цифрового запису цільової прикладної моделі та не виникає автоматично лише внаслідок зміни масштабу. Невідомий код не підмінювали довільним службовим значенням. Для агрегованих кандидатів множину всіх вихідних TOID описували відношенням Lin як самостійною дослідницькою структурою їхнього походження, не змінюючи обов'язкових реквізитів і кратностей атрибутів абстрактного класу TopographicObject, установлених у розробленій моделі.

Для всіх 93 об'єктів класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601) значення атрибута typeRoad відповідало цільовому домену. Клас топографічних об'єктів «Вулиці» (Streets, код 0403) був поданий 620 вихідними записами. У kindOfRoad службовий код −32768 виявлено в 93 записах доріг і 612 записах вулиць — разом у 705 записах; решта вісім записів вулиць мали допустимі значення. Наявне поле зі службовим кодом відрізняли від відсутнього поля. Для деревної рослинності зафіксовано інший розподіл: 59 полігонів із typeVegetation = 1, чотири лінії з кодом 17 і 2 482 точки з кодом 22. Відповідність цих кодів цільовій схемі перевіряли до геометричного опрацювання.

Коди 17 і 22 відсутні в довіднику typeVegetation (табл. 2.25); для вихідних лінійних та точкових записів потрібне класифікаційне зіставлення, результати якого розглянуто в пункті 3.2.5.

3.1.3 Контрольний фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000: склад даних і система координат

Контрольний фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 охоплює забудову, дорожню й гідрографічну мережі та рослинність. Вихідну File Geodatabase збережено без зміни координат. Для метричних перевірок використано УСК-2000 / МСК-63 (Харків), EPSG:9858 [88]: площі обчислювали у квадратних метрах, довжини — у метрах. Це забезпечило коректне зіставлення вихідних і похідних геометрій. Фрагмент карти, на якому виконано перевірку, показано на рисунку 3.3, а склад контрольної вибірки — у таблиці 3.2.



Рисунок 3.3 – Контрольний фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000

Джерело: фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 (експорт з ArcMap), 2026 р.

Таблиця 3.2 – Склад контрольної вибірки топографічних даних масштабу 1:10 000

Клас (код)	Полігони	Лінії	Точки	Усього
Buildings (0501)	9 176	—	4 035	13 211
Blocks (0402)	529	—	—	529
Roads (0601)	—	93	—	93
StandingWater (0301)	11	—	—	11
Watercourse (0303)	—	5	—	5
Vegetation (0801)	59	4	2 482	2 545
Разом	9 775	102	6 517	16 394

Джерело: складено за вихідними топографічними геопросторовими даними; докладні характеристики наведено в додатку Д.

Найбільшу частину вибірки становили будівлі: 9 176 полігонів і 4 035 точок, разом 13 211 записів (табл. 3.2; пункт Д.1). Наявність двох геометричних представлень дала змогу зіставити правила опрацювання одного класу каталогу. Для кожного класу передбачено свій сценарій: для будівель і водойм досліджували обмеження за площею, для кварталів — агрегування, для доріг — критерії довжини та зв’язності мережі, ділянки водотоків дали змогу перевірити поєднання довжини та ширини, а деревна рослинність — операції з полігонами та відстанями між точками. Так добір сценаріїв охопив основні оператори моделі. Їхні результати для контрольної території подано в підрозділі 3.2.

3.1.4 Початковий контроль умов масштабного відбору за площею

Кількість валідних геометрій, які виконують строго заданий поріг площі для масштабу s, визначають сумою індикаторів нерівності $A_i > \tau_s$ за всією контрольною множиною (формула 3.1).

$$C_s^{area} = \sum_{i=1}^{n_v} 1\,(A_i > \tau_s) \qquad (3.1)$$

де C_s^{area} — кількість валідних геометрій, які виконують поріг площі для масштабу s; n_v — кількість валідних геометрій у контрольній множині; A_i — площа i-ї геометрії, м²; τ_s — поріг площі для масштабу s, м² (для будівель —

Threshold(s) у формулі (2.8)); 1(·) — індикаторна функція, що дорівнює 1, якщо умову в дужках виконано, і 0 — в іншому разі.

Для BuildingsPOL критерій площі виконали 1 548, 258 і 24 полігони в перших трьох похідних масштабах; для StandingWaterPOL — відповідно 8, 1 і 0. На рівнях 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000 позитивних результатів в обох класах немає. Шестирівневий розподіл зафіксовано в таблиці Д.4.

Метричний допуск не завершує контроль. Для будівель і водойм після відбору за площею додатково оцінювали встановлені умови семантичної значущості об’єктів, менших за поріг площі, відповідність вихідної семантики та допустимість майбутнього картографічного знака для цього масштабу. Внутрішня точка залишалася тільки геометричним кандидатом. Класифікаційна допустимість точкового представлення в моделі ще не веде до автоматичного прийняття кожної водойми або будівлі, меншої за поріг площі, адже підставу її картографічного показу встановлюють за підтвердженими семантичними ознаками конкретного об’єкта. Вихідні поля не доповнювали припущеннями. Кількісні результати порогового відбору характеризують лише виконання встановленого критерію площі для валідних контурів, а загальну придатність масштабного представлення визначають усі подальші семантичні й топологічні перевірки та перевірки умовних знаків.

Попарний контроль 529 полігонів кварталів та 11 полігонів водойм не виявив усередині кожного класу спільних внутрішніх областей площею понад 0,01 м². Цей тест характеризує вихідні полігони. Перетини новоутворених агрегатів кварталів з осями вулиць розглянуто в пункті 3.2.2.

3.1.5 Формування похідних векторних представлень

Основний контрольний GeoPackage, сформований під час експерименту, містив чотири фізичні шари й 11 316 записів «об’єкт — масштаб». Після класифікаційного відбору основні геометричні перевірки дали 3 408 основних кандидатів: 3 384 за площею, 22 за довжиною та класифікаційним критерієм для доріг і два для ділянок водотоків у 1:25 000. Крім того, зафіксовано 192 діагностичні результати перевірки довжини доріг інших категорій та 7 716

діагностичних записів VegetationP. Ці записи слугують лише для дослідження умов щодо відстаней між точками; нормативну допустимість представлення поодиноких дерев установлюють за іншими, семантичними критеріями.

3.1.6 Реалізація прикладних схем і предикатів відбору засобами СКБД

Розрахунки виконано в PostgreSQL 16.15 із розширенням PostGIS 3.4.3 та бібліотеками GEOS 3.12.2 і PROJ 9.4.1; File Geodatabase зчитували засобами GDAL 3.9.3. Вихідну базу завантажено без редагування. Криволінійні сегменти контурів будівель лінеаризовано під час читання, а для метричних розрахунків координати перетворено з УСК-2000 (EPSG:5561) до системи EPSG:9858 (пункт 3.1.3).

Прикладні схеми підрозділу 2.6 перенесено до PostgreSQL. Абстрактному класу TopographicObject відповідає батьківська таблиця з реквізитами таблиці 2.1, а таблиці шести класів успадковують її механізмом наслідування таблиць [89]. Довідники зведено в окрему таблицю кодових значень. Інтервали атрибутів, допустимі коди класів і типи геометрії задано обмеженнями CHECK, а масштабні умови таблиць 2.3, 2.7, 2.11, 2.15, 2.19 і 2.23 — окремою таблицею правил. Службове значення −32768 СКБД трактує як невизначене, а не як код. Фрагменти реалізації наведено в пункті Д.6.

Характеристичний предикат P(c,s)(x) реалізовано як SQL-функцію з трьома можливими результатами: істина, хибність і невизначеність. Для 16 394 об’єктів шести класів і шести масштабів вона виконала 98 364 оцінки за 0,82 с; отримані кількості кандидатів наведено в таблицях 3.3–3.9. Невизначеними залишилися 4 035 точок будівель, один невалідний полігон будівлі, 2 487 записів рослинності (точки, лінії та один невалідний полігон) і ділянки водотоків із невідомою шириною. Саме такий розподіл рішень і передбачає тризначна функція контролю пункту 2.5.2.

Перевірка доменів засобами СКБД виявила ще одну розбіжність, крім уже відомих кодів 17 і 22 деревної рослинності. Значення typeBuildings = 4 мають 37 полігонів будівель, значення 20 — 24 полігони, а значення 9 — 13 точок. Цих кодів немає в довіднику таблиці 2.5. Отже, реалізація моделі в

СКБД забезпечує не лише відтворюваний відбір, а й автоматичний контроль відповідності джерела цільовим доменам.

3.2 Результати перевірки шести прикладних моделей і методів генералізації

Пооб'єктну перевірку виконано для шести класів на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Основою слугували розроблені в розділі 2 моделі з їхніми масштабними критеріями, атрибутами й топологічними обмеженнями. Еталон для порівняння був один. Для кожного масштабу результати зіставляли безпосередньо з базовою державною топографічною картою масштабу 1:10 000, без звернення до похідних рівнів, і визначали правильність відбору, геометричну допустимість, збереження семантики та зв'язку з вихідним TOID. Порівняння прямого й каскадного формування, вибір алгоритму спрощення та збереження зв'язності мережі розглянуто в пунктах 3.2.6–3.2.8.

3.2.1 Клас топографічних об'єктів «Будівлі» (Buildings, код 0501): відбір за площею та зміна геометричного представлення

Відбір за площею для об'єктів класу «Будівлі» (Buildings, код 0501) виконано для 9 175 валідних контурів. Один із 9 176 вихідних полігонів виключено через самоперетин; 4 035 BuildingsP обліковували окремо (табл. 3.2). Вимірювали в УСК-2000 / МСК-63 (Харків) (EPSG:9858) [88], зберігши первинну File Geodatabase. Результати за масштабами наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати відбору за площею будівель за масштабами

Цільовий масштаб	**Поріг, м²**	$A > \tau_s$**, шт.**	$A \leq \tau_s$**, шт.**	**Відібрано, %**
1:25 000	625	1 548	7 627	16,87
1:50 000	2 500	258	8 917	2,81
1:100 000	10 000	24	9 151	0,26
1:200 000	80 000	0	9 175	0
1:500 000	500 000	0	9 175	0
1:1 000 000	2 000 000	0	9 175	0

Джерело: розраховано за вихідними полігонами будівель контрольного фрагмента; повні вибірки наведено в пункті Д.2.

Зіставлення вихідної File Geodatabase з GeoPackage підтвердило збіг вибірок 1 548, 258 і 24 TOID: усі 1 830 записів «TOID — масштаб» зберегли первинну геометрію. Рисунок 3.4 відтворює відбір за площею в однаковому фрагменті території розміром 1,3 × 1,3 км. Кількісні результати повної вибірки містить таблиця 3.3.

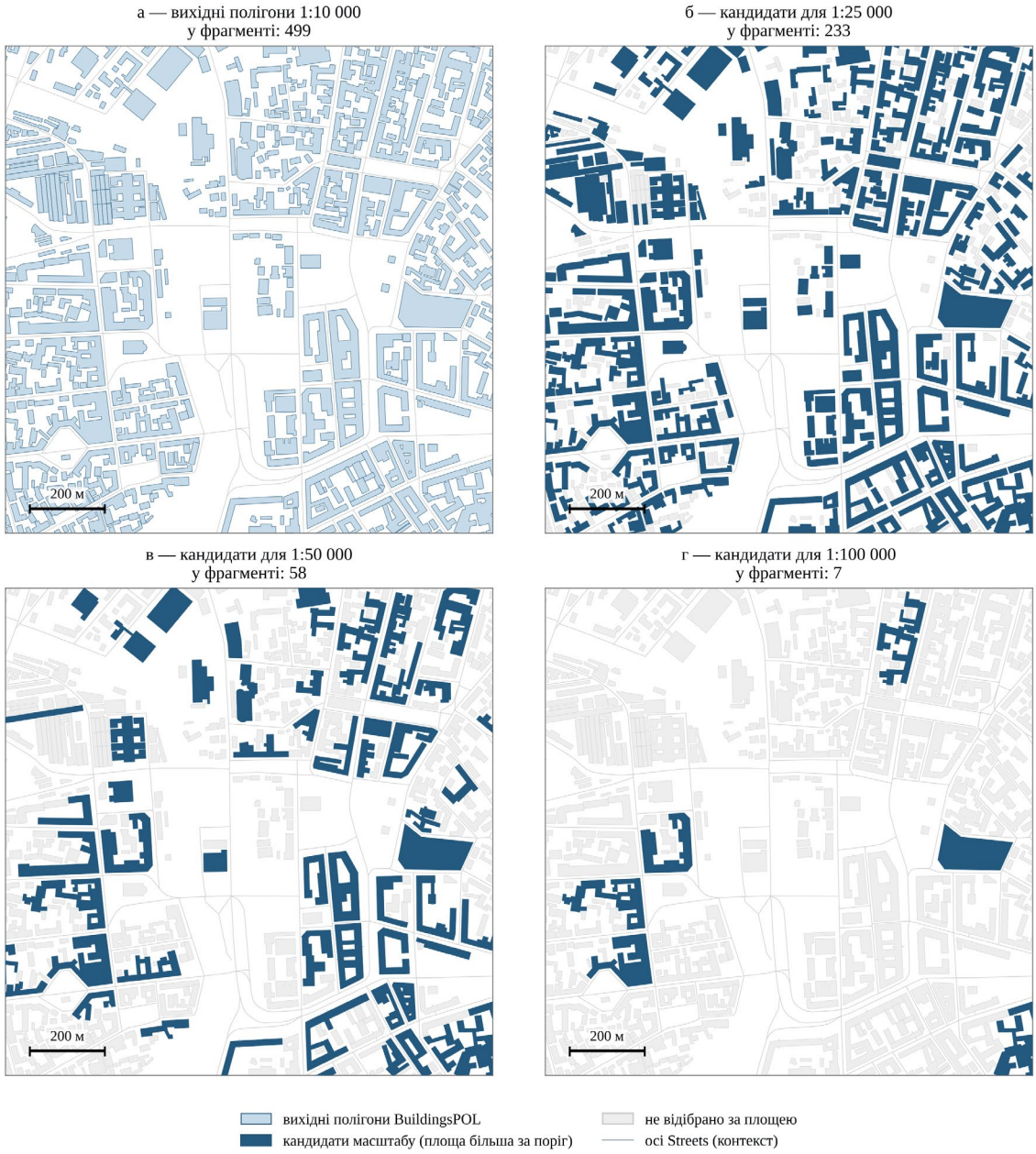


Рисунок 3.4 – Полігональні представлення Buildings (0501) вихідного рівня та геометричні кандидати трьох похідних масштабів

Джерело: побудовано за координатами BuildingsPOL вихідної File Geodatabase контрольного фрагмента та звірено з кандидатами, збереженими в GeoPackage; таблиця 3.3, пункт Д.2. Наведені на рисунку кількості стосуються об’єктів, які повністю або частково потрапляють у показаний фрагмент; відбір виконано за повною площею вихідних полігонів.

Для валідних полігонів, менших за поріг площі, сформовано 7 627; 8 917; 9 151; 9 175; 9 175 та 9 175 внутрішніх точок-кандидатів за шістьма масштабами. Усього це 53 220 пар «TOID — масштаб». Кожна точка окремого контрольного набору лежить усередині свого полігона. Вихідні BuildingsP залишено в самостійному обліку, а придатність нового точкового знака визначали за семантичними передумовами.

3.2.2 Клас топографічних об’єктів «Квартали» (Blocks, код 0402): агрегування та збереження походження

Досліджено 529 валідних полігонів класу «Квартали» (Blocks, код 0402) з унікальними TOID і сукупною площею 10,386 км². Для обчислень використано координати в EPSG:9858 [88]. Відбір одиничних кварталів і побудову групових кандидатів виконували як послідовні операції.

У прикладній моделі кварталів для шести похідних масштабів установлено пороги площі кварталів: 625, 2 500, 10 000, 40 000, 250 000 і 1 000 000 м² відповідно (табл. 3.4). Їх використано під час перевірки масштабної придатності та геометричного об’єднання.

Таблиця 3.4 – Відбір за площею кварталів у масштабному ряді

Похідний масштаб	Мінімальна площа, м²	Проходять критерій, шт.	Менші від порога, шт.
1:25 000	625	519	10
1:50 000	2 500	506	23
1:100 000	10 000	336	193
1:200 000	40 000	51	478
1:500 000	250 000	0	529
1:1 000 000	1 000 000	0	529

Джерело: розраховано за вихідними полігонами кварталів контрольного фрагмента (пункт Д.2).

Для перших чотирьох масштабів одиничні відібрані полігони зберегли 99,98 %, 99,73 %, 88,49 % і 34,46 % сукупної площі кварталів. У двох найдрібніших масштабах жоден одиничний полігон не досяг мінімальної площі. Тому наступний дослід стосувався групового представлення кварталів, менших за поріг площі.

Серед 529 кварталів не виявлено пар зі спільним відрізком межі або перекриттям внутрішніх областей. Сусідні квартали розділяють вуличні коридори. Щоб оцінити наслідки їх геометричного зближення, побудовано граф близькості кварталів із допуском 10, 20, 50 і 100 м для масштабів 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 і 1:1 000 000 відповідно; результати групування подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Експериментальне групування кварталів, менших за поріг площі

Масштаб	Допуск, м	Груп-кандидатів	Кварталів у групах	Кварталів поза групами
1:100 000	10	15	47	146
1:200 000	20	27	432	46
1:500 000	50	6	518	11
1:1 000 000	100	1	522	7

Джерело: результати експериментального групування кварталів; склад груп наведено в таблиці Д.9.

За допуску 10 м у масштабі 1:100 000 утворено 15 груп із 47 кварталів. Усі геометрії-кандидати були валідними й однокомпонентними, але їхня сумарна площа зросла приблизно на 21,99 тис. м². Новоутворені ділянки перетнули осі вулиць. Міжкласовий контроль виявив цей конфлікт і встановив непридатність таких агрегатів до прийняття. Одну з таких груп — вісім кварталів, об’єднаний контур яких перетинає осі вулиць у доданій площі, — показано на рисунку 3.5.

У масштабі 1:200 000 отримано 27 груп із 432 кварталів, з яких чотири багатокомпонентні. Для 1:500 000 сформовано шість груп, зокрема одну багатокомпонентну; для 1:1 000 000 — одну групу з 522 кварталів. Усі 49 кандидатів зберегли валідність, проте перетнули вулиці на новоутворених ділянках. Приріст площі від 0,022 до 2,92 км² характеризує дію геометричного зближення та просторовий конфлікт, який воно спричинило.



Рисунок 3.5 – Агрегування восьми кварталів і перетин осей Streets у доданій площі для масштабу 1:100 000

Джерело: побудовано за координатами Blocks і Streets вихідної File Geodatabase контрольного фрагмента; склад групи наведено в таблиці Д.9. Додану площу та ділянки перетину обчислено геометричними операціями над вихідними об'єктами.

Для чотирьох масштабів збережено 49 експериментальних груп і 1 519 зв'язків «група — TOID». Входження кварталу до груп різних масштабів обліковували для кожного масштабу самостійно. Усередині кожного рівня TOID учасників не повторюються, а квартали, що пройшли індивідуальний відбір за площею, до груп не входять. Такий облік дав змогу перевірити походження незалежно від результату контролю перетинів з вулицями.

Усі 529 кварталів мають typeBlocks = 1, statusBlocks = 1 і buildingDensity = 1. Вихідне поле FunctionalPurpose (у цільовій моделі кварталів відсутнє) містить службове значення −32768, тож функціональне призначення за ним невизначене. Відбір за площею, походження груп, вуличні перетини та семантичні передумови агрегування перевіряли як незалежні умови.

3.2.3 Клас топографічних об'єктів «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601): масштабний відбір і геометричне спрощення

Вибірка об'єктів класу «Автомобільні та ґрунтові дороги» (Roads, код 0601) містить 93 валідні прості лінії з різними TOID; їхня сумарна довжина в EPSG:9858 дорівнює 11,927 км [88]. Додатково використано 620 об'єктів класу «Вулиці» (Streets, код 0403) для просторового контексту й перевірки

перетинів. Облік обох класів вели незалежно. Вплив масштабу на відбір доріг за довжиною й класом показано в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вплив масштабу на відбір доріг за довжиною й класом

Масштаб	**Мінімальна довжина, м**	**Перевірено за довжиною**	**Основні кандидати typeRoad = 3**	**Діагностичні значення typeRoad 4–9**
1:25 000	25	89	8	81
1:50 000	50	67	6	61
1:100 000	100	39	5	34
1:200 000	200	16	2	14
1:500 000	500	2	1	1
1:1 000 000	1 000	1	0	1

Джерело: розраховано за вихідними лініями доріг контрольного фрагмента (пункт Д.3).

Із 214 результатів перевірки довжини 22 стосуються доріг із typeRoad = 3 і враховуються як основні кандидати. Решта 192 характеризують лише перевірку довжини доріг typeRoad 4, 5, 6 і 9 та не підтверджують їх включення до похідних наборів (табл. 2.11).

На рисунку 3.6 показано п’ять доріг-кандидатів із typeRoad = 3 у 1:100 000; вулиці на рисунку слугують просторовим контекстом.

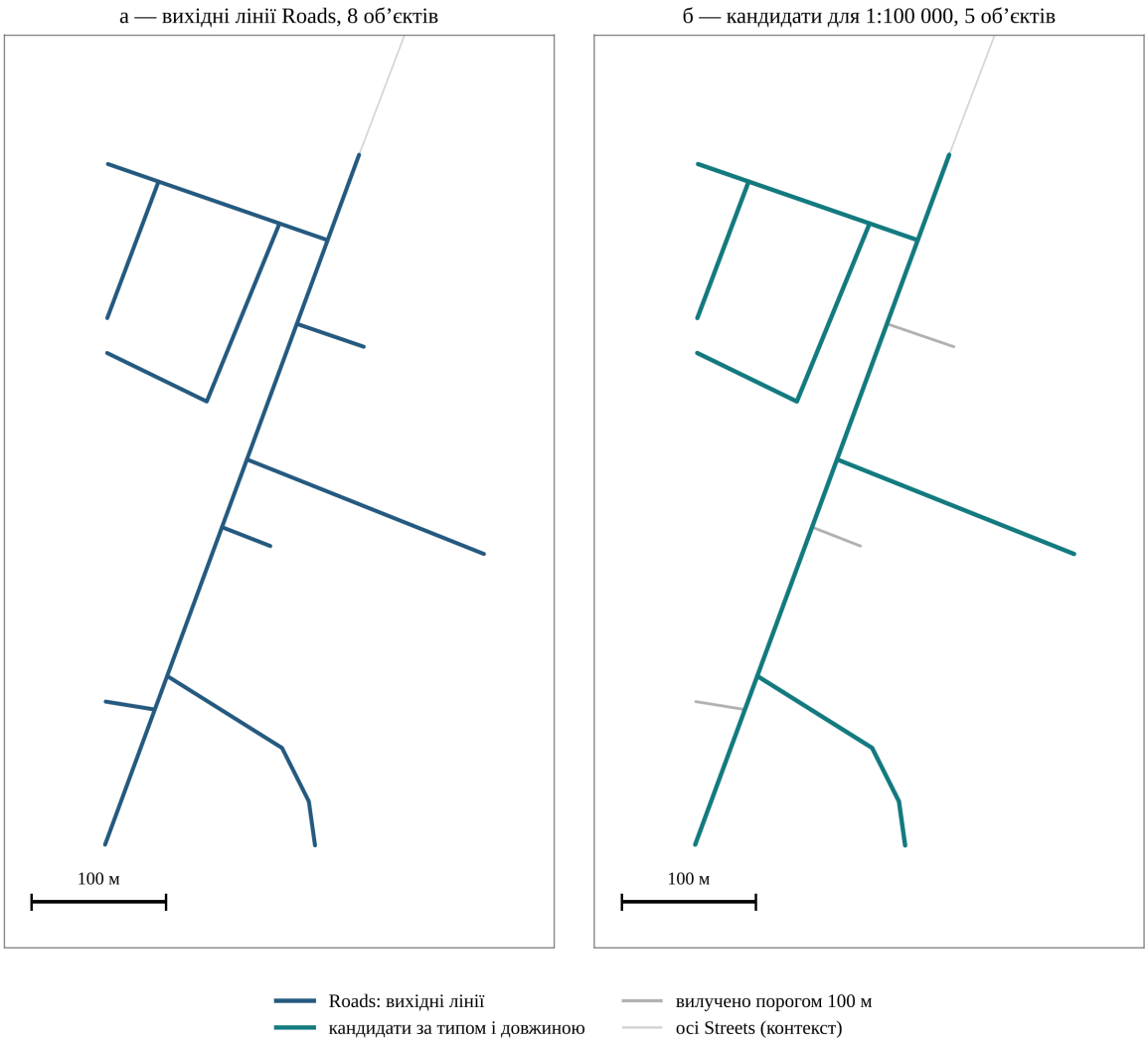


Рисунок 3.6 – Порівняння вихідних ліній Roads (0601) та кандидатів картографічного відбору для рівня 1:100 000 на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000

Джерело: побудовано за координатами Roads і Streets вихідної File Geodatabase контрольного фрагмента; таблиця 3.6.

У п’яти кандидатів масштабу 1:100 000 кількість вершин зменшилася з 17 до 16. Зміну зафіксовано для TOID 190618DB3129DCAF: чотири вершини скорочено до трьох, відхилення становило 6,155 м за допуску 10 м. Усі 22 масштабні представлення зберегли кінцеві точки та валідність. На інших рівнях число вершин залишилося незмінним.

Перевірки доріг підтвердили відтворюваність відбору за довжиною, спрощення та збереження TOID. Крім того, встановлено планові перетини, для яких транспортний зв’язок потрібно визначати за висотними й функціональними характеристиками.

3.2.4 Класи топографічних об’єктів «Водойми» (StandingWater, код 0301) та «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303): масштабно залежне представлення

Для класу «Водойми» (StandingWater, код 0301) перевірено відбір за площею, а для класу «Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі» (Watercourse, код 0303) — одночасне виконання критеріїв довжини й ширини (табл. 3.8). Результати відбору водойм за площею подано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати відбору за площею водойм StandingWater (0301)

Масштаб карти	Поріг площі, м²	Полігонів понад поріг	Об’єктів, для яких потрібне рішення про точкове представлення
1:25 000	625	8	3
1:50 000	2 500	1	10
1:100 000	10 000	0	11
1:200 000	80 000	0	11
1:500 000	500 000	0	11
1:1 000 000	2 000 000	0	11

Джерело: розраховано за вихідними полігонами водойм контрольного фрагмента (пункт Д.4).

Рисунок 3.7 показує відбір за площею у фрагменті з чотирма вихідними водоймами. Межі огляду однакові для трьох панелей; полігони-кандидати відповідають масштабам 1:50 000 і 1:100 000. Перевірку внутрішніх точок-кандидатів повної вибірки містить таблиця Д.17.

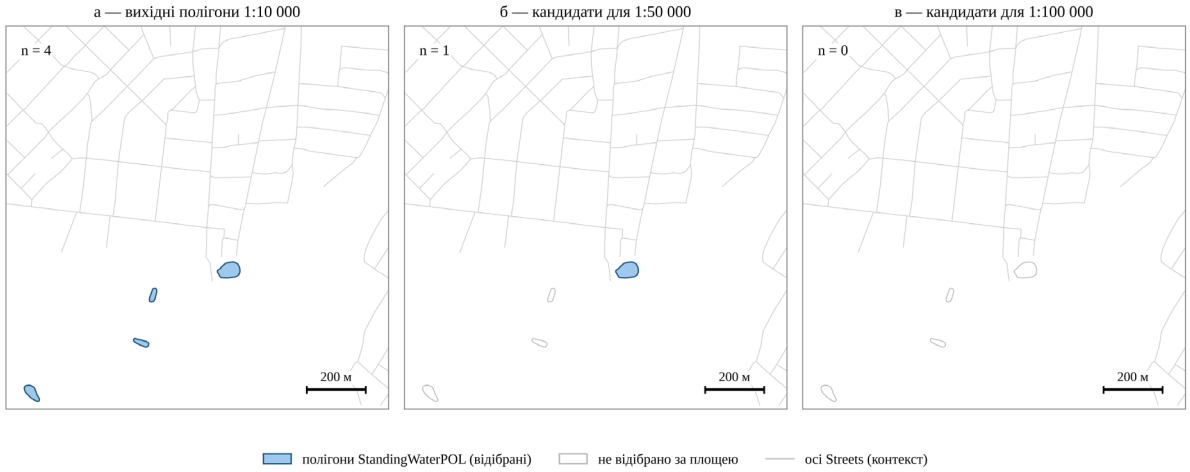


Рисунок 3.7 – Відбір за площею StandingWater (0301) за вихідними геометріями для масштабів 1:50 000 і 1:100 000

Джерело: побудовано за координатами StandingWaterPOL і Streets вихідної File Geodatabase контрольного фрагмента; множини TOID та контури кандидатів звірено з контрольним GeoPackage. Результати повної вибірки наведено в таблиці 3.7, контрольні матеріали — у таблицях Д.16–Д.17.

Таблиця 3.8 – Результати відбору ділянок водотоків (0303) за двома критеріями

Масштаб	**Довжина, м**	**Ширина, м**	**Кандидати за довжиною**	**Підтверджено обидва критерії**	**Без відомої ширини**
1:25 000	Усі	< 15	5	2	3
1:50 000	> 500	< 30	1	0	1
1:100 000	> 1 000	< 60	1	0	1
1:200 000	> 2 000	< 120	0	0	0
1:500 000	> 7 500	< 300	0	0	0
1:1 000 000	> 15 000	< 500	0	0	0

Джерело: розраховано за вихідними лініями водотоків контрольного фрагмента (пункт Д.4).

Зіставлення за парами «TOID — масштаб» підтвердило відповідність збережених у GeoPackage результатів вихідному відбору: дев’ять полігональних представлень водойм і два представлення ділянок водотоків у GeoPackage мають узгоджені ідентифікатори та геометрії.

Для ділянок водотоків у масштабі 1:25 000 обидва критерії підтверджено для двох ділянок із п’яти; для трьох ділянок ширина невідома (−32768), тому рішення залишено невизначеним (табл. 3.8). Для водойм поріг площі виконали 8 полігонів у 1:25 000 і один у 1:50 000 (табл. 3.7).

3.2.5 Клас топографічних об’єктів «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801): відбір за площею та межі генералізації

Позначимо V_s^{POL} множину полігонів деревної рослинності, відібраних для масштабу s; V^{POL} — множину 58 валідних вихідних контурів (один із 59 полігонів таблиці 3.2 невалідний і до відбору не включений); v_i — і-й контур цієї множини; $A(v_i)$ — його площу в EPSG:9858; τ_s — мінімальний поріг площі для масштабу s. Відбір визначено строгою нерівністю $A(v_i) > \tau_s$. Результати подає таблиця 3.9.

$$V_s^{POL} = \{v_i \in V^{POL} : A(v_i) > \tau_s\} \quad (3.2)$$

Таблиця 3.9 – Відбір за площею валідних полігонів VegetationPOL для шести цільових масштабів

Масштаб карти	Поріг площі, м²	Полігони понад поріг	Не пройшли поріг площі
1:25 000	625	56	2
1:50 000	2 500	51	7
1:100 000	10 000	22	36
1:200 000	80 000	4	54
1:500 000	500 000	0	58
1:1 000 000	2 000 000	0	58

Джерело: розраховано за вихідними полігонами деревної рослинності контрольного фрагмента (пункт Д.5).

Як зазначено в пункті 3.1.2, коди 17 (VegetationL) і 22 (VegetationP) відсутні в цільовому CodeList, тому для лінійних і точкових представлень перед вибором знака потрібне класифікаційне зіставлення.

Для VegetationPOL виконано спрощення за алгоритмом Дугласа – Пекера [52] з дослідницьким допуском $\varepsilon_s = 0{,}0001 \text{ м} \cdot M_s$, де ε_s — допуск спрощення, м; M_s — знаменник масштабу. На рівні 1:100 000 кількість вершин 22 контурів скоротилася з 1 288 до 372. Результати для всіх масштабів зведено в таблиці Д.18. Цей допуск не є самостійним нормативним порогом прийнятності для всіх метрик якості.

Для всіх 133 спрощених контурів VegetationPOL у EPSG:9858 обчислено відносну зміну площі (модуль різниці площ, поділений на площу вихідного

контуру) і відстань Гаусдорфа між вихідним і спрощеним контурами. Найбільша відносна зміна площі становила 21,18 % у вибірці 1:50 000 і 6,08 % у вибірці 1:100 000. Контроль за дискретною симетричною відстанню Гаусдорфа [90] виявив сім геометричних кандидатів із перевищенням порівнюваного допуску: чотири у 1:25 000 та три у 1:100 000. Максимуми дорівнювали відповідно 4,08 м за допуску 2,5 м і 10,63 м за допуску 10 м; у масштабах 1:50 000 і 1:200 000 найбільші відстані (4,98 м і 19,77 м) не перевищили допусків 5 м і 20 м. Для контролю відстані Гаусдорфа застосовано той самий експериментальний допуск ε_s; сім кандидатів перевищили його, тому їх відхилено й передано на повторне опрацювання.

Відбір спирався на первинну площу валідного контуру. Площу після спрощення використовували для оцінювання зміни геометрії. Збережені TOID та масштаб дали змогу зіставити обидва стани без повторного застосування початкового предиката до вже зміненого контуру.

За 58 валідними контурами отримано 133 позитивні полігональні результати «полігон — масштаб». Для них перевірено спрощення, валідність і простежуваність, а метричний контроль установив межі придатності окремих кандидатів: сім із 133 результатів відхилено за відстанню Гаусдорфа, тож вони залишаються геометричними кандидатами, а не прийнятими представленнями. Діагностичні VegetationP залишено в самостійному обліку. Отже, дослід охопив відбір, оцінювання геометричних змін та семантичні передумови використання результатів.

3.2.6 Пряме та каскадне формування похідних масштабів

Результати пунктів 3.2.1–3.2.5 отримано прямим формуванням: кожен масштаб утворювали з вихідної геометрії 1:10 000. Щоб перевірити тезу про накопичення похибок, кожен масштаб сформовано також каскадно, тобто з результату попереднього рівня: 1:50 000 — з 1:25 000, 1:100 000 — з 1:50 000 і далі. Допуск спрощення в обох випадках дорівнював $\varepsilon_s = 0{,}0001 \text{ м} \cdot M_s$.

Для вибіркового спрощення алгоритмом Дугласа – Пекера каскад похибок не накопичив (табл. 3.10). Осі вулиць і доріг за обох способів збіглися

повністю, а найбільші відхилення від вихідних ліній не перевищили допусків 2,5; 5; 10 і 20 м. Для полігонів розбіжності поодинокі. Каскад змінив рішення щодо двох будівель і одного контуру рослинності для 1:50 000 та однієї будівлі для 1:100 000, бо площу перевіряли вже за спрощеним контуром. Одна внутрішня точка будівлі для 1:200 000, побудована за спрощеною геометрією, опинилася поза вихідним контуром. Причина малих відмінностей у природі алгоритму: він лише вибирає з наявних вершин і не створює нових.

Таблиця 3.10 – Пряме та каскадне формування: відбір і спрощення

Набір, масштаб	**Відібрано: пряме / каскадне**	**Розбіжності відбору**	**Найбільше відхилення, м: пряме / каскадне**	**Найбільша зміна площі, %: пряме / каскадне**
Будівлі, 1:50 000	258 / 256	2 контури стали точками	6,17 / 4,96	9,58 / 9,58
Будівлі, 1:100 000	24 / 25	1 зайвий контур	9,97 / 9,97	7,33 / 7,33
Будівлі, 1:200 000	0 / 0	1 точка поза вихідним контуром	—	—
Рослинність, 1:50 000	51 / 50	1 контур став точкою	4,98 / 4,98	21,18 / 12,04
Рослинність, 1:100 000	22 / 22	немає	10,63 / 10,20	6,08 / 6,87
Рослинність, 1:200 000	4 / 4	немає	19,77 / 19,77	7,71 / 7,71
Осі вулиць (620), 1:25 000 – 1:200 000	620 / 620	немає	2,50; 4,99; 9,99; 19,92 — однакові	—

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента; для 1:25 000 результати обох способів тотожні.

Інакше поводяться оператори, які утворюють нову геометрію або вилучають об’єкти з подальшого опрацювання. Агрегування кварталів за каскаду втрачає вміст (табл. 3.11, рис. 3.8): квартал, що не ввійшов до групи на попередньому рівні, на наступному вже не відновлюється. Для 1:200 000 каскадний набір представляє 333 вихідні квартали замість 483, для 1:1 000 000 — 230 замість 522. Менші додана площа й довжина вулиць усередині контурів за каскаду є наслідком саме цієї втрати, а не кращої якості агрегатів.

Таблиця 3.11 – Агрегування кварталів за прямого та каскадного формування

Масштаб, спосіб	Об’єктів у наборі (з них групових кандидатів)	Представлено вихідних кварталів	Додана площа, км²	Осі вулиць усередині контурів, км
1:100 000, пряме	351 (15)	383	0,022	2,76
1:100 000, каскадне	350 (14)	378	0,020	2,59
1:200 000, пряме	78 (27)	483	0,855	56,96
1:200 000, каскадне	83 (32)	333	0,574	38,30
1:500 000, пряме	6 (6)	518	2,295	136,13
1:500 000, каскадне	16 (16)	298	0,950	59,64
1:1 000 000, пряме	1 (1)	522	2,916	155,73
1:1 000 000, каскадне	4 (4)	230	1,263	70,38

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента; каскад починається з набору 1:50 000, до якого входять квартали з площею не менше 2 500 м². Групові кандидати не прийнято до картографічного представлення через перетини з осями вулиць (пункт 3.2.2); їх ураховано лише для порівняння способів формування.

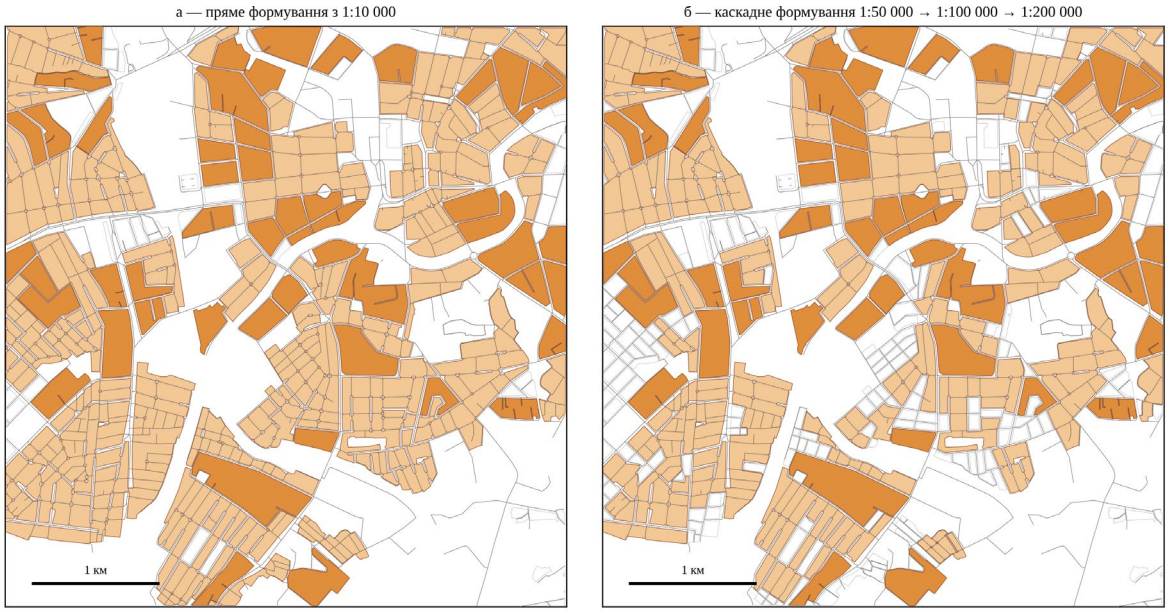


Рисунок 3.8 – Квартали в наборі 1:200 000: а — пряме формування з 1:10 000; б — каскадне формування 1:50 000 → 1:100 000 → 1:200 000

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента. Темні контури — одиничні квартали, світлі — групові контури, сірі — вихідні квартали, не представлені в наборі.

Згладжування також накопичує похибку. Після спрощення застосовано одну ітерацію алгоритму зрізання кутів Чайкіна [91] у реалізації PostGIS [92] (рис. 3.9). За прямого формування середнє зменшення площі контурів рослинності зросло від 4,7 % для 1:25 000 до 16,0 % для 1:200 000, а за

каскадного — до 41,9 %. Для осей вулиць у масштабі 1:200 000 середнє відхилення становило 7,3 м за прямого і 10,8 м за каскадного формування; кількість ліній із відхиленням понад допуск зросла з 47 до 154. Навіть пряме згладжування перевищувало допуск спрощення: для 1:25 000 — у 57 із 58 контурів рослинності. Тому згладжування допустиме лише разом з окремим контролем відхилення.

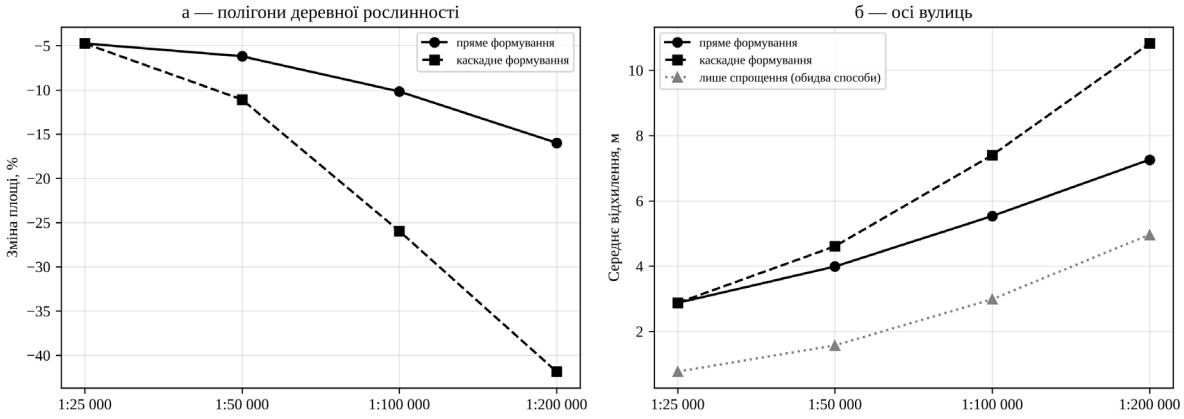


Рисунок 3.9 – Накопичення похибки згладжування за прямого та каскадного формування: а — зміна площі контурів деревної рослинності; б — середнє відхилення осей вулиць

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента; згладжування виконано після спрощення з допуском ε_s.

Отже, перевага прямого формування виявилася для операторів, які створюють нову геометрію або вилучають об’єкти з подальшого опрацювання, — агрегування та згладжування. Для вибіркового спрощення Дугласа – Пекера каскадна послідовність похибок не накопичувала.

3.2.7 Спрощення ліній і контурів: алгоритми Дугласа – Пекера та Вісвалінгама – Вайатта

Алгоритм Дугласа – Пекера [52] обмежує найбільше відхилення лінії, а алгоритм Вісвалінгама – Вайатта [53] послідовно вилучає вершини з найменшою ефективною площею трикутника. Їхні параметри безпосередньо не співвідносяться (підрозділ 2.3). Тому алгоритми порівняно за однакової кількості збережених вершин. Поріг ефективної площі для функції ST_SimplifyVW [93] добирали методом поділу навпіл, доки загальна кількість вершин набору не відрізнялася від результату Дугласа – Пекера більш ніж на 0,2 %.

За однакової кількості вершин алгоритм Вісвалінгама – Вайатта давав у 1,2–1,9 раза більші середні й у 2–9 разів більші найбільші відхилення (табл. 3.12, рис. 3.10). Для осей вулиць у масштабі 1:100 000 найбільше відхилення становило 55,4 м проти 10,0 м, а допуск перевищили 57 із 620 ліній проти жодної. На рисунку 3.10 видно крайній випадок: другий алгоритм повністю вилучив кільцеву розв'язку, тоді як перший зберіг її спрощений контур. Перевагу у збереженні площі він мав лише для кварталів у масштабах 1:100 000 і 1:200 000 та для рослинних контурів у масштабі 1:100 000. Звичайний алгоритм Дугласа – Пекера утворив самоперетини в трьох лініях доріг для 1:100 000; функція ST_SimplifyPreserveTopology [73] їх не допустила.

Таблиця 3.12 – Порівняння алгоритмів спрощення за однакової кількості вершин

Набір, масштаб	**Збережено вершин, %**	**Середнє відхилення, м: ДП / ВВ**	**Найбільше відхилення, м: ДП / ВВ**	**Об'єктів понад допуск: ДП / ВВ**	**Середня зміна площі (довжини), %: ДП / ВВ**
Осі вулиць, 1:50 000	53,5	1,57 / 2,06	4,99 / 15,34	0 / 91	0,10 / 0,25
Осі вулиць, 1:100 000	46,2	2,99 / 3,69	9,99 / 55,44	0 / 57	0,28 / 0,69
Дороги, 1:100 000	45,9	2,30 / 3,10	9,83 / 21,76	0 / 11	2,26 / 6,03
Квартали, 1:100 000	49,8	3,24 / 5,20	9,99 / 88,72	0 / 60	1,60 / 1,22
Квартали, 1:200 000	46,3	6,43 / 7,94	20,00 / 106,55	0 / 54	4,05 / 2,64
Рослинність, 1:50 000	39,5	3,15 / 6,00	11,42 / 25,62	1 / 30	1,99 / 2,93
Рослинність, 1:100 000	31,6	6,71 / 10,82	22,32 / 60,45	2 / 26	6,22 / 4,97

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента; ДП — алгоритм Дугласа – Пекера з допуском ε_s, ВВ — алгоритм Вісвалінгама – Вайатта з порогом, що дає ту саму кількість вершин. Для рослинності показники обчислено для всіх 58 валідних контурів незалежно від відбору, тому найбільші відхилення більші, ніж у табл. 3.10, де враховано лише відібрані для масштабу контури.

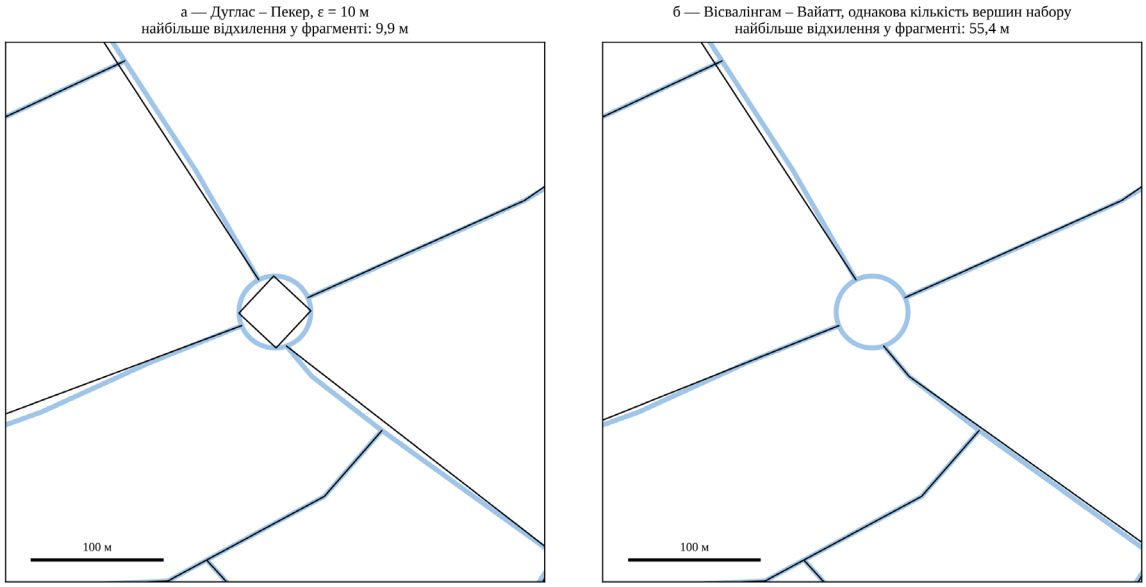


Рисунок 3.10 – Спрощення осей вулиць для масштабу 1:100 000: а — алгоритм Дугласа – Пекера; б — алгоритм Вісвалінгама – Вайатта за однакової кількості вершин набору

Джерело: розраховано за вихідними даними контрольного фрагмента; широкою світлою лінією показано вихідні осі вулиць.

Для мережевих об’єктів і меж, де потрібна гарантована позиційна точність, доцільно застосовувати алгоритм Дугласа – Пекера. Алгоритм Вісвалінгама – Вайатта можна використовувати для площинних контурів кварталів і масивів на дрібних масштабах, але лише з перевіркою найбільшого відхилення.

3.2.8 Збереження зв’язності вуличної мережі під час спрощення

У вихідних даних 620 осей вулиць утворюють 854 пари з’єднаних або перетинних ліній. Спрощення кожної осі окремо навіть із допуском 2,5 м розірвало 181 такий зв’язок і утворило 118 перетинів, яких у вихідних даних не було (табл. 3.13). Для 1:200 000 розривів стало 241, тобто 28 %. Причина — Т-подібні з’єднання: кінець однієї осі лежить на внутрішньому відрізку іншої, а спрощення цей відрізок зсуває.

Для усунення розривів метод доповнено правилом вузлів. Перед спрощенням кожну вісь розбивали в точках дотику та перетину з іншими осями, а частини спрощували окремо: їхні кінцеві точки алгоритм Дугласа – Пекера зберігає. Розривів не виникло на жодному масштабі, нових перетинів

стало на 14–20 % менше, а кількість вершин зросла на 21–42 %. Найбільше відхилення не перевищило допуску.

Таблиця 3.13 – Збереження зв’язків вуличної мережі під час спрощення

Масштаб	Вершин: без вузлів / з вузлами	Розірвано зв’язків із 854: без вузлів / з вузлами	Нові перетини: без вузлів / з вузлами	Найбільше відхилення з вузлами, м
1:25 000	2 287 / 2 777	181 / 0	118 / 102	2,50
1:50 000	1 947 / 2 471	218 / 0	137 / 111	4,99
1:100 000	1 681 / 2 276	221 / 0	145 / 119	9,97
1:200 000	1 517 / 2 160	241 / 0	142 / 114	19,92

Джерело: розраховано за осями вулиць контрольного фрагмента.

Результат підтверджує правило підрозділу 2.3: спрощення має бути підпорядковане вузлам мережі, а не виконуватися для кожної лінії незалежно. Нові перетини, що залишилися, виникають між несуміжними осями й потребують окремого міжоб’єктного контролю.

3.2.9 Узагальнення результатів формування похідних наборів топографічних геопросторових даних

Розподіл 3 408 основних геометричних кандидатів за шістьма масштабами показано в таблиці 3.14; зі зменшенням масштабу їх кількість скорочується з 2 141 до 0. Діагностичну серію VegetationP до таблиці не включено.

Таблиця 3.14 – Розподіл геометричних кандидатів за шістьма масштабами (без діагностичної серії VegetationP)

Масштаб	Полігони (площа)	Roads (клас і довжина)	Watercourse (два критерії)	Основні кандидати
1:25 000	2 131	8	2	2 141
1:50 000	816	6	0	822
1:100 000	382	5	0	387
1:200 000	55	2	0	57
1:500 000	0	1	0	1
1:1 000 000	0	0	0	0
Разом	**3 384**	**22**	**2**	**3 408**

Джерело: складено за даними таблиць 3.3, 3.4 і 3.6–3.9.

Висновки підрозділу мають обмежену область дії. Перевірку виконано на одному аркуші масштабу 1:10 000 зі щільною міською забудовою площею близько 4,5 × 4,6 км. Вибірки водойм (11) і ділянок водотоків (5) малі, тому результати для них ілюстративні. Еталонних карт похідних масштабів для цієї території немає, тож оцінено геометричну й топологічну узгодженість результатів, а не їхню відповідність картографічному оригіналу. Розширення перевірки на кілька суміжних аркушів з різним типом місцевості є наступним етапом роботи.

3.3 Реалізація багатомасштабного картографічного представлення на Національному геопорталі НІГД

Для кожного з шести масштабів сформовано власний контрольний набір геометричних кандидатів. Готували його безпосередньо з даних базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000, використовуючи семантичні критерії шести класів, установлені в розділі 2. Під час експерименту перевірено також зв’язок геометричного представлення з атрибутами та умовним знаком, збереженими в контрольному GeoPackage [94]. Усього в тестовому GeoPackage обліковано 11 316 пар «об’єкт — масштаб». До цієї сукупності входить діагностична серія VegetationP, яку не розглядають як нормативне картографічне зображення поодиноких дерев на дрібних масштабах. Кількість основних геометричних кандидатів подано в таблиці 3.14.

Походження одиничних представлень зіставляли за TOID, групових кандидатів кварталів — через відношення Lin. Саме збереження множини вихідних ідентифікаторів давало змогу аналізувати результати агрегування без втрати зв’язку з базовими контурами. Умовні знаки добирали після перевірки геометричної й семантичної коректності, а не за довільною відповідністю масштабного рівня вебклієнта. Підготовлені результати опубліковано для перевірки засобами стандартних вебінтерфейсів. Вебклієнт слугував для огляду контрольного фрагмента та зіставлення картографічних основ, а

безпосередню перевірку переданого змісту виконано через WMS, WMTS і WFS у підрозділі 3.5.

Рисунок 3.11 узагальнює дію масштабних предикатів на контрольній території. Кількості кандидатів відповідають таблиці 3.14 і характеризують склад похідних представлень на кожному рівні.

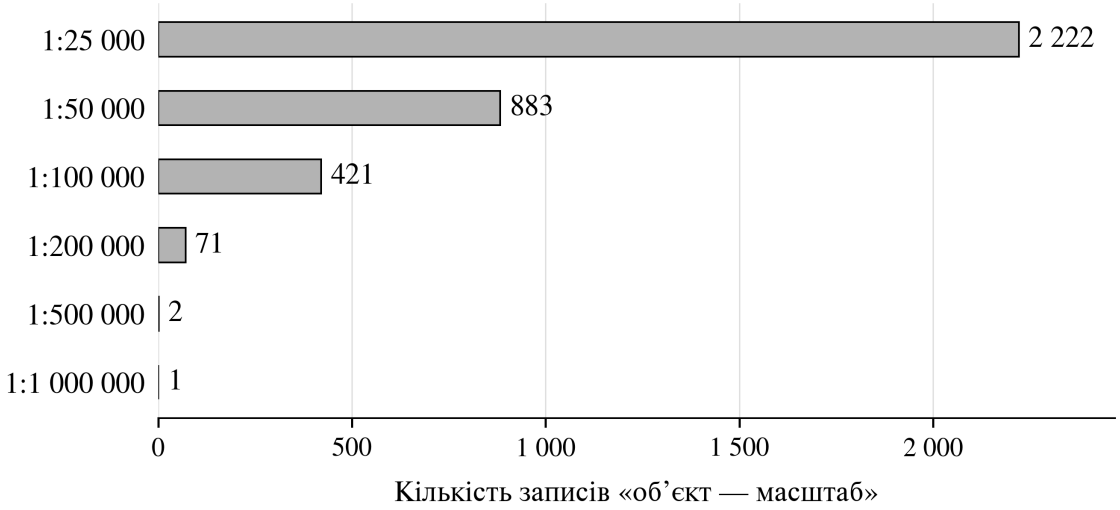


Рисунок 3.11 – Розподіл геометричних кандидатів за масштабами за результатами пооб’єктної апробації

Джерело: побудовано за даними таблиці 3.14.

Наявність кандидата в таблиці 3.14 ще не означає його остаточного картографічного прийняття. Перед публікацією контролювали семантичні, геометричні й топологічні умови та умови застосування умовних знаків моделі класу.

Рисунок 3.12 показує, як змінюється зміст топографічної основи контрольного фрагмента в похідних масштабах. Представлення сформовано функціями відбору пункту 3.1.6 безпосередньо з даних масштабу 1:10 000. Зі зменшенням масштабу скорочується кількість будівель і контурів рослинності, а квартали, менші за поріг площі, вилучаються. Групових

контурів кварталів на рисунку немає: усі вони не пройшли контролю перетинів зі Streets (пункт 3.2.2), тому квартали залишаються окремими контурами.

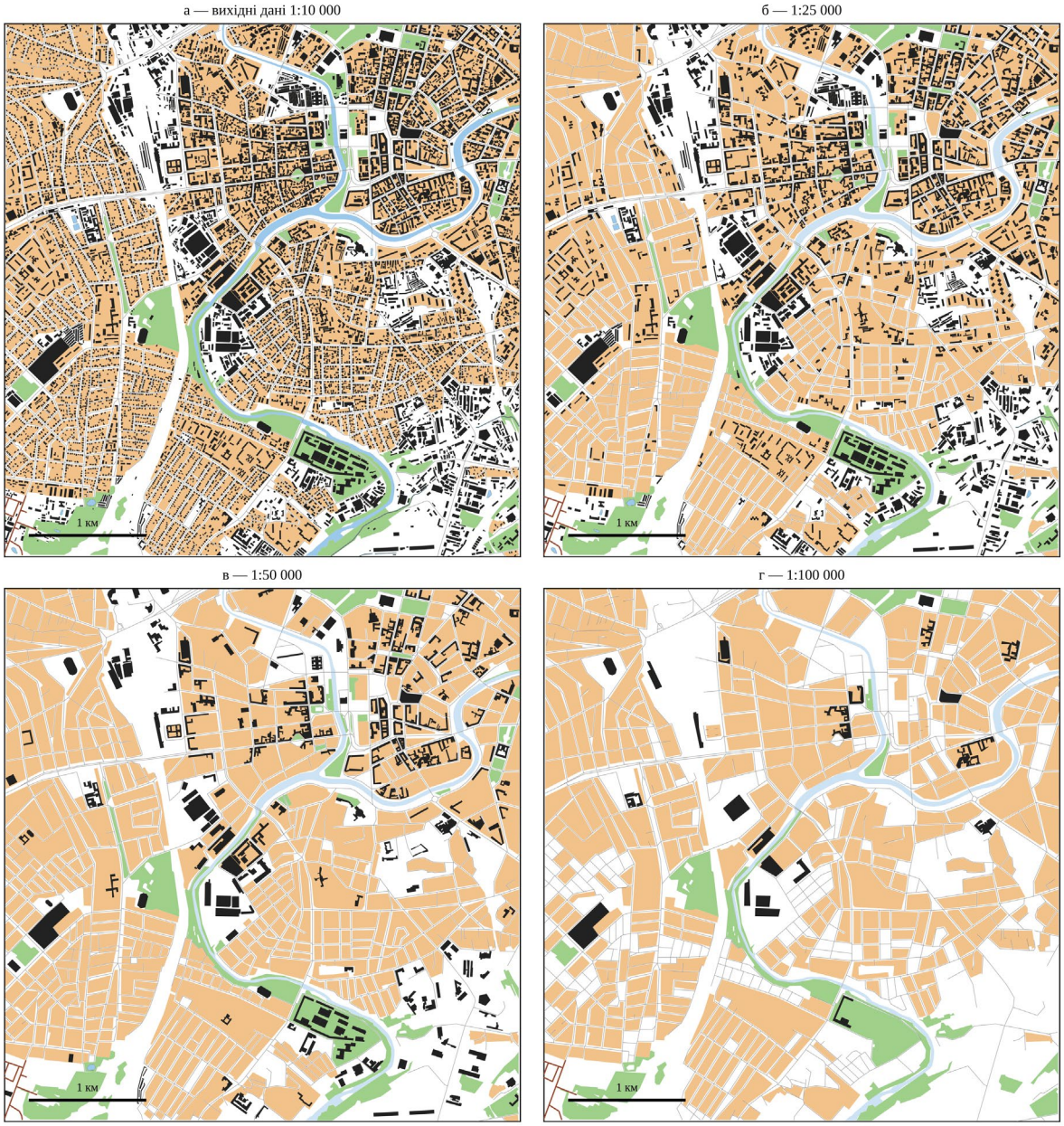


Рисунок 3.12 – Зміна змісту топографічної основи контрольного фрагмента в похідних масштабах: а — вихідні дані 1:10 000; б — 1:25 000; в — 1:50 000; г — 1:100 000

Джерело: розраховано за вихідною File Geodatabase контрольного фрагмента. Фрагменти подано в однаковому розмірі; на картах відповідних масштабів їх ширина становить 45, 18, 9 і 4,5 см. Поверхню річки показано без генералізації як орієнтир.

Детальний вигляд похідного набору масштабу 1:50 000 показано на рисунку 3.13. Збережені будівлі та квартали подано як самостійні контури, а рослинність і водойми — контурами, узгодженими з ними.

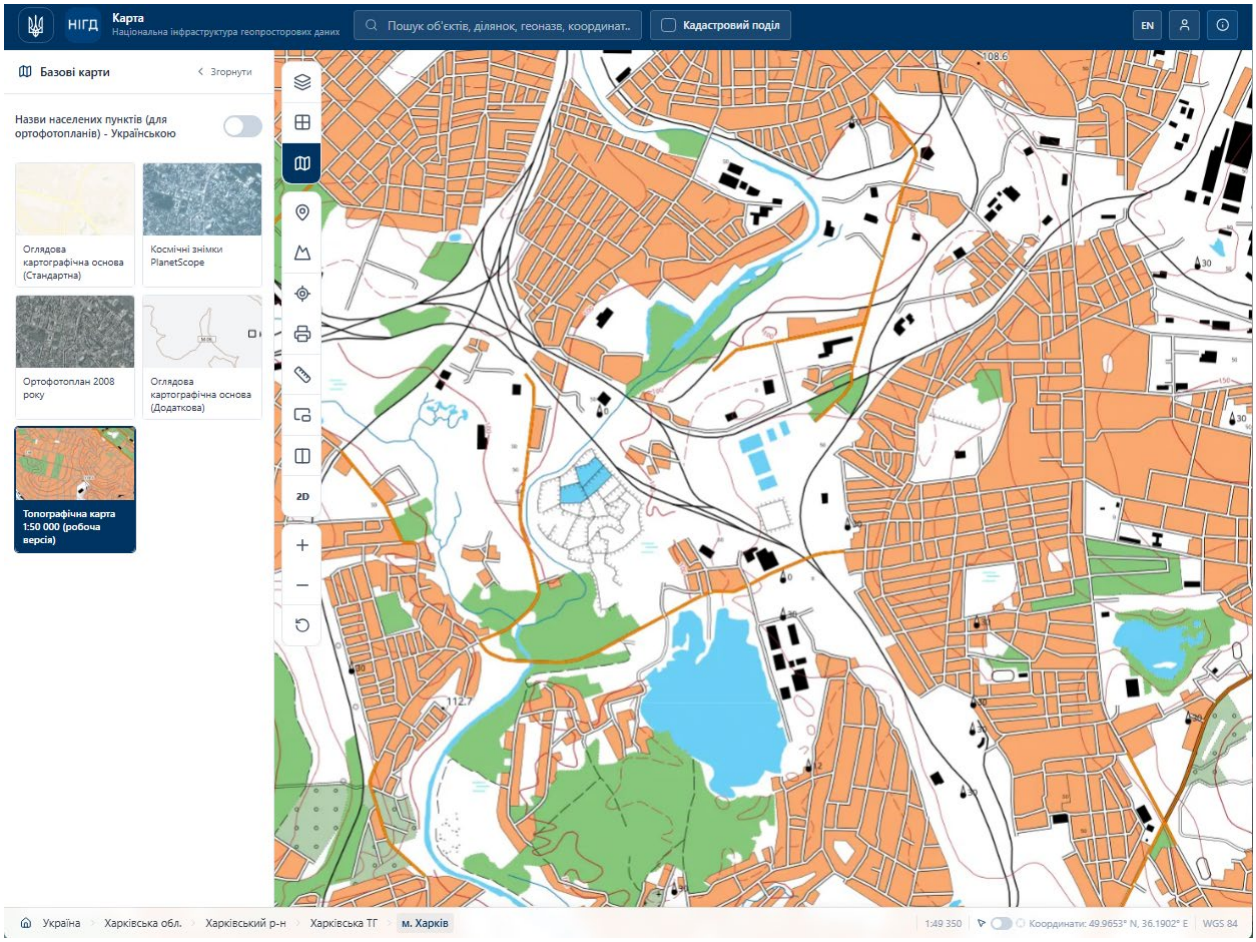


Рисунок 3.13 – Похідний набір масштабу 1:50 000 у вебклієнті Національного геопорталу НІГД

Джерело: знімок екрана вебклієнта Національного геопорталу НІГД, 2026 р.

3.4 Масштабно залежне картографічне оформлення та узгодженість представлень

Остаточне оформлення похідного представлення виконували лише після перевірки його семантики, геометрії та просторового оточення. Така послідовність дає змогу відокремити позитивний результат масштабного відбору від можливості правильно зобразити об’єкт на карті. Контролювали всі шість досліджених класів.

3.4.1 Розмежування масштабного відбору, допустимої геометрії та умовного знака

Масштабний критерій установлював участь об’єкта в похідному наборі, а прикладна модель — його допустиме геометричне представлення. Після цього перевіряли доступність умовного знака, заданого одним з атрибутів Symbol25K, Symbol50K, Symbol100K, Symbol200K, Symbol500K або Symbol1M. Вихідні класи File Geodatabase не завжди містили такі цільові поля, тому в тестуванні їхнє значення визначали за семантичними ознаками, не приписуючи вихідним даним відсутніх атрибутів.

Випадки з непідтвердженими семантичними ознаками залишалися невизначеними до класифікаційної перевірки. Самої валідності полігона, лінії або точки для позитивного рішення недостатньо, і без підтвердженої класифікаційної ознаки позитивне рішення про застосування умовного знака не приймали. Водночас установлений топологічний конфлікт є самостійною підставою відхилення, навіть якщо метричні характеристики задовільні. Результати такого контролю зведено в таблиці 3.15 та додатку Е.

3.4.2 Перевірка семантичних і топологічних передумов оформлення

Показовим результатом стала перевірка агрегування кварталів. Усі 49 геометрично валідних групових кандидатів перетинали осі вулиць у доданій площі, що суперечило встановленому для класу правилу збереження вуличного простору. Їх не прийнято до картографічного представлення. Водночас зв’язки Lin зберегли інформацію про склад кожної групи, а топологічна перевірка встановила ділянки порушення вуличного простору.

Для транспортної та гідрографічної мереж контролювали вузли й безперервність лінійних зв’язків, для водойм, забудови і рослинності — дозволену розмірність, розташування та суміжність. Для всіх шести класів зіставлено метричний результат із фактичними атрибутами й просторовими відношеннями. Таблиця 3.15 показує підтверджені передумови оформлення,

підстави рішень і випадки, що потребують класифікаційного зіставлення або додаткового топологічного контролю.

Таблиця 3.15 – Результати контролю передумов масштабного картографічного оформлення

Клас об’єктів	Результат перевірки	Урахування під час оформлення
Buildings (0501)	BuildingsPOL: 9 176 полігонів, 9 175 валідних; typeBuildings = 2 у 9 115 записів.	Придатність за площею аналізується разом із семантикою. Відсутнє BuildingUse не підмінюється полем functionalPurpose без зіставлення доменів.
Blocks (0402)	Для 49 дослідних груп збережено 1 519 зв’язків походження; під час укрупнення зафіксовано перетини зі Streets.	Контроль не допускає перекриття вуличного простору та використовує TOID/Lin для відстеження походження агрегату.
Roads (0601)	22 основні записи typeRoad = 3 пройшли перевірку довжини й класу; ще 192 результати стосуються лише діагностики довжини.	Для стилізації враховуються typeRoad, функціональна значущість і цілісність мережі; однієї перевірки довжини недостатньо.
StandingWater (0301)	На рівні 1:25 000 умову відбору за площею виконали 8 із 11 валідних полігонів.	Вибір точкового або полігонального знака пов’язаний із семантичною значущістю та зв’язками з іншими водними об’єктами.
Watercourse (0303)	У 3 з 5 осьових записів width = −32768; у всіх п’яти mainWatercourse = −32768.	Службове значення обробляється як невизначене, а не як метрична ширина чи логічна ознака.
VegetationPOL (0801)	Із 58 валідних полігонів 56 пройшли поріг площі для 1:25 000.	Геометричний результат відокремлено від вибору підтипу рослинності та умовного знака.
VegetationP / VegetationL (0801)	2 482 точки мають typeVegetation = 22; чотири лінії — код 17.	Встановлено розбіжність із цільовим переліком значень; для нормативного знака потрібне семантичне зіставлення.

Джерело: складено за результатами контролю картографічного оформлення (підрозділ 3.4).

3.4.3 Параметричне відтворення та узгодження масштабних представлень

Після позитивного рішення виконували графічне оформлення: контур та заливку полігона, параметри лінійного знака або точкове позначення у

випадках, дозволених моделлю класу. Рівні ZOOM і TileMatrix регулювали вебвідтворення, але не підмінювали умови включення топографічного об’єкта до заданого похідного масштабу.

Після підтвердження геометричної та семантичної сумісності знака застосовують його графічні параметри [79]. Для полігона це контур і заливка, для лінії — товщина, штрих, колір і порядок накладання, для точки — розміри та прив’язка знака. Розташування підписів задають самостійно. Параметричне оформлення працює з уже встановленим геометричним представленням і зберігає його координати.

Умовні знаки, застосовані до похідного набору масштабу 1:50 000, показано на рисунку 3.14.

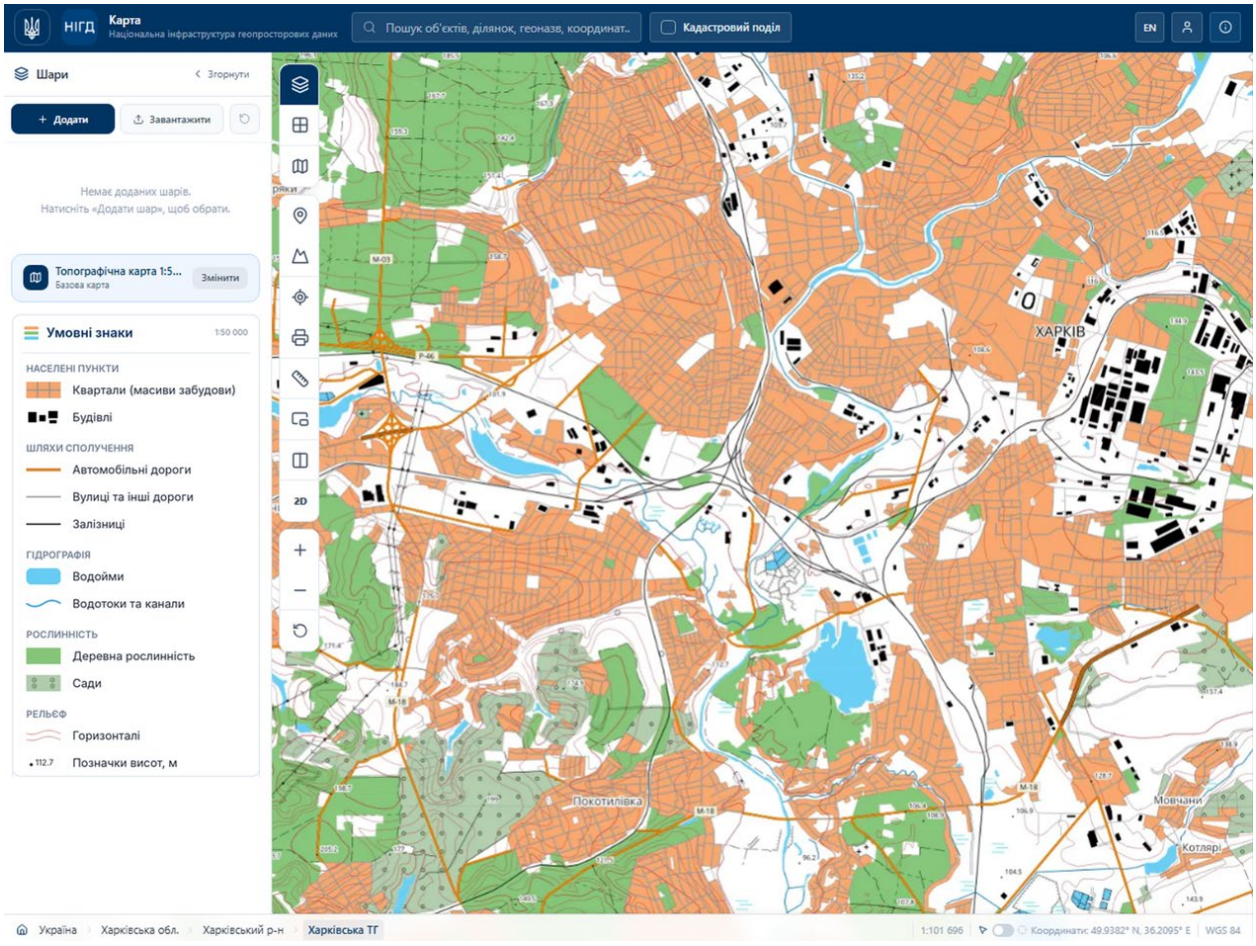


Рисунок 3.14 – Умовні знаки похідного набору масштабу 1:50 000 у вебклієнті Національного геопорталу НІГД

Джерело: знімок екрана вебклієнта Національного геопорталу НІГД з панеллю умовних знаків, складеною за стилями похідного набору, 2026 р.

3.4.4 Результати контролю графічних конфліктів та узгодженості

Причини невизначеності та відхилення об’єктів фіксували для кожного випадку. Для кварталів це був перетин з вулицями, для частини семантичних станів — невідповідність атрибута класифікатору, а для окремих геометричних кандидатів — метричні обмеження після спрощення. Таке розмежування дало змогу не змішувати помилки підготовки вихідної геометрії з порушеннями умовного знака або масштабної семантики. Поетапний контроль пов’язав причини семантичних і топологічних рішень із підсумковим рішенням про придатність; конкретні порушення та невизначеності подано в таблицях 3.15 і Е.1.

3.5 Реалізація та перевірка картографічних сервісів WMS, WMTS і WFS

Апробація сервісів була завершальним етапом перевірки похідних наборів. В її межах зіставлено растрові зображення, тайлові відповіді й векторні об’єктні записи для контрольних масштабів. Результати отримано на Національному геопорталі НІГД.

3.5.1 Підготовка даних і організація перевірки сервісів

Вихідними матеріалами стали підготовлені масштабні вибірки, атрибути об’єктів і картографічні стилі. Для перевірки використано WMS GetCapabilities та GetMap, WMTS GetCapabilities і GetTile, WFS GetCapabilities, DescribeFeatureType, GetFeature і запити resultType=hits. Контроль включав запити для всіх шести похідних масштабів, порівняння PNG і перевірку кількісної відповідності векторних відповідей записам, збереженим у GeoPackage [94]. Параметри просторових вікон та коди відповідей подано в додатку Е.

3.5.2 Перевірка графічних відповідей WMS

Шість оглядових PNG GetMap мали розмір 600 × 620 пікселів. У кожному запиті контролювали BBOX, систему координат, ім’я шару, стиль і параметри кадру. Додатковий запит GetFeatureInfo повернув атрибути контрольного об’єкта, зокрема TOID. Склад операцій і відповідей перевіряли

з урахуванням технічного керівництва INSPIRE щодо сервісів перегляду [87]. Схематичне зображення відповідей GetMap для похідних наборів масштабів 1:25 000 і 1:100 000 показано на рисунку 3.15.

У контрольному запиті GetFeatureInfo підтверджено доступність атрибутів ідентифікації об’єкта. Результати WMS зіставлено із зображеннями WMTS в однакових просторових вікнах; відповіді збережено в матеріалах апробації сервісів додатка Е.



Рисунок 3.15 – Схематичне зображення відповідей WMS GetMap для контрольного фрагмента: а — похідний набір масштабу 1:25 000; б — похідний набір масштабу 1:100 000

Джерело: ілюстративна схема, розроблено автором; фактичні відповіді GetMap збережено в матеріалах додатка Е.

3.5.3 Перевірка тайлової моделі WMTS

Розмір ділянки місцевості, яку охоплює один тайл, залежить від роздільної здатності похідного набору:

$$\begin{gathered} r_s = (0{,}00028 \text{ м/піксель})\, M_s; \\ B_s = (256 \text{ пікселів})\, r_s \end{gathered} \tag{3.3}$$

де r_s — роздільна здатність для знаменника масштабу M_s у метрах на піксель; B_s — розмір ділянки тайла по одній координатній осі в метрах.

Для шести контрольних адрес GetTile отримано відповідні PNG і виконано їх попарне зіставлення з результатами GetMap за однакових

просторових вікон. Усі шість пар збіглися побайтово. Це підтверджує узгодженість двох перевірених способів картографічного надання; тотожності технічного рівня ZOOM номінальному масштабу набору цей результат не доводить. Побайтово зіставляли спеціально сформовані зображення WMS GetMap розміром 256 × 256 пікселів із BBOX відповідного тайла WMTS GetTile. Оглядові відповіді WMS GetMap 600 × 620 пікселів використовували лише для перевірки картографічного вмісту.

Рівні WMTS для шести похідних наборів задано за таблицею 2.29. Вони визначають адресацію тайлів, а склад об’єктів на кожному рівні визначає похідний набір свого масштабу. Для ілюстрації адресації рівнів ZOOM на рисунку 3.16 показано тайли ортофотоплану Національного геопорталу на трьох рівнях масштабування з дослідження [15]; вони не є результатами перевірки похідних наборів.



Рисунок 3.16 – Тайлове представлення ортофотоплану через WMTS Національного геопорталу НІГД: а — рівень ZOOM 12; б — рівень ZOOM 15; в — рівень ZOOM 17
Джерело: [15].

3.5.4 Пооб’єктна перевірка WFS та зіставлення кількості записів

Векторні відповіді перевірено за геометріями, структурою, ідентифікаторами й кількістю. За шістьма масштабами отримано 4 704, 3 327, 2 188, 837, 199 і 61 запис відповідно. Їхня сума 11 316 збігається з обліком GeoPackage. Збіг підтверджує повноту передавання тестового набору сервісом, але не прийнятність кожного запису: прийнятими можуть бути лише основні кандидати, що пройшли контроль (табл. 3.14, пункт 3.6).

У вибірці 1:100 000 із 2 188 записів 421 — це 387 основних геометричних кандидатів (табл. 3.14) і 34 діагностичні результати для доріг, а 1 767 — діагностична серія VegetationP. Діагностичні точки не ототожнювалися з картографічними знаками поодиноких дерев на цьому масштабі. Для одиничних станів простежуваність перевіряли за TOID, а для групових кандидатів кварталів — за Lin.

Таблиця 3.14 деталізує склад основних геометричних кандидатів. Різницю між цією кількістю та повною кількістю WFS пояснюють 192 діагностичні результати Roads інших категорій і 7 716 самостійно облікованих діагностичних записів VegetationP; ці записи не є прийнятими картографічними позначеннями.

3.5.5 Результати перевірки сервісів та інтеграції

Під час функціональних випробувань виконано 32 перевірки, і всі вони пройшли успішно. Перевірки охоплювали описи сервісів, картографічні відповіді, об’єктні записи, тайлове відтворення, інформацію про об’єкти й опрацювання некоректних параметрів (табл. 3.16).

Відповідність картографічних зображень, тайлів та векторного складу підтверджено для зафіксованих тестових параметрів. Деталізацію запитів, HTTP-відповідей і контрольних матеріалів подано в додатку Е. Ці функціональні сценарії не замінюють формального тестування відповідності специфікаціям OGC.

Таблиця 3.16 – Результати функціональних випробувань WMS, WMTS і WFS

Група перевірок	Виконано	Пройдено
GetCapabilities (WMS, WMTS, WFS)	3	3
DescribeFeatureType (WFS)	1	1
GetMap для шести масштабних вибірок	6	6
WFS: кількості та об’єктні вибірки GeoJSON	12	12
Зіставлення відповідей GetMap і GetTile	6	6
GetFeatureInfo (WMS)	1	1
Опрацювання некоректних параметрів запиту	3	3
Разом	**32**	**32**

Джерело: складено за результатами функціональних випробувань сервісів.

3.6 Підсумкова експериментальна перевірка та використання результатів дослідження

Експериментальна перевірка на Національному геопорталі НІГД поєднала формування похідних представлень, контроль атрибутів і геометрії, картографічне оформлення та надання через сервіси. Результати підрозділів 3.1–3.5 дають змогу оцінити взаємодію цих складових у завершеному технологічному процесі.

3.6.1 Організація та обсяг експериментальної перевірки

Експериментальна перевірка охопила шість класів контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000: Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation). Паспорт класів подано в пунктах 3.1.2–3.1.3. Кожен похідний масштаб формували безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 за послідовністю «предикат — геометричне представлення — оператор — контроль» із підрозділів 2.2–2.5. Полігони перевіряли за площею, дороги (Roads, код 0601) — за довжиною та класифікаційним типом, ділянки водотоків — за довжиною й шириною. Для кварталів додатково контролювали вуличний простір і походження агрегатів.

Сформовані результати обліковували за парами «об’єкт — масштаб» із розділенням основних кандидатів і діагностичних VegetationP. Розподіл основних геометричних кандидатів подає таблиця 3.14, а повні кількості сформованих станів — у пункті Е.3.

3.6.2 Результати експериментальної перевірки методів і моделей

На прикладі кварталів перевірено збереження множинного походження та захист вуличного простору: усі 49 дослідних груп-кандидатів відхилено

через перетини з вулицями, а зв’язки Lin зберегли їхній склад (пункт 3.2.2, пункт Д.2).

Семантичні перевірки виявили допустимі коди, розбіжності доменів і службову невизначеність. Зіставлення з правилами прикладних моделей (підрозділ 2.6) установило передумови символізації будівель, ділянок водотоків і деревної рослинності. Механічне проріджування VegetationP використано лише для діагностики умов щодо відстаней між точками, а не як нормативний спосіб відбору поодиноких дерев.

Контроль семантичних, геометричних і топологічних умов та умов застосування умовних знаків виконували за тризначною функцією $Q_s(o)$, запровадженою у пункті 2.5.2. Таблиці 3.15 і Е.1 показують, як конкретна причина спричиняє відхилення кандидата або залишає результат невизначеним до уточнення вихідних ознак.

3.6.3 Узагальнені результати перевірки геопортальних сервісів

Функціональність WMS, WMTS і WFS перевірено за їхніми інтерфейсами [32; 34; 35]. Усі 32 функціональні перевірки пройшли успішно (пункт 3.5.5; таблиці Е.6).

Шість пар PNG GetMap/GetTile збіглися побайтово; відповіді WFS збіглися з вибіркою GeoPackage за геометріями, атрибутами й кількістю записів (пункт Е.3; табл. 3.14).

3.6.4 Узагальнення результатів комплексної перевірки

Структурний зв’язок вихідних даних, масштабних представлень, контролю та надання через сервіси за результатами апробації показано на рисунку 3.17, а узагальнені результати апробації — у таблиці 3.17.



Рисунок 3.17 – Структурний зв’язок вихідних даних, масштабних представлень, контролю та надання через сервіси за результатами апробації

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.17 – Узагальнені результати апробації методів і моделей геовізуалізації

Напрям апробації	Проведені випробування	Отриманий результат
Похідні масштабні представлення	Формування представлень для шести масштабів за правилами відповідних класів.	11 316 записів «об'єкт — масштаб»; із 3 600 результатів метричних перевірок 3 408 задовольнили також класифікаційний критерій.
Масштабний відбір	Умови включення за площею, довжиною та двома критеріями.	3 384 полігональні кандидати, 22 кандидати Roads із typeRoad = 3 та два результати Watercourse; 192 окремі перевірки довжини доріг інших категорій.
Агрегування та походження	Об'єднання Blocks зі збереженням зв'язків із вихідними топографічними об'єктами.	49 дослідних груп; 1 519 зв'язків Lin. Усі групи виявили конфлікт зі Streets.
Семантика і топологія	Перевірка атрибутів, кодових доменів, геометричної коректності й міжкласових просторових відношень.	Встановлено правила контролю масштабної придатності та узгодженості похідних представлень.
Геоінформаційні сервіси	Перевірки GetMap, GetTile, GetFeature; дослідження WMS у QGIS і тайлового представлення WMTS.	32 з 32 перевірок пройдено успішно (табл. 3.16).
Інтеграція на Національному геопорталі	Перевірка взаємодії компонентів, картографічної публікації та стандартизованих сервісних інтерфейсів.	Компоненти взаємодіяли без помилок; пройдено 32 з 32 функціональних перевірок.

Джерело: складено за результатами підрозділів 3.1–3.5.

3.6.5 Використання результатів у проєкті документа

Розроблені й експериментально перевірені моделі шести класів топографічних об'єктів використано під час підготовки проєкту «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000». Їх математичне обґрунтування подано в розділі 2, а результати експериментальної перевірки — у підрозділах 3.1–3.5. Це формує єдину науково-методичну основу для узгодженого використання топографічних геопросторових даних держателями та виробниками в межах НІГД.

Спільну роботу над проєктом виконали Ю. О. Карпінський, Р. О. Зіненко, Н. Ю. Лазоренко та Д. О. Кінь. Розроблення каталогів інших класів, їх узгодження в тематичних пакетах, редакційна систематизація і формування цілісного документа виконувалися в межах цього опрацювання.

Проєкт охоплює 79 типів топографічних об’єктів, згрупованих в 11 тематичних пакетів, і окремий пакет загальних властивостей з абстрактним класом TopographicObject. Для кожного типу в ньому визначено критерії відбору для шести масштабів, прикладну схему, атрибути, правила цифрового опису й топологічні обмеження. Порогові значення критеріїв відбору шести досліджених класів у проєкті збігаються з обґрунтованими в розділі 2 і перевіреними в підрозділах 3.1–3.5. Таблиця 7.3 проєкту, крім формалізованих у дисертації відбору, спрощення, згладжування, агрегування та згортання (колапсу), містить також збільшення, перебільшення, фракталізацію, випрямлення й переміщення об’єктів. Ці оператори в роботі не формалізовано, тому їх математичне обґрунтування й експериментальна перевірка становлять напрям подальших досліджень.

У дисертації розроблено каталоги класів та прикладні моделі для класів Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation). Запропоновані методи експериментально перевірено на контрольному фрагменті базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Повний проєкт подано в додатку А.

3.7 Висновки до розділу 3

1. Методи багатомасштабної генералізації реалізовано та перевірено на Національному геопорталі НІГД з використанням контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Апробація підтвердила, що формалізовані просторові, семантичні та функціональні критерії дають змогу обґрунтовано визначати участь топографічних об’єктів у кожному з шести похідних масштабів.

2. На Національному геопорталі НІГД перевірено прикладні моделі шести досліджених класів. Їхні власні атрибути, довідники та допустимі геометричні представлення виявилися придатними для відтворюваного застосування масштабних умов і пояснення результатів відбору. UML-фрагменти та повні каталожні таблиці підрозділу 2.6 становлять обґрунтування цього висновку. Перевірка не поширюється автоматично на інші класи, опрацьовані співавторами.

3. Підтверджено необхідність незалежного контролю після генералізації. Експериментальні перевірки показали, що геометрично коректний результат може не відповідати семантичним і топологічним обмеженням. Своєчасне виявлення та відхилення таких кандидатів засвідчило працездатність запропонованого способу захисту просторової узгодженості та стало підставою для вилучення невідповідних кандидатів із набору прийнятих представлень.

4. Підготовлені масштабні дані узгоджено з картографічним відображенням і стандартизованими способами доступу на Національному геопорталі НІГД. Апробація сервісів підтвердила можливість використання результатів у геоінформаційному середовищі. Водночас збережено принципове розмежування між відповідністю мережевої відповіді технічним умовам і семантичною коректністю топографічного представлення.

5. Прикладні схеми й тризначні предикати відбору реалізовано засобами об’єктно-реляційної СКБД PostgreSQL/PostGIS; контроль доменів засобами СКБД виявив у джерелі коди будівель, яких немає в цільовому довіднику. Перевага прямого формування над каскадним проявилася для агрегування та згладжування: каскад втратив до 56 % кварталів, які зберігає пряме формування, і збільшив зменшення площі рослинних контурів з 16 до 42 %. Для вибіркового спрощення алгоритмом Дугласа – Пекера каскад похибок не накопичував. Спрощення з урахуванням вузлів мережі зберегло всі зв’язки вуличної мережі, тоді як незалежне спрощення ліній розривало 21–28 % з них;

102–119 нових перетинів між несуміжними осями потребують окремого міжоб’єктного контролю.

6. Експериментальна перевірка пов’язала математичні предикати, шість прикладних моделей і вдосконалену послідовність генералізації з одержаними геопросторовими результатами. Практичне використання має дві форми: експериментально перевірене технологічне рішення Національного геопорталу НІГД та включення результатів дослідження до проєкту документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000». Отже, розв’язано п’яте завдання дослідження в межах контрольного фрагмента. Основні положення розділу висвітлено у працях здобувача [4; 13; 15; 18].

ВИСНОВКИ

У дисертації розв’язано науково-прикладне завдання формування узгоджених похідних масштабних представлень топографічних геопросторових даних масштабного ряду 1:25 000 – 1:1 000 000 безпосередньо з базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 для геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД. Наукові результати обґрунтовано математично, формалізовано у прикладних моделях шести класів об’єктів та перевірено експериментально.

1. Узагальнено сучасні методи багатомасштабної геовізуалізації, картографічної генералізації та організації баз геопросторових даних множинного представлення. Показано, що традиційна картографічна генералізація з автономним або каскадним створенням масштабів зумовлює просторову невідповідність, дублювання оновлення та семантичні суперечності. Потрібен перехід до геоінформаційної генералізації з єдиного джерела. Установлено також, що стандартизовані сервіси WMS, WMTS і WFS надають геопросторову інформацію встановленими способами, але не визначають змісту масштабного відбору й не гарантують збереження просторових відношень між об’єктами. Це обґрунтувало необхідність єдиної

формальної послідовності відбору, геометричних перетворень і контролю картографічної придатності.

2. Розроблено математичну модель генералізації об’єктів різних масштабів із використанням просторових предикатів, критерії відбору в яких враховують просторові характеристики, семантичні ознаки, функціональне призначення та статус об’єктів. На відміну від відбору лише за розміром або довжиною геометрії, рішення про включення конкретного об’єкта визначається сукупністю встановлених для його класу умов. Модель формалізує відбір і трансформацію просторових властивостей під час зміни масштабу, робить причини включення або відхилення об’єкта перевірюваними і створює спільну основу для застосування масштабних правил.

3. Розроблено каталоги класів об’єктів та уніфіковані моделі у формі прикладних схем для класів Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation). У структурах зазначених класів інтегровано всі шість похідних масштабних рівнів через системні атрибути, довідники, критерії відбору, допустимі геометрії та топологічні обмеження. Пооб’єктна організація дає змогу автоматизовано формувати похідні представлення без створення незалежних схем опису одного класу для кожного масштабу. Її можливість підтверджено розробленими UML-схемами та результатами перевірки шести класів.

4. Удосконалено методи формування похідних масштабних представлень, у яких послідовно відокремлено рішення про включення об’єкта, визначення допустимої геометрії та роздільної здатності, застосування операторів генералізації та контроль результату. Кожний цільовий набір формується з актуальних даних базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 без обов’язкового використання проміжного генералізованого масштабу. Це запобігає накопиченню похибок

каскадної генералізації для операторів, які утворюють нову геометрію або вилучають об’єкти з подальшого опрацювання: за результатами експериментальної перевірки каскадне агрегування втратило до 56 % кварталів, які зберігає пряме формування, а каскадне згладжування збільшило зменшення площі рослинних контурів з 16 до 42 %; для вибіркового спрощення алгоритмом Дугласа – Пекера каскад похибок не накопичував. Підпорядкування спрощення вузлам мережі усунуло розриви вуличної мережі, яких за незалежного спрощення ліній виникало 21–28 %. Незалежна перевірка геометричних, семантичних і топологічних умов запобігає прийняттю змістовно непридатних геометричних кандидатів, що становить основу просторової та семантичної узгодженості картографічних представлень усього масштабного ряду.

5. Експериментально перевірено математичну модель, прикладні моделі шести класів і послідовність формування похідних масштабних представлень на Національному геопорталі НІГД. Використано контрольний фрагмент базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Перевірки підтвердили можливість відтворюваного масштабного відбору, збереження походження об’єктів, виявлення геометрично коректних, але топологічно неприйнятних кандидатів, а також надання результатів через WMS, WMTS і WFS. Реалізація засобами PostgreSQL/PostGIS підтвердила придатність прикладних схем і предикатів відбору для об’єктно-реляційної СКБД. Позитивний результат полягає у працездатності методів формування та контролю, а не в безумовному прийнятті всіх проміжних геометрій. Результати одержано для фрагмента зі щільною міською забудовою; вибірки водойм і водотоків малі, а для масштабу 1:1 000 000 на цьому фрагменті не утворено жодного основного кандидата. Тому перевірку на кількох аркушах з різним типом місцевості передбачено як подальший етап досліджень.

Одержані наукові результати використано під час розроблення проєкту нормативно-технічного документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000,

1:500 000, 1:1 000 000». До проєкту ввійшли розроблені в дисертації каталоги й прикладні моделі шести зазначених класів. Дисертація формує методичну основу для узгодженого створення та оновлення похідних наборів топографічних геопросторових даних і їх геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД, а також для їх використання держателями та виробниками геопросторових даних у середовищі НІГД.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX. *База даних «Законодавство України»* / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text (дата звернення: 08.09.2026).

2. Технічний проєкт створення Національного геопорталу Національної інфраструктури геопросторових даних. ДП «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії». Київ, 2023. Неопублікований технічний документ.

3. Dumont M., Touya G., Duchêne C. Designing Multi-Scale Maps: Lessons Learned from Existing Practices. *International Journal of Cartography*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 121–151. DOI: 10.1080/23729333.2020.1717832.

4. Зіненко Р. О. Методи та моделі геовізуалізації генералізованих геопросторових даних на Національному геопорталі. *Містобудування та територіальне планування*. 2026. Вип. 93. С. 666–677. DOI: 10.32347/2076-815x.2026.93.666-677.

5. «Специфікація для наборів геопросторових даних топографічної карти масштабу 1:10 000», v.1.2_22_08_2024. Держгеокадастр. URL: https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2025/01/td_10k_specification.pdf (дата звернення: 08.09.2026).

6. Stoter J., Visser T., van Oosterom P., Quak W., Bakker N. A semantic-rich multi-scale information model for topography. *International Journal of Geographical Information Science*. 2011. Vol. 25, No. 5. P. 739–763. DOI: 10.1080/13658816.2010.490218.

7. Mackaness W. A., Ruas A., Sarjakoski L. T. (eds.). Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications. Amsterdam : Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-045374-3. DOI: 10.1016/B978-0-08-045374-3.X5000-5.

8. Stoter J., Post M., van Altena V., Nijhuis R., Bruns B. Fully automated generalization of a 1:50k map from 1:10k data. *Cartography and Geographic Information Science*. 2014. Vol. 41, No. 1. P. 1–13. DOI: 10.1080/15230406.2013.824637.

9. ISO 19109:2025. Geographic information — General feature model and rules for application schema. 3rd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. URL: https://www.iso.org/standard/84700.html (дата звернення: 15.10.2026).

10. ISO 19110:2016. Geographic information — Methodology for feature cataloguing. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. URL: https://www.iso.org/standard/57303.html (дата звернення: 15.10.2026).

11. ДСТУ ISO 19110:2017. Географічна інформація. Методологія каталогізації об’єктів (ISO 19110:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

12. ДСТУ ISO 19131:2019. Географічна інформація. Специфікація геопросторового продукту (ISO 19131:2007; Amd 1:2011, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

13. Карпінський Ю. О., Зіненко Р. О., Лазоренко Н. Ю., Кінь Д. О. Розроблення специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000–1:1 000 000. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2026. Вип. 104. С. 5–16. DOI: 10.23939/istcgcap2026.104.005.

14. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Матеріали XXVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2025»* (Львів–Брюховичі, 9–11 квітня 2025 р.). Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 63–66.

15. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2025. Вип. 13. С. 514–524. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.514-524.

16. Зіненко Р. О. Використання веб сервісу візуалізації WMS в Національному геопорталі НІГД. *International scientific-practical conference "Topical issues of science, education and technology: theory and practice"* : conference proceedings (Aarhus, Denmark, April 18, 2025). Aarhus : Scholarly Publisher ICSSH, 2025. С. 41–43.

17. Kin D., Zinenko R., Lazorenko N., Karpinskyi Yu. The Application of Rigorous Numerical Methods for Analyzing Heterogeneous Geospatial Data. *29th AGILE Conference on Geographic Information Science — Poster Track* (Tartu, Estonia, June 16–19, 2026). Conference paper. Version v1. Zenodo, 14.05.2026. DOI: 10.5281/zenodo.20181757.

18. Зіненко Р. О. Аналіз та оцінювання використання веб-сервісу візуалізації WMS у Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2026. Вип. 16. С. 431–441. DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.431-441.

19. Зіненко Р. О. Стан сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації геопросторових даних в Україні та тенденції їх розвитку. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2026. № 2. С. 32–43. DOI: 10.31548/zemleustriy2026.02.03.

20. Лященко А. А., Черін А. Г. Архітектура сучасних ГІС на основі баз геопросторових даних. Вісник геодезії та картографії. 2011. № 5 (74). С. 45–50. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2011_5_11.

21. Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних : постанова Кабінету Міністрів України від 26.05.2021 № 532. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-%D0%BF (дата звернення: 08.09.2026).

22. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text (дата звернення: 27.10.2026).

23. Карпінський Ю. О., Лященко А. А., Лазоренко Н. Ю., Кінь Д. О. Основи створення інтероперабельних геопросторових даних. Київ : КНУБА, 2023. 302 с. ISBN 978-966-627-248-8. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/14205 (дата звернення: 28.08.2026).

24. MacEachren A. M., Kraak M.-J. Research Challenges in Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*. 2001. Vol. 28, No. 1. P. 3–12. DOI: 10.1559/152304001782173970.

25. Roth R. E. Interactive maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*. 2013. No. 6. P. 59–115. DOI: 10.5311/JOSIS.2013.6.105.

26. Про затвердження технічних вимог до геопросторових даних, метаданих і геоінформаційних сервісів національної інфраструктури геопросторових даних : наказ Мінагрополітики від 10.11.2021 № 347, зареєстрований у Мін'юсті 12.01.2022 за № 21/37357. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0021-22#Text (дата звернення: 08.09.2026).

27. ISO 19115-1:2014. Geographic information — Metadata — Part 1: Fundamentals. 1st ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2014. URL: https://www.iso.org/standard/53798.html (дата звернення: 17.10.2026).

28. Лященко А., Карпінський Ю., Гаврилюк Є., Черін А. Методи та засоби забезпечення інтероперабельності компонентів національної інфраструктури геопросторових даних. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. № 77. С. 309–319. DOI: 10.32347/2076-815x.2021.77.309-319.

29. ISO 19157-1:2023. Geographic information — Data quality — Part 1: General requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. URL: https://www.iso.org/standard/78900.html (дата звернення: 16.10.2026).

30. ISO 19107:2019. Geographic information — Spatial schema. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2019. URL: https://www.iso.org/standard/66175.html (дата звернення: 16.10.2026).

31. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *EUR-Lex*. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj (дата звернення: 08.10.2026).

32. Open Geospatial Consortium. OpenGIS Web Map Server Implementation Specification. Version 1.3.0. OGC 06-042, 2006. URL: https://docs.ogc.org/is/06-042/06-042.pdf (дата звернення: 17.10.2026).

33. ISO 19111:2019. Geographic information — Referencing by coordinates. 3rd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2019.

34. Open Geospatial Consortium. OpenGIS Web Map Tile Service Implementation Standard. Version 1.0.0. OGC 07-057r7, 2010. URL: https://docs.ogc.org/is/07-057r7/07-057r7.pdf (дата звернення: 17.10.2026).

35. Open Geospatial Consortium. OGC Web Feature Service 2.0 Interface Standard — With Corrigendum. Version 2.0.2. OGC 09-025r2, 2014. URL: https://docs.ogc.org/is/09-025r2/09-025r2.html (дата звернення: 17.10.2026).

36. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures : Doctoral dissertation. University of California, Irvine, 2000. URL: https://ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm (дата звернення: 08.10.2026).

37. ISO 19128:2005. Geographic information — Web map server interface. 1st ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2005. URL: https://www.iso.org/standard/32546.html (дата звернення: 17.10.2026).

38. Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 / Ю. О. Карпінський, Р. О. Зіненко, Н. Ю. Лазоренко, Д. О. Кінь. Проєкт нормативно-технічного документа. Редакція v1.0 від 10.10.2026. Київ, 2026. Рукопис; додаток А до дисертації.

39. Open Geospatial Consortium. OGC API — Features — Part 1: Core. Version 1.0. OGC 17-069r3. 2019. URL: https://docs.ogc.org/is/17-069r3/17-069r3.html (дата звернення: 17.10.2026).

40. Open Geospatial Consortium. OGC API — Tiles — Part 1: Core. Version 1.0. OGC 20-057. 2022. URL: https://docs.ogc.org/is/20-057/20-057.pdf (дата звернення: 17.10.2026).

41. ISO 19119:2016. Geographic information — Services. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. URL: https://www.iso.org/standard/59221.html (дата звернення: 17.10.2026).

42. Open Geospatial Consortium. OGC API — Records — Part 1: Core. Version 1.0. OGC 20-004r1. 2025. URL: https://docs.ogc.org/is/20-004r1/20-004r1.html (дата звернення: 17.10.2026).

43. World Wide Web Consortium; Open Geospatial Consortium. Spatial Data on the Web Best Practices. W3C Working Group Note, 28 September 2017; OGC Best Practice. 2017. URL: https://www.w3.org/TR/2017/NOTE-sdw-bp-20170928/ (дата звернення: 17.10.2026).

44. Bobzien M., Burghardt D., Petzold I., Neun M., Weibel R. Multi-representation Databases with Explicitly Modeled Horizontal, Vertical, and Update Relations. *Cartography and Geographic Information Science*. 2008. Vol. 35, No. 1. P. 3–16. DOI: 10.1559/152304008783475698.

45. Dumont M., Touya G., Duchêne C. Alternative transitions between existing representations in multi-scale maps. *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2018. Vol. 1. Article 33. DOI: 10.5194/ica-proc-1-33-2018.

46. Держгеокадастр повідомляє про оприлюднення Основної державної топографічної карти масштабу 1:50 000 : новина від 28.01.2022. Урядовий портал. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/derzhgeokadastr-povidomlyaye-pro-oprilyudnennya-osnovnoyi-derzhavnoyi-topografichnoyi-karti-masshtabu-150-000 (дата звернення: 27.10.2026).

47. Buttenfield B. P., Stanislawski L. V., Brewer C. A. A Comparison of Star and Ladder Generalization Strategies for Intermediate Scale Processing of USGS National Hydrography Dataset. 14th ICA/ISPRS Workshop on Generalisation and Multiple Representation. Paris, 2011. URL: https://kartographie.geo.tu-dresden.de/downloads/ica-gen/workshop2011/genemr2011_Buttenfield.pdf (дата звернення: 27.10.2026).

48. Karpinskyi Yu., Lazorenko-Hevel N. The system model of topographic mapping in the national spatial data infrastructure in Ukraine. Geodesy, Cartography and Aerial Photography. 2020. Issue 92. P. 24–36. DOI: 10.23939/istcgcap2020.92.024.

49. Burghardt D., Duchêne C., Mackaness W. (eds.). Abstracting Geographic Information in a Data Rich World: Methodologies and Applications of Map Generalisation. Cham : Springer, 2014. XV, 407 p. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3.

50. Brassel K. E., Weibel R. A review and conceptual framework of automated map generalization. *International Journal of Geographical Information Systems*. 1988. Vol. 2, No. 3. P. 229–244. DOI: 10.1080/02693798808927898.

51. McMaster R. B., Shea K. S. Generalization in Digital Cartography. Washington, D.C. : Association of American Geographers, 1992. 134 p. ISBN 0-89291-209-X.

52. Douglas D. H., Peucker T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica*. 1973. Vol. 10, No. 2. P. 112–122. DOI: 10.3138/FM57-6770-U75U-7727.

53. Visvalingam M., Whyatt J. D. Line generalisation by repeated elimination of points. *The Cartographic Journal*. 1993. Vol. 30, No. 1. P. 46–51. DOI: 10.1179/000870493786962263.

54. Blana N., Tsoulos L. Generalization of linear and area features incorporating a shape measure. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. Vol. 11, No. 9. Art. 489. DOI: 10.3390/ijgi11090489.

55. Baella B., Lleopart A., Pla M. ICC Topographic Databases: Design of a MRDB for Data Management Optimization. *Proceedings of the 15th ICA Generalisation Workshop*. Istanbul, Turkey, 2012. 8 p. URL: https://kartographie.geo.tu-dresden.de/downloads/ica-gen/submissions2012/genemr2012_session4_sub4.pdf (дата звернення: 08.10.2026).

56. Harrie L., Weibel R. Modelling the Overall Process of Generalisation. In: Mackaness W. A., Ruas A., Sarjakoski L. T. (eds.). *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*. Amsterdam : Elsevier, 2007. P. 67–87. DOI: 10.1016/B978-008045374-3/50006-5.

57. Sester M. Optimization approaches for generalization and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*. 2005. Vol. 19, No. 8–9. P. 871–897. DOI: 10.1080/13658810500161179.

58. Sielicka K. M., Karsznia I. Evaluating map specifications for automated generalization of settlements and road networks in small-scale maps. *Miscellanea Geographica*. 2019. Vol. 23, No. 4. P. 242–255. DOI: 10.2478/mgrsd-2019-0025.

59. Duchêne C., Ruas A., Cambier C. The CartACom model: transforming cartographic features into communicating agents for cartographic generalisation. *International Journal of Geographical Information Science*. 2012. Vol. 26, No. 9. P. 1533–1562. DOI: 10.1080/13658816.2011.639302.

60. Touya G., Girres J.-F. ScaleMaster 2.0: a ScaleMaster extension to monitor automatic multi-scales generalizations. *Cartography and Geographic Information Science*. 2013. Vol. 40, No. 3. P. 192–200. DOI: 10.1080/15230406.2013.809233.

61. Stoter J. E., Morales J. M., Lemmens R. L. G., Meijers B. M., van Oosterom P. J. M., Quak C. W., Uitermark H. T., van den Brink L. A data model for multi-scale topographical data. *Headway in Spatial Data Handling* / eds. A. Ruas, C. M. Gold. Berlin : Springer, 2008. P. 233–254. DOI: 10.1007/978-3-540-68566-1_14.

62. Cecconi A. Integration of cartographic generalization and multi-scale databases for enhanced web mapping : doctoral dissertation. University of Zurich, 2003. DOI: 10.3929/ethz-a-004553772.

63. Zhang X., Guo T., Huang J., Xin Q. Propagating updates of residential areas in multi-representation databases using constrained Delaunay triangulations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2016. Vol. 5, No. 6. Art. 80. DOI: 10.3390/ijgi5060080.

64. Stauffer A. J., Webinger S., Roche B. Enriching the National Map database for multi-scale use: Introducing the VisibilityFilter attribution. *Proceedings of AutoCarto 2016*. Albuquerque, New Mexico, 14–16 September 2016. P. 188–199. URL: https://pubs.usgs.gov/publication/70173994 (дата звернення: 08.10.2026).

65. Open Geospatial Consortium. OGC Two Dimensional Tile Matrix Set and Tile Set Metadata. Version 2.0. OGC 17-083r4, 2022. DOI: 10.62973/17-083r4.

66. van Oosterom P., Meijers M., Stoter J., Šuba R. Data Structures for Continuous Generalisation: tGAP and SSC. In: Burghardt D., Duchêne C., Mackaness W. (eds.). *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*. Cham : Springer, 2014. P. 83–117. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_4.

67. Stoter J., Zhang X., Stigmar H., Harrie L. Evaluation in Generalisation. In: Burghardt D., Duchêne C., Mackaness W. (eds.). *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*. Cham : Springer, 2014. P. 259–297. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_9.

68. Karpinskyi Yu., Lyashchenko A., Lazorenko-Hevel N., Cherin A., Kin D., Havryliuk Ye. Main state topographic map: structure and principles of the creation of a database. *Geoinformatics*. 2021. Vol. 2021. P. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.20215521043.

69. Karpinskyi Yu., Lyashchenko A., Lazorenko N., Kin D. Components for Ensuring the Creation of Digital Topographic Maps. *Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*. 2026. Issue I (51). P. 127–138.

70. Про затвердження Порядку створення та функціонування бази топографічних даних : наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 31.10.2023 № 1888, зареєстрований у Мін'юсті 14.11.2023 за № 1972/41028 (чинна редакція від 29.12.2023). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1972-23 (дата звернення: 08.09.2026).

71. ISO 19131:2022. Geographic information — Data product specifications. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.

72. ДСТУ 8774:2018. Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

73. PostGIS. ST_SimplifyPreserveTopology. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_SimplifyPreserveTopology.html (дата звернення: 08.10.2026).

74. PostGIS. ST_CoverageSimplify. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_CoverageSimplify.html (дата звернення: 16.10.2026).

75. PostGIS. ST_Touches. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_Touches.html (дата звернення: 16.10.2026).

76. Ai T., Yin H., Shen Y., Yang M., Wang L. A formal model of neighborhood representation and applications in urban building aggregation supported by Delaunay triangulation. *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14, No. 7. Art. e0218877. DOI: 10.1371/journal.pone.0218877.

77. PostGIS. ST_PointOnSurface. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_PointOnSurface.html (дата звернення: 08.10.2026).

78. PostGIS. ST_Centroid. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_Centroid.html (дата звернення: 16.10.2026).

79. ISO 19117:2012. Geographic information — Portrayal. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2012. URL: https://www.iso.org/standard/46226.html (дата звернення: 10.10.2026).

80. Karpinskyi Yu., Lazorenko N., Kin D. INSPIREID implementation in the topographic database of the main state topographic map of Ukraine. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2020. Issue 91. P. 20–27. DOI: 10.23939/istcgcap2020.91.020.

81. ISO 19136-1:2020. Geographic information — Geography Markup Language (GML) — Part 1: Fundamentals. 1st ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2020. URL: https://www.iso.org/standard/75676.html (дата звернення: 16.10.2026).

82. ISO 19108:2002. Geographic information — Temporal schema. 1st ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2002. URL: https://www.iso.org/standard/26013.html (дата звернення: 16.10.2026).

83. ДСТУ ISO 19107:2017. Географічна інформація. Просторова схема (ISO 19107:2003, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

84. Esri. Geodatabase topology rules and fixes for polygon features. ArcGIS Pro Documentation. URL: https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/editing/geodatabase-topology-rules-for-polygon-features.html (дата звернення: 08.10.2026).

85. PostGIS. ST_IsValid. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_IsValid.html (дата звернення: 08.10.2026).

86. Çobankaya O. N., Uluğtekin N. Updating the Multiple Representation Database. *Proceedings of the 15th ICA Generalisation Workshop*. Istanbul, Turkey, 2012. 8 p. URL: https://kartographie.geo.tu-dresden.de/downloads/ica-gen/submissions2012/genemr2012_session4_sub3.pdf (дата звернення: 17.10.2026).

87. European Commission / JRC. Technical Guidance for the implementation of INSPIRE View Services. Version 3.11, 2013. INSPIRE Knowledge Base. URL: https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/publications/technical-guidance-implementation-inspire-view-services_en (дата звернення: 27.10.2026).

88. IOGP / EPSG. EPSG Geodetic Parameter Dataset. EPSG:9858 — UCS-2000 / LCS-63 Kharkiv. EPSG.io. URL: https://epsg.io/9858 (дата звернення: 09.10.2026). Додаткове подання OGC. URL: https://opengeospatial.github.io/ontology-crs/data/def/crs/EPSG/0/9858/index.html (дата звернення: 17.10.2026).

89. PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 16 Documentation. Inheritance. URL: https://www.postgresql.org/docs/16/ddl-inherit.html (дата звернення: 28.10.2026).

90. PostGIS. ST_HausdorffDistance. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_HausdorffDistance.html (дата звернення: 28.10.2026).

91. Chaikin G. M. An algorithm for high-speed curve generation. Computer Graphics and Image Processing. 1974. Vol. 3, No. 4. P. 346–349.

92. PostGIS. ST_ChaikinSmoothing. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_ChaikinSmoothing.html (дата звернення: 28.10.2026).

93. PostGIS. ST_SimplifyVW. Official Documentation. URL: https://postgis.net/docs/ST_SimplifyVW.html (дата звернення: 28.10.2026).

94. Open Geospatial Consortium. OGC® GeoPackage Encoding Standard. Version 1.4.0. OGC 12-128r19. 2024. URL: https://docs.ogc.org/is/12-128r19/12-128r19.html (дата звернення: 16.10.2026).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Паспорт проєкту нормативно-технічного документа, що містить результати практичного використання дисертаційного дослідження

«Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000». Редакція v1.0 від 10 жовтня 2026 року.

Автори: Карпінський Юрій Олександрович (ORCID 0000-0002-0701-1277); Зіненко Роман Олексійович (ORCID 0000-0002-3337-7168); Лазоренко Надія Юріївна (ORCID 0000-0002-1572-4947); Кінь Данило Олексійович (ORCID 0000-0002-0185-2534).

До проєкту увійшли результати розроблення каталогів класів об’єктів і прикладних моделей для шести класів: Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation). Ці результати одержано особисто Зіненком Р. О. Решту класів та цілісну структуру проєкту опрацьовано спільно з Ю. О. Карпінським, Н. Ю. Лазоренко та Д. О. Кінем. Загалом проєкт охоплює 79 типів об’єктів в 11 тематичних пакетах і пакет загальних властивостей.

Повний текст проєкту становить додаток А і подається у двох друкованих томах. Том 2.1 містить початкові положення та частину каталогів; том 2.2 — продовження каталогів класів об’єктів, загальні вимоги і внутрішні додатки. Реквізити редакції зазначено на її власному титульному аркуші.

ДОДАТОК Б

Публікації здобувача та апробація матеріалів дисертації

Б.1. Наукові праці, у яких опубліковано основні результати дослідження

1. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2025. Вип. 13. С. 514–524. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.514-524.

Досліджено особливості застосування вебсервісу картографічних тайлів WMTS для геовізуалізації геопросторових даних у середовищі Національного геопорталу НІГД. Розглянуто структуру наборів матриць тайлів, рівні деталізації та особливості формування багатомасштабного картографічного представлення. Обґрунтовано доцільність використання WMTS для публікації базової топографічної основи Національного геопорталу.

2. Зіненко Р. О. Аналіз та оцінювання використання веб-сервісу візуалізації WMS у Національному геопорталі НІГД. *Просторовий розвиток*. 2026. Вип. 16. С. 431–441. DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.431-441.

Проаналізовано функціонування WMS у складі Національного геопорталу НІГД та його відповідність вимогам специфікації вебсервісу картографічних зображень WMS 1.3.0 Відкритого геопросторового консорціуму, стандарту інтерфейсу вебкартографічного сервера ISO 19128:2005 і технічним рекомендаціям INSPIRE щодо сервісів перегляду. Досліджено операції GetCapabilities, GetMap та GetFeatureInfo. Тестування у середовищі QGIS підтвердило коректність підключення сервісу, відображення геопросторових даних на різних масштабних рівнях та сумісність із клієнтськими геоінформаційними системами.

3. Зіненко Р. О. Стан сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації геопросторових даних в Україні та тенденції їх розвитку. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2026. № 2. С. 32–43. DOI: 10.31548/zemleustriy2026.02.03.

Виконано системний аналіз сучасного стану сервісно-орієнтованих технологій геовізуалізації геопросторових даних в Україні. Досліджено застосування стандартів і сервісів WMS, WMTS, WFS та CSW на Національному геопорталі НІГД, регіональних і місцевих геопорталах. Встановлено перехід від статичних картографічних ресурсів до динамічних веборієнтованих ГІС-

платформ, високий рівень поширення сервісів перегляду WMS і WMTS та недостатнє використання сервісів прямого доступу до геопросторових об’єктів.

4. Зіненко Р. О. Методи та моделі геовізуалізації генералізованих геопросторових даних на Національному геопорталі. *Містобудування та територіальне планування*. 2026. Вип. 93. С. 666–677. DOI: 10.32347/2076-815x.2026.93.666-677.

Розроблено математичну модель представлення каталогу топографічних об’єктів та їх атрибутів для багатомасштабної геовізуалізації. Запропоновано використання характеристичних предикатів і функціональних операторів для автоматизованого відбору, зміни геометрії та генералізації об’єктів у масштабному ряду від 1:25 000 до 1:1 000 000. Обґрунтовано формування похідних наборів із базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

5. Карпінський Ю. О., Зіненко Р. О., Лазоренко Н. Ю., Кінь Д. О. Розроблення специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000–1:1 000 000. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2026. Вип. 104. С. 5–16. DOI: 10.23939/istcgcap2026.104.005.

Обґрунтовано пооб’єктне специфікування похідних топографічних наборів, за якого спільний опис класу поєднується з масштабними критеріями відбору, допустимими геометріями та вимогами до картографічного представлення на кожному масштабному рівні. Порівняно два основних способи організації масштабних вимог. Систематизовано структуру співавторської праці [38], наведено критерії для гідрографії, населених пунктів та інженерних комунікацій, а також концептуальну модель формування похідних топографічних карт із базової топографічної моделі даних.

Б.2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Зіненко Р. О. Використання веб сервісу візуалізації WMS в Національному геопорталі НІГД. *International scientific-practical conference “Topical issues of science, education and technology: theory and practice”* : conference proceedings (Aarhus, Denmark, April 18, 2025). Aarhus : Scholarly Publisher ICSSH, 2025. С. 41–43.

Подано результати дослідження використання WMS як одного з основних стандартизованих засобів геовізуалізації геопросторових даних у складі Національного геопорталу НІГД. Розглянуто принципи взаємодії клієнта з

картографічним сервером, формування запитів та отримання картографічних зображень, а також можливість суміщення даних з розподілених картографічних сервісів.

7. Зіненко Р. О. Особливості використання веб сервісу картографічних тайлів WMST в Національному геопорталі НІГД. *Матеріали XXVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2025»* (Львів–Брюховичі, 9–11 квітня 2025 р.). Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 63–66.

Апробовано положення щодо застосування сервісу WMTS для багатомасштабного картографічного представлення геопросторових даних. Розглянуто структуру тайлового представлення, організацію рівнів деталізації та використання попередньо сформованих картографічних тайлів для геовізуалізації даних Національного геопорталу НІГД.

8. Kin D., Zinenko R., Lazorenko N., Karpinskyi Yu. The Application of Rigorous Numerical Methods for Analyzing Heterogeneous Geospatial Data. *29th AGILE Conference on Geographic Information Science — Poster Track* (Tartu, Estonia, June 16–19, 2026). Conference paper. Version v1. Zenodo, 14.05.2026. DOI: 10.5281/zenodo.20181757.

У праці досліджено точність картометричних обчислень на різнорідних геопросторових даних та вплив математичної моделі, координатної основи й деталізації геометрії на оцінки просторових характеристик. Розглянуто гідрографічні дані двох просторових рівнів.

Примітка. У назвах журнальної статті [15] і тез конференції [14] збережено опубліковане написання «WMST». У викладі дисертації сервіс картографічних тайлів позначено стандартним скороченням WMTS (Web Map Tile Service).

Б.3. Особистий внесок здобувача у спільно підготовлені результати

У співавторському проєкті нормативно-технічного документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» [38] та опублікованій статті щодо його розроблення [13] використано особисті наукові результати Зіненка Р. О. Його внесок полягає в розробленні каталогів класів топографічних об’єктів і прикладних моделей для Будівлі (Buildings), Квартали (Blocks), Автомобільні та ґрунтові дороги (Roads), Водойми (StandingWater), Ділянки водотоків та каналів гідрографічної мережі (Watercourse) і Деревна рослинність (Vegetation), а також у формалізації їх масштабно залежного відбору, генералізації та геовізуалізації. Прикладні

вимоги до інших класів і повна структура проєкту є спільними результатами Ю. О. Карпінського, Р. О. Зіненка, Н. Ю. Лазоренко та Д. О. Кіня.

У співавторській праці AGILE 2026 досліджено числові методи аналізу різнорідних геопросторових даних [17]; цей колективний результат використано в дисертації для розмежування точності обчислень і властивостей геометричного представлення.

Б.4. Відомості про наукову апробацію

TAIEX Expert Mission on National Spatial Data Infrastructure Development and Functioning in accordance with the INSPIRE/844. Місце проведення — онлайн; 9–10 жовтня 2023 р. Форма участі здобувача — усна доповідь «Презентація пілоту національного геопорталу НІГД».

XXVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2025». Львів–Брюховичі, Україна; 9–11 квітня 2025 р. Форма апробації — публікація одноосібних тез щодо використання WMTS на Національному геопорталі [14].

International scientific-practical conference “Topical issues of science, education and technology: theory and practice”. Орхус, Данія; 18 квітня 2025 р. Форма апробації — публікація одноосібних тез щодо використання WMS на Національному геопорталі [16].

29th AGILE Conference on Geographic Information Science — Poster Track. Тарту, Естонія; 16–19 червня 2026 р. Результат апробації — конференційна праця «The Application of Rigorous Numerical Methods for Analyzing Heterogeneous Geospatial Data», оприлюднена в репозитарії Zenodo [17].

ДОДАТОК В

Акт про використання та апробацію результатів дисертаційного дослідження

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ГЕОДЕЗІЇ, КАРТОГРАФІЇ ТА КАДАСТРУ
НАУКОВО - ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ГЕОДЕЗІЇ І КАРТОГРАФІЇ
(ДП "НДІГК")
вул. Велика Васильківська, 69, Київ, 03150, Україна
тел. (050) 324-02-07, E-mail: info@gki.com.ua, www.gki.com.ua
рр UA448226690000026000300823065 АТ «ОЩАДБАНК», код ЄДРПОУ 24102001

Від «26» 10 2026 р. № 596 м. Київ

АКТ

про використання та апробацію результатів дисертаційного дослідження

Здобувач: Зіненко Роман Олексійович.

Тема дисертації: «Методи і моделі геовізуалізації на Національному геопорталі Національної інфраструктури геопросторових даних».

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» (ДП «НДІГК») підтверджує практичне використання та успішну апробацію методів і моделей, розроблених Зіненком Романом Олексійовичем у межах зазначеного дисертаційного дослідження.

Експериментальну та інтеграційну апробацію успішно завершено. Роботи виконано в локальному середовищі розробки та тестування Національного геопорталу із застосуванням його технологічних компонентів для формування, картографічного відображення та сервісного надання похідних геопросторових даних.

Вихідною основою слугувала базова державна топографічна карта масштабу 1:10 000; випробування охопили шість досліджених типів об'єктів контрольного фрагмента Харкова. Похідні представлення сформовано для масштабів 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000.

Застосовано масштабний відбір, визначення допустимого геометричного стану та оператори генералізації відповідно до правил Комплексу специфікацій TDS25K_1M. Зв'язки походження похідних представлень збережено за ідентифікаторами TOID та відношенням Lin.

Перевірено семантичну відповідність, валідність геометрії, просторові відношення та масштабно залежне оформлення; контроль забезпечив визначення придатних представлень і виявлення невідповідностей перед картографічним відображенням та сервісним наданням даних.

Сервісна апробація охопила WMS, WMTS і WFS. Інтеграційними випробуваннями підтверджено узгодженість картографічних зображень, об'єктних відповідей і підготовлених наборів у визначених просторових вікнах та працездатність реалізованої послідовності оброблення, відображення й надання даних.

Практичний результат полягає у відтворюваній підготовці багатомасштабної топографічної основи, збереженні зв'язку представлень із джерелом і контролі їх придатності для картографічних сервісів Національного геопорталу НІГД.

Результати апробації оцінено як позитивні. Матеріали перевірок, що визначають предметний обсяг підтвердженого використання результатів дослідження, систематизовано в розділі 3 та додатках Д і Е дисертації.

Акт видано для подання до Київського національного університету будівництва і архітектури та включення до дисертації як підтвердження практичного використання й апробації результатів дослідження.

Т. в. о. директора ДП «НДІГК» _____ **Станіслав ДЬОМІН**

(підпис)

ДОДАТОК Г

Лист-погодження щодо використання матеріалів Технічного проєкту

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ГЕОДЕЗІЇ, КАРТОГРАФІЇ ТА КАДАСТРУ
НАУКОВО - ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ГЕОДЕЗІЇ І КАРТОГРАФІЇ
(ДП "НДІГК")
вул. Велика Васильківська, 69, Київ, 03150, Україна
тел. (050) 324-02-07, E-mail: info@gki.com.ua, www.gki.com.ua
р/р UA443226690000026000300823065 АТ «ОЩАДБАНК», код ЄДРПОУ 24102001

Від «26» 10 2026 р. № 595 м. Київ

ПОГОДЖЕННЯ

щодо використання матеріалів Технічного проєкту

Здобувач: Зіненко Роман Олексійович.

Тема дисертації: «Методи і моделі геовізуалізації на Національному геопорталі Національної інфраструктури геопросторових даних».

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» погоджує використання в зазначеній дисертації узагальнених матеріалів документа «Технічний проєкт створення Національного геопорталу Національної інфраструктури геопросторових даних» (Київ, 2023).

Погодження поширюється на узагальнені відомості про архітектуру системи, призначення підсистем, взаємодію компонентів, принципи роботи сервісів WMS, WMTS і WFS, а також відповідні структурні схеми.

Дозволено їх відтворення, наукове узагальнення та адаптацію для пояснення результатів дослідження зі збереженням змісту технічних рішень, бібліографічним посиланням на Технічний проєкт і позначенням джерел запозичених схем.

Погодження охоплює друкований примірник та відкриту електронну версію дисертації, включно з її оприлюдненням на офіційному вебсайті й в інституційному репозитарії Київського національного університету будівництва і архітектури.

До погодженого обсягу не належать облікові дані доступу, службові мережеві адреси, конфігурації захисту та інші відомості обмеженого доступу. Погодження видано для оформлення матеріалів дисертації.

Т. в. о. директора ДП «НДІГК» _____ **Станіслав ДЬОМІН**
(підпис)

ДОДАТОК Д

Результати експериментальної апробації масштабних моделей, геометричних перетворень і контролю якості

Семантичні критерії перевіряли за проєктом документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» [38]. Для експериментальних кандидатів окремо зафіксовано геометричне представлення, походження та підсумок контролю відповідності.

Наведені перевірки мають чітко визначені одиниці обліку. Метричні результати стосуються валідних вихідних геометрій, тоді як пробні агрегати, внутрішні точки та діагностичні записи рослинності оцінювалися за додатковими семантичними й топологічними умовами для кожного масштабу.

У додатку наведено результати експериментальних перевірок методів і моделей багатомасштабного представлення за вихідними топографічними геопросторовими даними контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000. Збережено первинні ідентифікатори об’єктів, повні склади контрольних вибірок, результати граничних тестів, виміряні геометричні відхилення та зв’язки походження. Ці матеріали використано під час апробації методів і моделей на Національному геопорталі НІГД (підрозділ 3.6).

Д.1. Вихідний набір, координатна основа та контроль початкової якості

Паспорт вихідного набору топографічних геопросторових даних

Вихідний матеріал базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 отримано у форматі File Geodatabase. Набір містить 137 фізичних класів зберігання, з яких 57 непорожніх; загалом — 20 165 цифрових записів.

У таблиці Д.1 наведено склад вихідних даних і значення кодових атрибутів. Службовий код −32768 не ототожнювався з SQL NULL; відсутність поля BuildingUse або upperScale перевірено окремо від порожнього значення.

Прямокутний контур класу «Населені пункти» (Settlements, код 0401) не використано як підтверджену межу населеного пункту.

Таблиця Д.1 – Склад фізичних класів і кодових атрибутів вихідних топографічних даних (частина 1: непорожні класи)

№	Клас шару	Об’єктів	Геометрія
1	2	3	4
1	Blocks	529	MultiPolygon
2	BridgeL	26	MultiLineString
3	BridgeP	5	Point
4	Buildings_and_Constructions	150	MultiPolygon
5	BuildingsP	4 035	Point
6	BuildingsPOL	9 176	MultiPolygon
7	CoastallineL	2	MultiLineString
8	ConstructionsP	2	Point
9	Contourline	344	MultiLineString
10	Cosm_line	144	MultiLineString
11	Cosm_point	711	Point
12	Elevations	206	Point
13	EmbankmentsExcavations	64	MultiLineString
14	Fence	177	MultiLineString
15	GrassPOL	40	MultiPolygon
16	Hydrography	46	MultiPolygon
17	HydroManMadeConstructionsL	61	MultiLineString
18	Land_cover	5	MultiPolygon
19	Land_relief	254	MultiPolygon
20	LocalizedCharacteristicsL	9	MultiLineString
21	MASKA_RELIEF	71	MultiPolygon
22	Mast	62	Point
23	MetroP	18	Point
24	MiningSitesL	7	MultiLineString
25	MonumentsP	39	Point
26	MonumentsPOL	1	MultiPolygon
27	OverpassesL	4	MultiLineString
28	PedestrianUnderpassL	3	MultiLineString
29	PlaneGeodeticPoint	2	Point
30	PositiveTopographicFormL	3	MultiLineString
31	PowerConstructionsPOL	4	MultiPolygon
32	Powerlines	7	MultiLineString

№	Клас шару	Об’єктів	Геометрія
1	2	3	4
33	Railway	164	MultiLineString
34	RailwayConstructionsP	4	Point
35	RailwayConstructionsPOL	2	MultiPolygon
36	ReligiousBuildingP	2	Point
37	Roads	93	MultiLineString
38	Settlement	388	MultiPolygon
39	Settlements	1	MultiPolygon
40	ShrubP	1	Point
41	StandingWaterPOL	11	MultiPolygon
42	Streets	620	MultiLineString
43	StreetSurface	2	MultiPolygon
44	SurfaceRiver	2	MultiPolygon
45	SwampP	2	Point
46	SwampPOL	4	MultiPolygon
47	TeleCommConstructionsP	1	Point
48	TowerConstructionsP	47	Point
49	Tramway	19	MultiLineString
50	Transport_infrastructure	21	MultiPolygon
51	Utilities	6	MultiPolygon
52	VegetationL	4	MultiLineString
53	VegetationP	2 482	Point
54	VegetationPOL	59	MultiPolygon
55	Watercourse	5	MultiLineString
56	WaterLevel	9	Point
57	WatersupplyConstructions	9	Point

Джерело: підготовлено автором за даними вихідної File Geodatabase.

Продовження таблиці Д.1 – Частина 2: розподіл фактичних кодів та відповідність вимогам Специфікацій [38]

Клас, поле	Факт. код	n	Відповідність і значення за Специфікаціями [38]
1	2	3	4
BuildingsPOL · typeBuildings	2	9 115	Відповідає: окремі будівлі не визначні
BuildingsPOL · typeBuildings	4	37	Поза кодовим переліком Специфікацій
BuildingsPOL · typeBuildings	20	24	Поза кодовим переліком Специфікацій

Клас, поле	Факт. код	n	Відповідність і значення за Специфікаціями [38]
1	2	3	4
BuildingsP · typeBuildings	2	4 022	Відповідає: окремі будівлі не визначні
BuildingsP · typeBuildings	9	13	Поза кодовим переліком Специфікацій
BuildingsPOL · statusBuilding	−32768	9 143	Фізично записаний службовий код; поза доменом statusBuildings [38]; не NULL
BuildingsPOL · statusBuilding	1	1	Код передбачено CodeList statusBuildings [38]; назва вихідного поля відрізняється
BuildingsPOL · statusBuilding	3	8	Код передбачено CodeList statusBuildings [38]; назва вихідного поля відрізняється
BuildingsPOL · statusBuilding	998	24	Поза доменом statusBuildings [38]; не NULL
Roads · typeRoad	3	8	Відповідає: автомобільні дороги з покриттям
Roads · typeRoad	4	1	Відповідає: автомобільні дороги без покриття
Roads · typeRoad	5	3	Відповідає: ґрунтові дороги (путівці)
Roads · typeRoad	6	2	Відповідає: польові і лісові дороги
Roads · typeRoad	9	79	Відповідає: пішохідні стежки, доріжки, алеї
Roads · kindOfRoad	−32768	93	Поза нормативним доменом 1–8; не SQL NULL
Streets · kindOfRoad	−32768	612	Поза нормативним доменом 1–8; не SQL NULL
Streets · kindOfRoad	5	8	Відповідає: обласна дорога
Blocks · typeBlocks	1	529	За CodeList typeBlocks [38]: квартали в населених пунктах
VegetationPOL · typeVegetation	1	59	Відповідає: ліс високий
VegetationL · typeVegetation	17	4	Поза кодовим переліком Специфікацій
VegetationP · typeVegetation	22	2 482	Поза кодовим переліком Специфікацій
Settlements · adminImportance	3	1	Відповідає: адміністративний центр області
Settlements · typeSettlements	1	1	Поза символьним доменом K, M, X, C

Джерело: підготовлено автором за фактичними атрибутами вихідних топографічних даних і кодовими переліками Специфікацій [38].

Перевірка валідності вихідних геометрій

Перед формуванням похідних масштабних представлень виявлено два полігони з дефектом Ring Self-intersection. У таблиці Д.2 наведено їхні вихідні TOID і характер порушень. Додатково перевірено непорожність геометрій та 18 369 наявних TOID, серед яких дублікатів не виявлено. Контроль ідентифікаторів та геометричної валідності становив окремі етапи перевірки якості.

Таблиця Д.2 – Об’єкти з невалідною вихідною геометрією

Клас	TOID	Дефект	Стан
BuildingsPOL	CD53BF3393D1AB0F	Ring Self-intersection; 36,234828° сх. д.; 49,991661° пн. ш.	Виявлено у джерелі
VegetationPOL	2D53E6E5B012B945	Ring Self-intersection; 36,228167° сх. д.; 49,995062° пн. ш.	Виявлено у джерелі

Джерело: розроблено автором за результатами перевірки валідності вихідних геометрій.

Координатна основа та метричне представлення даних

Метричні пороги перевіряли після перетворення вихідних координат до УСК-2000 / МСК-63 (Харків), EPSG:9858. Первинну File Geodatabase збережено без змін. Таблиця Д.3 фіксує розрахункову координатну основу й межі контрольного шару; охоплювальний прямокутник не відображає площу міста.

Таблиця Д.3 – Геодезичні та метричні параметри контрольного шару BuildingsPOL

Параметр	Значення
Вихідні координати	Геодезичні координати вихідної File Geodatabase; оригінальне координатне представлення збережено без змін
Розрахункова МСК	УСК-2000 / МСК-63 (Харків), EPSG:9858, м
Східна E, м	277 575,93–282 075,48
Північна N, м	5 536 340,56–5 540 989,39
Площа вікна, км²	20,92
Вид показника	Площа обмежувального прямокутника, не забудови

Джерело: розроблено автором за координатами вихідної File Geodatabase та метричним перетворенням до EPSG:9858 [88].

Перевірка відбору за площею для двох полігональних класів топографічних об'єктів

Для 9 175 валідних полігонів BuildingsPOL і 11 полігонів StandingWaterPOL перевірено предикат $A > \tau_s$ на шести цільових масштабах (позначення — за формулою (3.1)). Один невалідний полігон будівлі не включали до метричних розрахунків, зберігши його у вихідній базі. У таблиці Д.4 наведено повні знаменники вибірок, кількість позитивних і негативних результатів. Правила класу геометричного колапсу та символізації оцінювали окремо.

Таблиця Д.4 – Перевірка порогів площі на реальній територіальній вибірці

Код типу	Масштаб	Поріг, м²	Валідних	$A > \tau_s$	$A \leq \tau_s$
0501	1:25 000	625	9 175	1 548	7 627
0501	1:50 000	2 500	9 175	258	8 917
0501	1:100 000	10 000	9 175	24	9 151
0501	1:200 000	80 000	9 175	0	9 175
0501	1:500 000	500 000	9 175	0	9 175
0501	1:1 000 000	2 000 000	9 175	0	9 175
0301	1:25 000	625	11	8	3
0301	1:50 000	2 500	11	1	10
0301	1:100 000	10 000	11	0	11
0301	1:200 000	80 000	11	0	11
0301	1:500 000	500 000	11	0	11
0301	1:1 000 000	2 000 000	11	0	11

Джерело: розроблено автором за контрольними полігональними обчисленнями геометрій із вихідної File Geodatabase.

Контроль взаємного накладання полігонів

Виконано контроль додатної площі перетину між різними полігонами кварталів і водойм. Для кожного класу підраховано кількість перевірених геометрій і пар взаємного накладання (табл. Д.5). Такий тест встановлює просторові відношення контурів незалежно від їх класифікаційних характеристик.

Таблиця Д.5 – Проби позитивного полігонального перекриття

Клас	Полігонів перевірено	Пар із додатною площею перекриття
Blocks	529	0
StandingWaterPOL	11	0

Джерело: розроблено автором за результатами перевірки просторових відношень у вихідній File Geodatabase.

Д.2. Контроль будівель і кварталів: масштабний відбір, геометрія та походження

Вибірка об’єктів класу «Будівлі» (Buildings, код 0501) та атрибутивна відповідність

Кодові частоти полігональних і точкових записів будівель наведено у другій частині таблиці Д.1. У вихідних класах BuildingsPOL і BuildingsP поле Significance відсутнє. Коди typeBuildings 4, 9 і 20 потребують зіставлення з цільовим класифікатором, тому відповідні семантичні умови залишаються невизначеними. Полігональні результати обліковано за вихідними геометріями.

Чутливість полігонального правила до граничних значень

Строгу нерівність $A > \tau_s$ перевірено на 18 контрольних значеннях: $A = \tau_s - 0{,}01\,м^2$, $A = \tau_s$ та $A = \tau_s + 0{,}01\,м^2$ для кожного з шести масштабів. Синтетичні граничні значення використано для перевірки оператора порівняння; метричні обчислення реальних полігонів подано окремо.

Для незалежної перевірки поблизу порогів наведено вихідні TOID конкретних будівель із площами по обидва боки межі. У таблицях Д.6 і Д.7 чітко розмежовано алгоритмічний контроль граничних умов і вимірювання геометрій вихідної бази.

Таблиця Д.6 – Результати 18 синтетичних тестів граничних значень

Масштаб	τ_s, м²	$\tau_s - 0{,}01$	$A = \tau_s$	$\tau_s + 0{,}01$
1:25 000	625	ні	ні	так
1:50 000	2 500	ні	ні	так
1:100 000	10 000	ні	ні	так
1:200 000	80 000	ні	ні	так
1:500 000	500 000	ні	ні	так
1:1 000 000	2 000 000	ні	ні	так

Джерело: складено за результатами дослідження.

Таблиця Д.7 – Приклади реальних полігонів поблизу порогів площі

TOID вихідного об'єкта	**Поріг, м²**	**Площа, м²**	**Результат** $A > \tau_s$
8B25EE139C714476	625	624,935	Не проходить
8E43F3696CBA92C4	625	625,099	Проходить
0C2AEAEC24A0392A	2 500	2 497,817	Не проходить
77DEBB14AD578B25	2 500	2 502,919	Проходить

Джерело: власні метричні обчислення за валідними геометріями BuildingsPOL у EPSG:9858.

Контроль геометричного переходу та семантичних профілів

Для валідних полігонів BuildingsPOL із площею нижче порогу перевірено формування внутрішньої представницької точки зі збереженням вихідного TOID. У контрольному наборі сформовано 53 220 записів класу «вихідний TOID — масштаб», для кожного з яких підтверджено розміщення точки в межах вихідного контуру. Перевірка встановлює коректність геометричного оператора; картографічний знак вибирають за семантичними правилами.

Для перевірки логіки представлення застосовано три модельні стани значущості об'єкта: підтверджена, відхилена та невизначена. Такі стани задано лише в контрольних семантичних сценаріях; у фізичній базі окремого атрибута Significance немає. Похідні точки зберігають статус геометричних кандидатів до вибору знака.

Таблиця Д.8 – Вихідні стани для полігонів, менших за поріг площі, за модельних семантичних профілів

Масштаб	TOID	Площа, м²	Значуща	Не значуща	Невідома
1:25 000	8B25EE139C714476	624,935	POINT	OMIT	Не визначено
1:50 000	0C2AEAEC24A0392A	2 497,817	POINT	OMIT	Не визначено
1:100 000	9FF292E474B80145	9 979,938	POINT	OMIT	Не визначено
1:200 000	1DC2D0A48DDCBCE4	62 226,280	POINT	OMIT	Не визначено

Джерело: розраховано автором.

Продовження таблиці Д.8 – Формування й перевірка внутрішніх точок для полігонів, менших за поріг площі

Масштаб	Точок-кандидатів	Усередині полігона	Рішення POINT
1:25 000	7 627	7 627	Не визначено
1:50 000	8 917	8 917	Не визначено
1:100 000	9 151	9 151	Не визначено
1:200 000	9 175	9 175	Не визначено
1:500 000	9 175	9 175	Не визначено
1:1 000 000	9 175	9 175	Не визначено

Джерело: обчислено за 9 175 валідними полігонами BuildingsPOL у EPSG:9858; результати окремого контрольного набору точкових кандидатів будівель. Значення «не визначено» відображає відсутність підтвердженого семантичного рішення.

Клас «Квартали» (Blocks, код 0402): склад вихідних об’єктів та масштабний відбір

Для 529 вихідних полігонів кварталів виконано масштабний відбір за площею та перевірено збереження вихідних TOID. Кількості за цільовими масштабами зіставлено з таблицею 3.4. Метрична близькість кварталів не означає спільної топологічної межі; тому просторову суміжність контролювали незалежно від відстані.

Контроль збереження вихідних TOID

Для контрольного GeoPackage сформовано 49 груп агрегування кварталів із 1 519 зв’язками походження до вихідних полігонів. Таблиця Д.9 містить повний склад TOID для 15 груп масштабу 1:100 000. У похідному

об’єднанні використано множинне походження Lin, що зберігає зв’язок з усіма учасниками агрегування.

Зіставлення групових геометрій з осями вулиць виявило перетини в новоутворених міжквартальних зонах. Ці результати враховано під час перевірки топологічних обмежень агрегування; валідність контуру й збереження вуличного простору перевіряли окремо.

Таблиця Д.9 – Склад експериментальних груп і вихідних кварталів (1:100 000)

Група	TOID, шт.	Площа, м²	Повні TOID вихідних кварталів
001	8	48 663,5	12C5C08123E680F4; 339960CCAB1862E0; 73E47F050F742C78; AB9957DE271284E7; CFDA36E3A30D209B; D5E3508E8C97C615; DF246063EDA2183E; E7B8186D11F45F52
002	7	42 665,5	439F4D80242180D8; 50CB8EB6AE1237BB; 60EC4F646A966CFE; 88A413931F6F0678; A32A4A386FB41D68; B4DF4C7269CC251C; D1C4523F54C872F1
003	4	23 501,0	1E4DF434B3601A08; 42C4F551FF981A91; 523258FDE1B141DB; CB1998F6E1CD9445
004	3	21 695,4	1C6E7DA7BC4FB8C4; 377C7425201ECCF5; 3D4C1B9D337B18F4
005	3	19 193,8	81AFF1BADE4544C1; A8CDBD0843CD211E; E12A2B30D5C348EA
006	3	18 768,1	054CC94EDED04D69; 066823C47E06A8D9; D1DAE99C49A379F4
007	3	14 371,2	35CA39F99F98AE8B; 77872063F34DB3ED; DA8A9156B1F42C4E
008	2	16 832,7	372FF24E3C73F462; 6DCB9520D69FC275
009	2	16 111,5	9B11036C8CD89A31; D22E0A4A5A7F0076
010	2	13 989,3	EB00FAA5B0BE6818; F07AE27AA917D39F
011	2	12 928,4	44128B185897BF79; 64293EC7D548DEAA
012	2	12 259,4	13CAEB22B6129C09; FD612E58129CBD1D
013	2	11 892,1	A4343A533AB7F9C6; EA47ED84327FABD7
014	2	10 734,8	14E596A709251E6D; 3BA1DEA22079B23C
015	2	10 239,1	8C48791FF30AAB9C; FA5A01E4C93CA7FE

Джерело: розраховано автором за геометріями та ідентифікаторами Blocks; у 15 групах збережено 47 різних TOID.

Продовження таблиці Д.9 – Геометрична й топологічна перевірка можливих об’єднань кварталів

Масштаб	Груп	Один контур	Кілька частин	Конфлікт з осями вулиць
1:100 000	15	15	0	15
1:200 000	27	23	4	27
1:500 000	6	5	1	6
1:1 000 000	1	1	0	1

Джерело: складено за результатами дослідження.

Граничні випадки й топологічні обмеження

Для кварталів у цій серії задано операційний предикат $A \geq \tau_s$, на відміну від строгої нерівності для будівель. Синтетичні значення безпосередньо під порогом, на порозі та над ним перевірено окремо.

Серед ребер геометричної близькості виявлено 41, 648, 1 387 і 1 849 пар для чотирьох дрібніших масштабів. Найкоротші з’єднання перетинають вулиці в 41, 643, 1 375 і 1 836 випадках відповідно. Ця перешкода не усувається простим застосуванням буфера.

Таблиця Д.10 – Контроль граничної умови мінімальної площі кварталу

Масштаб	τ_s, м²	$\tau_s - 0{,}01$	τ_s	$\tau_s + 0{,}01$
1:25 000	625	не проходить	проходить	проходить
1:50 000	2 500	не проходить	проходить	проходить
1:100 000	10 000	не проходить	проходить	проходить
1:200 000	40 000	не проходить	проходить	проходить
1:500 000	250 000	не проходить	проходить	проходить
1:1 000 000	1 000 000	не проходить	проходить	проходить

Джерело: виконано автором для операційної умови $A \geq \tau_s$; граничний випадок узгоджено з формалізацією мінімальної площі у підрозділі 2.2.2.

Продовження таблиці Д.10 – Контроль просторів між кварталами при агрегуванні

Масштаб	Зв’язків близькості	Перетинають вулиці	Новоутворена площа, тис. м²
1:100 000	41	41	21,99
1:200 000	648	643	855,04
1:500 000	1 387	1 375	2 295,49
1:1 000 000	1 849	1 836	2 916,08

Джерело: обчислено автором за вихідними Blocks і Streets та похідними геометричними кандидатами у EPSG:9858; площу наведено з округленням до 0,01 тис. м².

Д.3. Контроль доріг: класифікація, спрощення та топологія

Контрольні об’єкти автомобільних доріг із покриттям

Вибрано вісім реальних ліній доріг із typeRoad = 3 і збережено їхні TOID та метричні довжини. Після застосування умови довжини створено 22 записи «TOID — масштаб», а не 22 різні дороги. Таблиця Д.11 дає змогу повторно перевірити конкретні об’єкти й відокремити їх від 214 кандидатів, відібраних лише за довжиною.

Довжина визначає метричну придатність лінії; її включення до карти додатково залежить від типу дороги, мережевої функції та умов зображення. Результати геометричного відбору зіставлено з правилами для доріг у Специфікаціях [38].

Таблиця Д.11 – Вихідні TOID і довжини доріг із покриттям

TOID вихідного об’єкта	Довжина, м	Найдрібніший масштаб за довжиною
322DAED5FB8E078B	547,73	1:500 000
6EEF84D7070E60BC	399,25	1:200 000
1CE7C359E74449D7	190,28	1:100 000
190618DB3129DCAF	178,71	1:100 000
1A442737DA93BD35	108,61	1:100 000
FB642E1C64F1E4E2	52,71	1:50 000
A6EA8DEF045C0EED	38,71	1:25 000
C113208D505C3973	37,12	1:25 000

Джерело: визначено автором за 8 записами Roads із typeRoad = 3, метричні розрахунки в EPSG:9858.

Продовження таблиці Д.11 – Семантичні значення полів вихідного шару доріг Roads, встановлені у вихідній File Geodatabase

Атрибут	Фактичне значення	Статус / NULL
typeRoad	3: 8; 4: 1; 5: 3; 6: 2; 9: 79	Чинні коди; 0 NULL
statusRoad	1 у 93 записах	Код 1; 0 NULL
kindOfRoad	−32768 у 93 записах	Позадоменне службове значення; 0 NULL
roadSurfaceMaterial	−32768 у 93 записах	Позадоменне службове значення; 0 NULL

Атрибут	Фактичне значення	Статус / NULL
verticalPosition	«N/A» у 93 записах	Немає відомостей про рівень; 0 NULL
widthRoadway	−32768 у 93 записах	Неінтерпретована ширина; 0 NULL
roadNumber	«N/A» у 93 записах	Номер не визначено; 0 NULL
laneCount	1 у 93 записах	Фізично заповнене поле; 0 NULL

Джерело: складено за результатами дослідження.

Контроль результатів спрощення ліній

Алгоритм Дугласа – Пекера застосовано до ліній-кандидатів із допуском, що відповідає 0,1 мм у цільовому масштабі. Виміряно число вершин до і після, геометричні відхилення, збереження крайніх точок та простоту лінії. Результати 22 геометричних представлень наведено в таблиці Д.12.

Двовимірні перетини «дорога — дорога» і «дорога — вулиця» обліковуються окремо. Без відомостей про висотне положення перетин не вважається автоматично підтвердженим транспортним вузлом.

Таблиця Д.12 – Зміна числа вершин та геометричної точності

Масштаб	Об’єктів	Допуск, м	Вершин до / після	Максимальне відхилення, м
1:25 000	8	2,5	23 / 23	0,00
1:50 000	6	5,0	19 / 19	0,00
1:100 000	5	10,0	17 / 16	6,16
1:200 000	2	20,0	9 / 9	0,00
1:500 000	1	50,0	2 / 2	0,00
1:1 000 000	0	100,0	0 / 0	—

Джерело: контрольні вимірювання автором за алгоритмом Дугласа – Пекера [52].

Продовження таблиці Д.12 – Двовимірні перетини геометричних кандидатів typeRoad = 3

Масштаб	Пари Roads–Roads	Пари Roads–Streets	Підтвердження транспортних вузлів
1:25 000	3	1	лише 2D геометрія
1:50 000	2	1	лише 2D геометрія
1:100 000	2	1	лише 2D геометрія
1:200 000	1	1	лише 2D геометрія
1:500 000	0	1	лише 2D геометрія
1:1 000 000	0	0	не встановлено

Джерело: безпосередній геометричний контроль кандидатів та контекстного шару Streets; кількості означають пари геометрій, а не підтверджені транспортні вузли.

Зміну геометрії дороги з TOID 190618DB3129DCAF під час спрощення для масштабу 1:100 000 показано на рисунку Д.1.

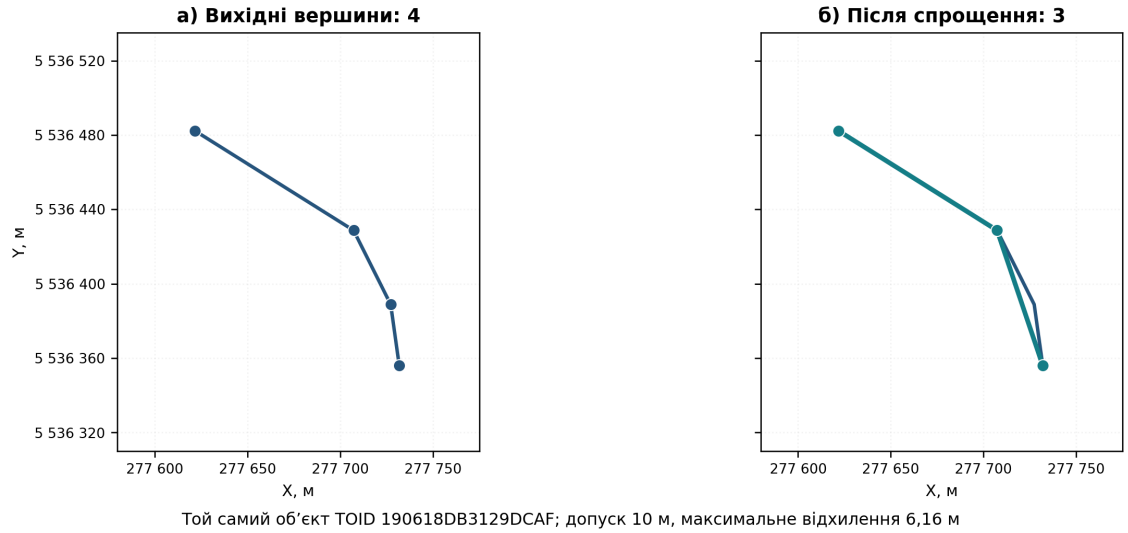


Рисунок Д.1 – Зміна геометрії дороги TOID 190618DB3129DCAF під час спрощення на рівні 1:100 000 (чотири та три вершини)

Джерело: розроблено автором за вихідною геометрією Roads у EPSG:9858 і виміряним результатом спрощення.

Порогові та топологічні перевірки

Контроль граничних значень довжини виконано для трьох синтетичних величин: $l_s - 0{,}01$ м, l_s і $l_s + 0{,}01$ м, де l_s — мінімальна довжина для масштабу s ($L_{min}(s)$ у пункті 2.2.2). Для кожного значення зафіксовано результат оператора порівняння та зіставлено відмінність строгого і нестрогого порогів. Фактичних об’єктів із довжиною точно на межі у вибірці не виявлено.

У сформованих даних перевірено унікальність складеного ключа, читабельність вихідних і похідних шарів та незмінність кінцевих точок.

Зафіксовано 99 точок перетину для 98 пар дорожніх ліній; одна пара перетинається двічі. Одиницею цього обліку є геометрична подія, а визначення транспортного вузла потребує відомостей про висотне розташування та зв’язність доріг.

Таблиця Д.13 – Контроль точних граничних значень довжини

Масштаб	l_s**, м**	$l_s - 0{,}01$ м	l_s	$l_s + 0{,}01$ м
1:25 000	25	ні	так	так
1:50 000	50	ні	так	так
1:100 000	100	ні	так	так
1:200 000	200	ні	так	так
1:500 000	500	ні	так	так
1:1 000 000	1 000	ні	так	так

Джерело: синтетичний контроль оператора порівняння у дослідній реалізації; це не результати обмірювання конкретних доріг.

Продовження таблиці Д.13 – Контроль збережених векторних шарів дослідного результату

Шар GeoPackage	**Записів**	**Призначення**
roads_source_audit	93	Вихідні геометрії, TOID, атрибути
streets_context	620	Незмінний контекст Streets (0403)
roads_type3_simplification	22	Кандидати typeRoad = 3 для шести масштабів
crossing_2d_candidates	99	Точки перетинів без інтерпретації транспортного рівня

Джерело: результат повторного відкриття окремого GeoPackage з результатами спрощення доріг; проєктована система координат EPSG:9858.

Д.4. Контроль водойм і ділянок водотоків: гідрографічні правила та геометрії

Структура та площі водойм

Для StandingWaterPOL встановлено 11 валідних полігонів із сумарною площею 13 971,73 м². У таблиці Д.14 наведено розподіл водойм за класифікаційними підтипами; відповідні результати масштабного відбору за площею подано в таблиці 3.7.

Вихідний точковий шар водойм у вибірці відсутній. Із полігонів сформовано 57 внутрішніх точок-кандидатів; їх використання залежить від масштабного відбору й допустимого способу зображення водойми.

Таблиця Д.14 – Характеристики площ водойм за класифікаційним типом

Код типу	Тип водойми	Кількість	Сумарна площа, м²	Найменша, м²	Найбільша, м²
3	Озера	1	1 570,33	1 570,33	1 570,33
4	Водосховища	2	4 382,68	2 100,77	2 281,91
5	Ставки	4	6 294,60	744,25	3 172,86
6	Басейни	4	1 724,12	145,15	838,98

Джерело: обчислено автором за геометрією StandingWaterPOL у EPSG:9858.

Контроль лінійних ділянок водотоків

Із п’яти вихідних ділянок водотоків атрибут width має службове значення −32768 у трьох записах. Невстановлену ширину не підмінено нулем. У таблиці Д.15 збережено окремі вихідні ділянки, їхні довжини та семантичні значення; дві ділянки виконують ширинну умову для 1:25 000, де мінімальну довжину не встановлено.

Зв’язність гідрографічної мережі та правила картографічної символізації перевіряли за окремими критеріями, не підмінюючи їх метричним відбором за двома критеріями.

Таблиця Д.15 – Вихідні характеристики ділянок Watercourse (0303)

TOID	typeWatercourse	Довжина, м	Ширина, м	Відповідність для 1:25 000
5C1289DA24C06848	1	1 053,97	н/в	Н/в
43ACAC7015BED6CE	2	181,69	н/в	Н/в
08CE10F5C7055083	2	112,35	н/в	Н/в
3AABB46B1D860C0D	2	223,62	3,0	Так
FE14722E20B1B36E	1	202,38	1,0	Так

Джерело: визначено автором за атрибутами та геометрією Watercourse у EPSG:9858.

Розміщення ділянок водотоків і повноту атрибута ширини для масштабу 1:25 000 показано на рисунку Д.2.

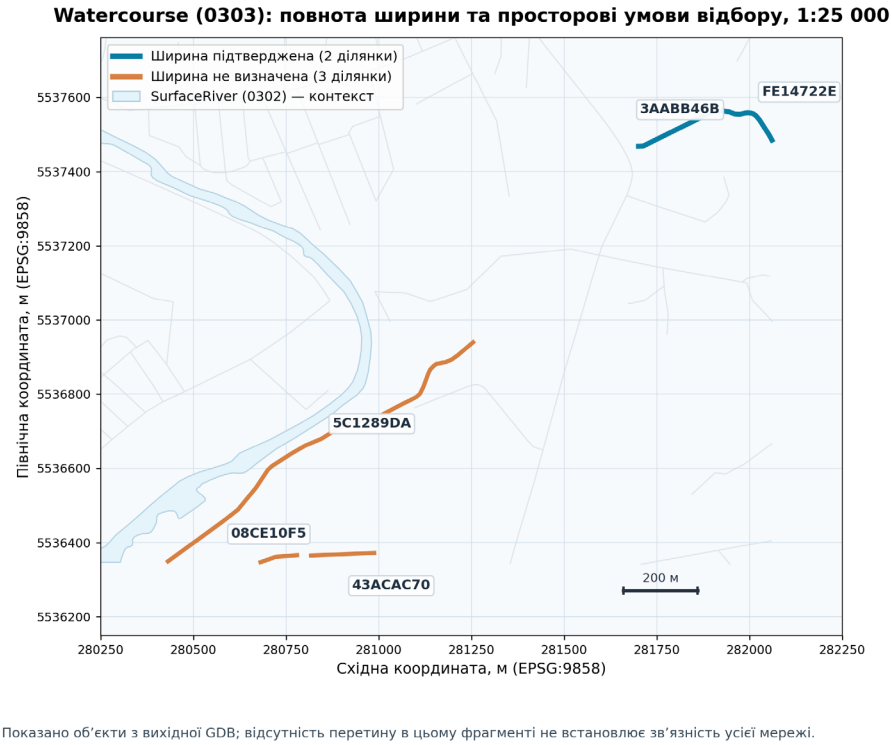


Рисунок Д.2 – Просторове розміщення Watercourse (0303) та повнота атрибута ширини в дослідному фрагменті для масштабу 1:25 000

Джерело: розроблено автором за вихідними геометріями Watercourse і SurfaceRiver в EPSG:9858.

Контроль геометричного спрощення й топології

Дві лінії водотоків, відібрані за шириною для 1:25 000 без обмеження мінімальної довжини, перевірено геометричним спрощенням із допуском 2,5 м. У таблиці Д.16 наведено числа вершин, відхилення та встановлені просторові співвідношення. Окремо враховано можливі міжкласові перетини та збереження вихідних TOID.

Таблиця Д.16 – Підсумкові показники геометричної перевірки

Показник перевірки	Встановлений результат
Ділянки та вершини до / після спрощення	2; 15 / 10
Допуск / найбільше геометричне відхилення	2,50 м / 1,53 м
Збереження кінцевих точок і валідності	Так, для обох ділянок
Пари накладань Watercourse / StandingWaterPOL	0 / 0

Показник перевірки	Встановлений результат
Перетини Watercourse зі StandingWaterPOL та SurfaceRiver	0 пар
Похідний векторний результат тестування	7 шарів гідрографічного GeoPackage; 9 полігональних і 57 точкових кандидатів StandingWater, 7 проміжних ліній та 2 підтверджені спрощені лінії Watercourse.
Тотожність і походження об’єктів	TOID та складені ключі без дублів; усі 57 точок-кандидатів усередині вихідних полігонів; 9 геометрій водойм і 2 вихідні лінії узгоджені з результатами перевірки.
Граничні контрольні сценарії	51 синтетичний тест: 18 для площі, 15 для довжини, 18 для ширини; строгі нерівності підтверджено.

Джерело: розраховано автором за вихідною File Geodatabase контрольного фрагмента та похідними геометріями у EPSG:9858.

Контроль сформованих векторних представлень

Отримані гідрографічні шари повторно відкрито з окремого гідрографічного GeoPackage. Таблиця Д.17 узгоджена з результатами відбору ділянок водотоків у таблиці 3.8; «н/в» означає невизначену ширину. У 1:25 000 довжину не обмежено, тому умова довжини охоплює всі п’ять ліній, із яких дві виконують ширинну умову.

Для ділянки FE14722E20B1B36E число вершин скорочено з 12 до 7. Виміряне максимальне відхилення становить 1,53 м за допустимих 2,5 м. Атрибутивну визначеність ширини інших ділянок контролювали незалежно від результатів геометричного спрощення.

Таблиця Д.17 – Сформовані представлення гідрографічних об’єктів у гідрографічному GeoPackage

Масштаб	Полігони (0301)	Точки-кандидати	Watercourse: довжина / н/в / обидва
1:25 000	8	3	5 / 3 / 2
1:50 000	1	10	1 / 1 / 0
1:100 000	0	11	1 / 1 / 0
1:200 000	0	11	0 / 0 / 0
1:500 000	0	11	0 / 0 / 0
1:1 000 000	0	11	0 / 0 / 0

Джерело: обчислено автором за фактично сформованими векторними геометріями контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

Приклад спрощення ділянки водотоку зі збереженням крайніх точок і TOID наведено на рисунку Д.3.

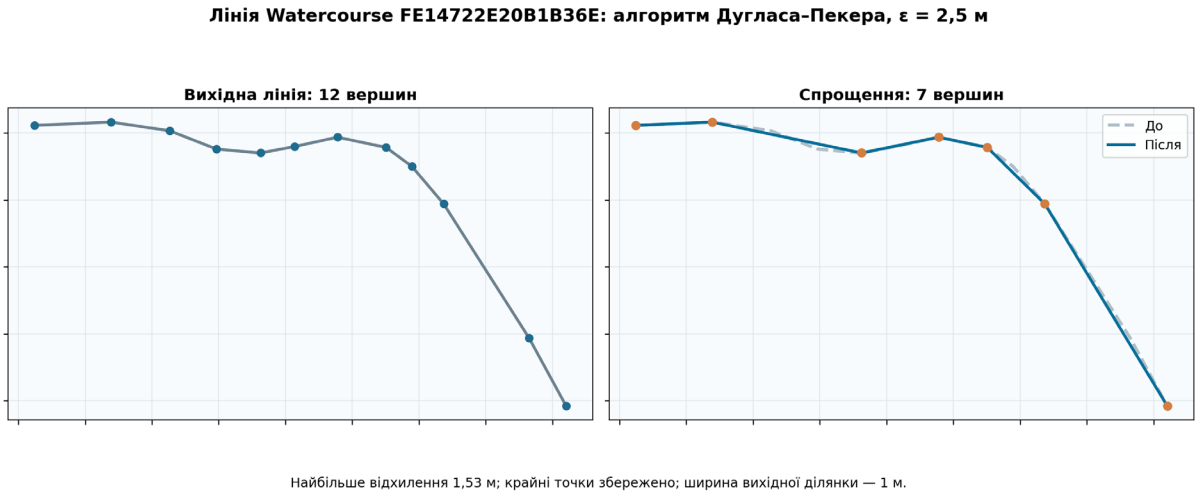


Рисунок Д.3 – Спрощення ділянки Watercourse (0303) зі збереженням крайніх точок і TOID

Джерело: розроблено автором за вихідною геометрією Watercourse та результатом алгоритму Дугласа – Пекера.

Д.5. Контроль деревної рослинності: геометричні представлення, семантика та картографічне представлення

Характеристика геометричних представлень об’єктів класу «Деревна рослинність» (Vegetation, код 0801)

Перевірено 59 вихідних полігонів VegetationPOL (58 валідних), чотири VegetationL та 2 482 VegetationP. Для 2 486 точкових і лінійних записів потрібне зіставлення вихідних кодів із цільовим переліком, за яким установлюють допустимі способи представлення рослинності.

Валідні полігони займають 1 280 275,67 м², а сукупна довжина вихідних ліній становить 797,65 м; дані стосуються контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000.

Контроль геометричного спрощення полігонів

Для 58 валідних VegetationPOL виконано відбір за площею і спрощення відібраних контурів на цільових масштабах. У таблиці Д.18 наведено кількість вершин і відносну зміну площі. Площі для цих розрахунків отримано з геометрії в метричній системі координат.

У 133 похідних геометричних представленнях VegetationPOL збережено TOID та індивідуальну валідність. Контроль міжоб’єктних меж розглянуто як окремий критерій топологічної узгодженості.

Таблиця Д.18 – Контрольні показники спрощення відібраних полігонів VegetationPOL

Масштаб	Полігонів	Допуск, м	Вершин до / після	Максимальна зміна площі
1:25 000	56	2,5	1 887 / 905	7,57 %
1:50 000	51	5,0	1 829 / 693	21,18 %
1:100 000	22	10,0	1 288 / 372	6,08 %
1:200 000	4	20,0	416 / 90	7,71 %
1:500 000	0	50,0	0 / 0	—
1:1 000 000	0	100,0	0 / 0	—

Джерело: обчислено автором за 58 валідними полігонами в EPSG:9858 із застосуванням алгоритму Дугласа – Пекера; невалідний контур виключено.

Вихідний і спрощений полігони деревної рослинності для масштабу 1:100 000 зіставлено на рисунку Д.4.

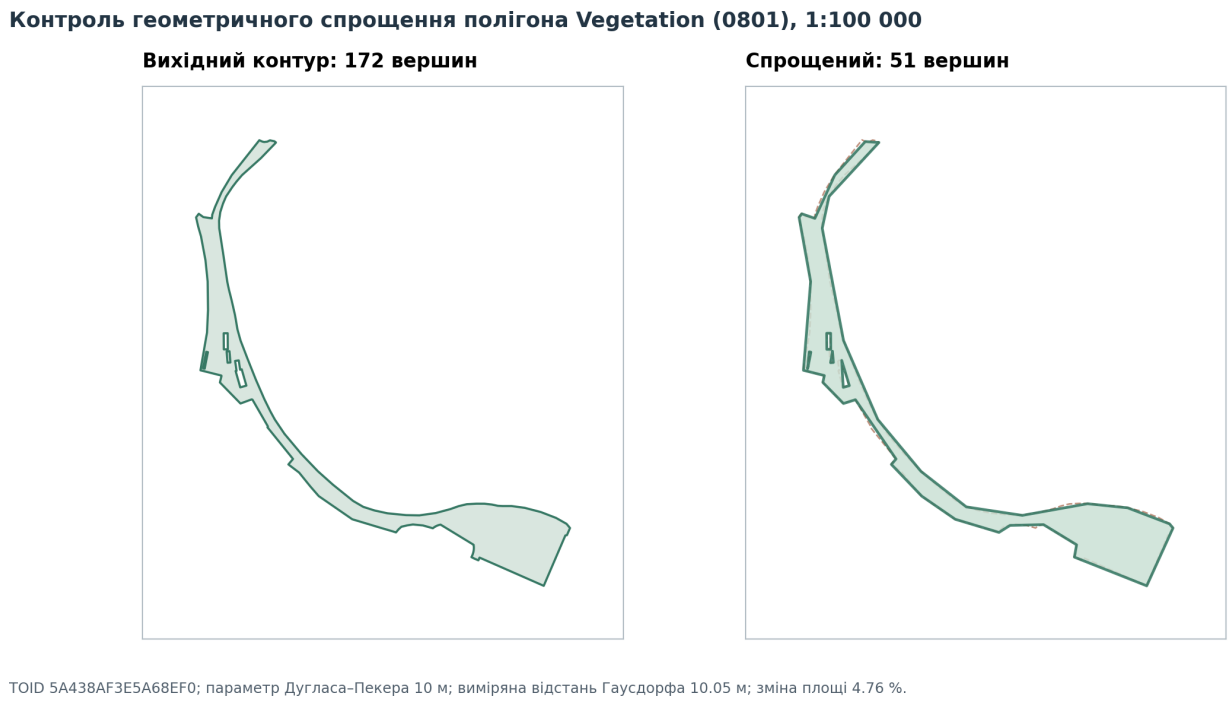


Рисунок Д.4 – Порівняння вихідного та спрощеного полігонів деревної рослинності (TOID 5A438AF3E5A68EF0) для масштабу 1:100 000

Джерело: розроблено автором за вихідною геометрією VegetationPOL та результатами її спрощення.

Передумови нормативного відображення точкових об’єктів VegetationP

Нормативне зображення поодиноких дерев залежить від класифікаційної належності та картографічної значущості. Проріджування VegetationP за відстанню досліджено окремо як спосіб керування геометричною щільністю точок.

Поле DistanceVegetation в описі атрибутів деревної рослинності визначає середню відстань між деревами в метрах у межах від 1 до 10 м [38, п. 4.10.2.1.3]. Ця характеристика деревостою не задає ні порога проріджування вихідних точок, ні мінімальної відстані між картографічними знаками. Тому її не використовують для нормативного обґрунтування діагностичної серії VegetationP, а наявність у вихідних даних типів 22 і 17 потребує самостійного зіставлення з цільовим класифікатором.

Код typeVegetation = 22 у вихідних точкових записах потребує зіставлення з CodeList проєкту Специфікацій (додаток А). Результати проріджування становлять окрему діагностичну серію; основні 3 408 геометричних кандидатів обліковано в таблиці 3.14.

Межі інтерпретації сформованих похідних записів деревної рослинності

Для деревної рослинності перевірено чотири групи сформованих результатів: полігональні кандидати, спрощені контури, внутрішні точки полігонів, менших за поріг площі, і вихідні точкові записи. Критерії для кожної групи залежать від її геометрії та семантичної визначеності.

Відбір за площею VegetationPOL подано в таблиці 3.9, розподіл основних кандидатів — у таблиці 3.14. Характеристики станів 1:100 000, оцінювання спрощення й діагностичну серію VegetationP розкрито в цьому пункті (табл. Д.18).

Контроль початкової геометричної та семантичної якості

Для вихідного полігона VegetationPOL з TOID 2D53E6E5B012B945 зафіксовано самоперетин кільця. Функцією ST_MakeValid СКБД PostGIS одержано валідну експериментальну геометрію; вихідний запис залишено без

змін, а до основної вибірки з 58 валідних полігонів цей контур не додавали (рис. Д.5).

Визначеність фізичного поля, його NULL, службове число −32768 і код поза класифікатором залишаються різними семантичними станами. У другій частині таблиці Д.1 вони зведені до єдиного контролю.

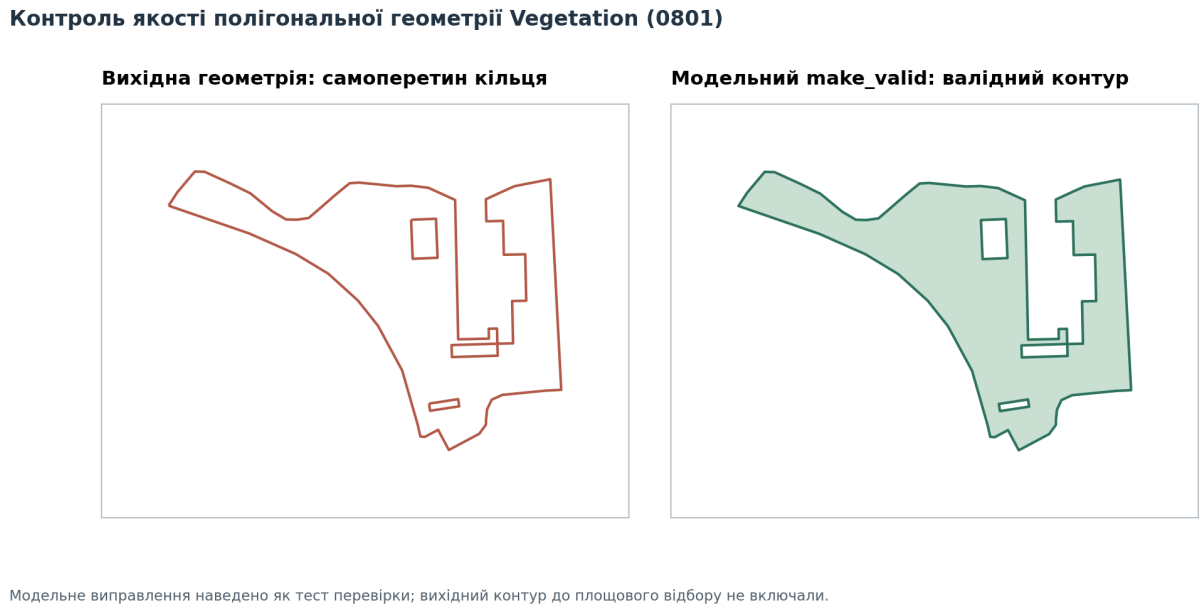


Рисунок Д.5 – Вихідний полігон із самоперетином та результат експериментального виправлення його геометрії

Джерело: розроблено автором за вихідним контуром VegetationPOL та результатом ST_MakeValid.

Д.6. Фрагменти реалізації прикладної схеми в PostgreSQL/PostGIS

Нижче наведено фрагменти SQL-коду, використаного в пунктах 3.1.6 і 3.2.8: батьківську таблицю абстрактного класу, таблицю класу «Будівлі» з успадкуванням, тризначний предикат відбору та спрощення осей вулиць зі збереженням вузлів мережі. Повні скрипти збережено в матеріалах експерименту.

```
CREATE TABLE app.topographic_object (
  gid char(16) NOT NULL, toid char(16) NOT NULL,
  feature_type_code char(4) NOT NULL,
  geom geometry(Geometry, 9858) NOT NULL,
  vertical_position varchar(16) NOT NULL,
  begin_lifespan_version timestamp NOT NULL,
  end_lifespan_version timestamp,
  upper_scale smallint CHECK (upper_scale BETWEEN 1 AND 6),
  symbol25k smallint, symbol50k smallint, symbol100k smallint,
  symbol200k smallint, symbol500k smallint, symbol1m smallint);
CREATE TABLE app.buildings (
  type_buildings smallint NOT NULL, status_building smallint,
  number_floors smallint CHECK (number_floors BETWEEN 0 AND 100),
```

```
  area double precision NOT NULL,
  CHECK (feature_type_code = '0501'))
  INHERITS (app.topographic_object);
-- P(c,s)(x): true, false або NULL (невизначено)
CREATE FUNCTION app.p_include(o app.topographic_object, s smallint)
RETURNS boolean AS $$ ... площа, довжина, тип і ширина
  за таблицею app.scale_rule; -32768 → NULL ... $$;
-- спрощення осей вулиць зі збереженням вузлів мережі
SELECT s.toid, ST_LineMerge(ST_Collect(ST_Simplify(p.geom, eps)))
FROM streets s LEFT JOIN street_nodes n USING (toid),
  LATERAL ST_Dump(ST_Split(ST_Snap(s.geom, n.nodes, 0.001),
                           n.nodes)) p
GROUP BY s.toid;
```

ДОДАТОК Е

Матеріали апробації картографічного оформлення та сервісів Національного геопорталу НІГД

Картографічні правила для шести досліджених класів визначено в проєкті документа «Специфікації наборів геопросторових даних топографічних карт масштабу 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000» [38]. Сервісні лічильники й графічні відповіді зіставлено зі сформованими станами, не ототожнюючи геометричних кандидатів із прийнятими представленнями.

Результати мережевих звернень звіряли зі сформованими масштабними наборами, враховуючи окремі одиниці обліку для растрового кадру, тайла, векторного запису та результату запиту кількості (resultType=hits) на відповідному рівні. Технічний успіх не замінює семантичного картографічного контролю.

У додатку систематизовано результати апробації картографічного оформлення та сервісів розроблених методів і моделей геовізуалізації на Національному геопорталі НІГД. Контроль охоплює похідні представлення з топографічних даних контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000, масштабно залежне картографічне оформлення, порівняння відповідей WMS і WMTS та об’єктне отримання даних через WFS. Метричні та геометричні результати узгоджено з підрозділами 3.2–3.4 і додатком Д.

Результати згруповано за змістом даних, формуванням картографічного зображення та функціональною взаємодією сервісів. Самостійний сценарій — підключення WMS Національного геопорталу в QGIS — виконано на шарах меж земельних ділянок [18].

Е.1. Контрольні масштабні представлення та картографічний перегляд

Вихідні дані та організація апробації сервісів

Вихідні геометрії контрольного фрагмента базової державної топографічної карти масштабу 1:10 000 використано для дослідження шести похідних масштабів. Подальшу перевірку сервісів виконано за станами, збереженими в GeoPackage з контролем їх походження та геометричної допустимості.

У технологічній перевірці використано ті самі масштабні представлення GeoPackage та функціональні компоненти Національного геопорталу НІГД. Для порівнянності відповідей контролювали масштаб, просторове охоплення, систему координат, формат зображення та об’єктну кількість. Операції GetMap, GetTile і GetFeature оцінювали за різними властивостями відповіді: растровим кадром, тайлом та геометрією з атрибутами.

Контрольні кількості представлень за похідними масштабами

У таблиці 3.14 наведено кількість основних геометричних кандидатів за масштабами, а в пункті Е.3 — повні кількості GeoPackage і WFS. Різниці становлять 2 563, 2 505, 1 801, 780, 198 і 61 запис для масштабів від 1:25 000 до 1:1 000 000 відповідно. Їх утворюють 2 482, 2 444, 1 767, 766, 197 і 60 діагностичних записів VegetationP та 81, 61, 34, 14, 1 і 1 діагностичний результат для доріг (разом 192).

Масштабне картографічне відображення у вебклієнті

Вебклієнт Національного геопорталу забезпечує вибір картографічної основи, зміну масштабу та сумісний перегляд шарів. Дослідні масштабні представлення перевірялися за однакового територіального охоплення. Розрізнення картографічного масштабу, масштабу екранного перегляду й рівня ZOOM збережено відповідно до моделей розділу 2 та результатів підрозділу 3.3.

Зіставлення картографічного змісту масштабу 1:100 000

Вибірка масштабу 1:100 000 містить 2 188 записів «об’єкт — масштаб», зокрема діагностичні записи VegetationP. Перевірка змісту охопила масштабні критерії, допустиму геометрію, TOID та правила оформлення Специфікацій [38]. У дослідній візуалізації зіставлено підготовлену геометрію зі стилями відповідних класів.

Е.2. Семантичні та геометричні умови картографічного оформлення й умови застосування умовних знаків

Контроль семантики, геометрії та масштабної символізації

Під час випробувань для кожного класу зіставляли результат відбору, допустиму геометрію, класифікаційні властивості й передбачений масштабний знак. Контрольні ситуації наведено в таблиці Е.1. Параметрична символізація застосовувалася після перевірки сумісності геометрії та семантики; для невизначених вихідних кодів зберігався відповідний стан контролю.

Таблиця Е.1 – Матриця контрольних станів масштабно залежного картографічного оформлення

Умова	Очікуване рішення	Результат контролю / клас перевірки
Похідна геометрія придатна, семантика і код знака сумісні	Дозволити застосування параметричного правила після топологічного контролю	Позитивна семантична умова
Полігон малий, але картографічна значущість невідома	Зберегти невизначеність, не прирівнювати до вилучення	Buildings; StandingWater
TypeBuildings = 1; потрібна точка на 1:25 000	Перевірити спеціальну вимогу GM_Polygon у таблиці А.5	Сценарій за правилом, не факт у вибірці
typeBuildings = 2, поле BuildingUse відсутнє	Не вибирати автоматично житлову або нежитлову гілку	BuildingsPOL, фактичні дані

Умова	Очікуване рішення	Результат контролю / клас перевірки
Код підтипу не входить до нормативного CodeList	Зупинити застосування семантичного рядка	VegetationP / VegetationL
Атрибут Width невідомий (значення −32768)	Не класифікувати як ширину −32768 м	Watercourse
Масштабну геометрію сформовано, але порушена топологія	Повернути конфлікт перед символізацією	Blocks; відомі експериментальні агрегати
Є растровий кадр, але немає походження стилю	Не робити висновку про нормативну відповідність символів	Контроль походження графічного оформлення

Джерело: розроблено автором за результатами пооб’єктної експериментальної перевірки та правилами контролю прикладних моделей розділу 2.

Результати перевірки семантичних характеристик вихідної бази топографічних даних наведено в таблиці Е.2.

Таблиця Е.2 – Перевірка семантичних характеристик вихідної бази топографічних даних

Клас	Значення у вихідному наборі	Відповідність Специфікаціям / результат
BuildingsPOL	typeBuildings: 2 — 9 115; 4 — 37; 20 — 24; усього 9 176	Для умов табл. А.5 додатково потрібне поле BuildingUse; фізичної відповідності не встановлено
BuildingsP	typeBuildings: 2 — 4 022; 9 — 13; усього 4 035	Це первинні точки, не автоматично утворені у поточному експерименті
VegetationPOL	typeVegetation = 1 для 59 полігонів; 58 геометрій валідні	Код 1 входить до нормативного CodeList
VegetationP	typeVegetation = 22 для 2 482 точок	Код 22 відсутній у наведеному в співавторській праці переліку
VegetationL	typeVegetation = 17 для 4 ліній	Код 17 відсутній у наведеному в співавторській праці переліку
Watercourse	width = −32768 для 3 об’єктів, 3 м та 1 м — по одному	Потрібне трактування невизначеності трьох значень

Джерело: результати автора за вихідною File Geodatabase, атрибутами й класифікаційними довідниками досліджених прикладних моделей.

Критерії та результати перевірки масштабного картографічного представлення зведено в таблиці Е.3.

Таблиця Е.3 – Критерії та результати перевірки масштабного картографічного представлення

Складова контролю	**Перевірювана властивість**	**Результат апробації**
відбір за площею	Геометрична валідність, метрична площа й масштабний поріг	Результати отримано для Buildings, Blocks, StandingWater, Vegetation
Геометрія та умовний знак	Допустимий тип геометрії, код знака і семантичний рядок Специфікацій	Розмежовано геометричну придатність і семантичну відповідність
Міжоб’єктна топологія	Просторові перетини, зв’язність і походження TOID/Lin	Контроль виконано; в агрегатах Blocks виявлено характерні перетини зі Streets
Параметричне оформлення	Картографічні параметри, густота знаків і масштабна залежність	Апробовано контроль графічних конфліктів, зокрема VegetationP
Сервісні відповіді	Фактичні GetMap, GetTile та GetFeature для відповідних станів даних	Підтверджено узгоджені відповіді WMS, WMTS і WFS у досліджених сценаріях

Джерело: узагальнено автором за результатами розділу 3 та стандартами WMS, WMTS і WFS [32; 34; 35].

Результати контролю параметричного оформлення та графічних конфліктів

Діагностичне дослідження модельних кругових знаків VegetationP виявило залежність графічних колізій від діаметра знака й густоти точок на шести масштабних рівнях. Цей результат характеризує читабельність зображення. Нормативний відбір поодиноких дерев додатково потребує встановлення їхнього семантичного типу та картографічної значущості.

Таблиця Е.4 – Результати перевірки умов картографічного представлення шести досліджених класів

Клас	Доказ геометричної придатності	Результат семантичного контролю
Buildings 0501	1 548 полігонів у 1:25 000	Зафіксовано відсутність прямого поля BuildingUse у вихідному фізичному шарі
Blocks 0402	519 полігонів у 1:25 000; 15 груп у 1:100 000	У дослідних агрегатах перевірено взаємодію контурів із вуличною мережею
Roads 0601	89 ділянок за довжиною у 1:25 000	Тип дороги й мережева зв’язність контролюються окремо від довжини
StandingWater 0301	8 полігонів у 1:25 000	Для точкового представлення враховується семантична значущість водойми
Watercourse 0303	2 лінії за шириною у 1:25 000	Для трьох із п’яти ліній виявлено невизначену ширину
Vegetation 0801	56 полігонів у 1:25 000	Встановлено потребу зіставлення кодів точок і ліній із CodeList

Джерело: результати автора за пооб’єктними перевірками пунктів 3.2.1–3.2.5 і контролем картографічного оформлення підрозділу 3.4.

Е.3. Перевірки сервісів WMS, WMTS і WFS та параметри запитів

Контроль сервісних операцій WMS, WMTS та WFS

Функціональна апробація охопила описи можливостей сервісів GetCapabilities, растрові запити GetMap, тайлові відповіді GetTile, опис типів DescribeFeatureType та вибірки GetFeature. Окремо перевіряли GetFeatureInfo і оброблення некоректних параметрів звернень. Результати для контрольних представлень контрольного фрагмента відтворювалися в підготовленій сервісній конфігурації; перевірку WMS у QGIS на шарах меж земельних ділянок досліджено як самостійний сценарій взаємодії з Національним геопорталом [18].

Перевірені сервісні операції та типи відповідей перелічено в таблиці Е.5.

Таблиця Е.5 – Перевірені сервісні операції та типи відповідей

Канал	Операції	Вихід
WMS	GetCapabilities; GetMap; GetFeatureInfo	XML, PNG, атрибутивна відповідь
WMTS	GetCapabilities; GetTile	XML, PNG 256 × 256 px
WFS	GetCapabilities; DescribeFeatureType; GetFeature	XML, XML Schema, GeoJSON

Джерело: систематизовано автором за функціональними випробуваннями WMS, WMTS, WFS та дослідженням WMS Національного геопорталу [18].

Зіставлення контрольних кількостей WFS з даними GeoPackage

Операцією GetFeature (resultType=hits) перевірено кількості для масштабів 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000 та 1:1 000 000. Отримано відповідно 4 704, 3 327, 2 188, 837, 199 і 61 запис. Сума становить 11 316 та збігається з кількістю станів, збережених у GeoPackage. Зіставлення об’єктних відповідей з атрибутами й TOID підтвердило узгодженість даних для досліджених сервісних сценаріїв (підрозділ 3.5).

Зіставлення растрових відповідей GetMap та GetTile

За однакових параметрів просторового охоплення, системи координат і розмірів зображень виконано попарне порівняння шести відповідей GetMap та GetTile. Усі шість пар виявилися побайтово тотожними. Такий результат підтверджує погоджене формування картографічного кадру й відповідного тайлового представлення у виконаних тестах.

Паспорт сервісних випробувань

Параметри тестової конфігурації сервісів, вхідний масштабний набір, перевірені операції та результати автоматизованого контролю узагальнено в таблиці Е.6. У ній також зафіксовано засоби простежуваності використаних даних і растрових відповідей.

Таблиця Е.6 – Параметри та результати функціональних випробувань

Параметр	Зафіксований результат
Технологічна основа	Програмно-технологічні компоненти Національного геопорталу НІГД; тестова конфігурація сервісів
Вихідна вибірка	GeoPackage з 11 316 масштабних представлень шести похідних масштабів
Виконані операції	WMS (GetCapabilities, GetMap, GetFeatureInfo); WMTS (GetCapabilities, GetTile); WFS (GetCapabilities, DescribeFeatureType, GetFeature)
Функціональні перевірки	32 успішні перевірки із 32
Окремий HTTP-контроль	3 успішні відповіді HTTP 200
Простежуваність даних	Контрольні SHA-256 для GeoPackage і PNG-відповідей
Результат порівняння	Узгоджені відповіді GetMap / GetTile та об’єктні GetFeature

Джерело: укладено автором за результатами сервісних перевірок, контрольними даними GeoPackage та машинозчитуваними матеріалами експерименту.

Е.4. Інтеграційна апробація та зіставлення перевірених результатів

Комплексна перевірка узгодженості картографічних і сервісних компонентів

Під час інтеграційної апробації перевірено послідовність формування похідних геометричних представлень, застосування масштабних правил оформлення, відображення у вебклієнті та доступу через сервіси до картографічних і векторних даних. Пооб’єктні результати, картографічні відповіді й перевірки WMS, WMTS та WFS утворили взаємопов’язаний цикл реалізації досліджених методів і моделей на Національному геопорталі НІГД. Узагальнення наведено в таблиці Е.7.

Таблиця Е.7 – Склад результатів комплексної апробації

Напрям перевірки	Результат контролю
Пооб’єктні геометрії	Похідні масштаби, GeoPackage та TOID/Lin; перевірено простежуваність
Стани масштабної генералізації	відбір за площею й довжиною, геометричне спрощення та контроль топології
Контроль WMS	Картографічні PNG GetMap і відповіді GetFeatureInfo
Контроль WMTS	GetTile; шість попарно тотожних зображень GetMap / GetTile
Контроль WFS	GeoJSON GetFeature; контрольні кількості 4 704, 3 327, 2 188, 837, 199, 61
Повторюваність	Машинозчитувані дані випробувань і контрольні SHA-256

Джерело: узагальнено автором за матеріалами підрозділів 3.2–3.6 та виконаними картографічними й сервісними випробуваннями.

Е.5. Оригінальні зразки умовних знаків

Оригінальні зразки картографічних знаків

На рисунку Е.1 відтворено п’ять автентичних фрагментів каталогу умовних знаків Специфікацій [38]. Вони показують форму знаків будівель, кварталів, водотоків, доріг і дерев-орієнтирів; графічні розміри в оригінальних підписах наведено в міліметрах. Фрагменти збільшено для читання, тому їхні фізичні розміри на цій сторінці не є еталоном друку знака. Семантичні рядки та межі застосування зіставлено в таблиці Е.4.

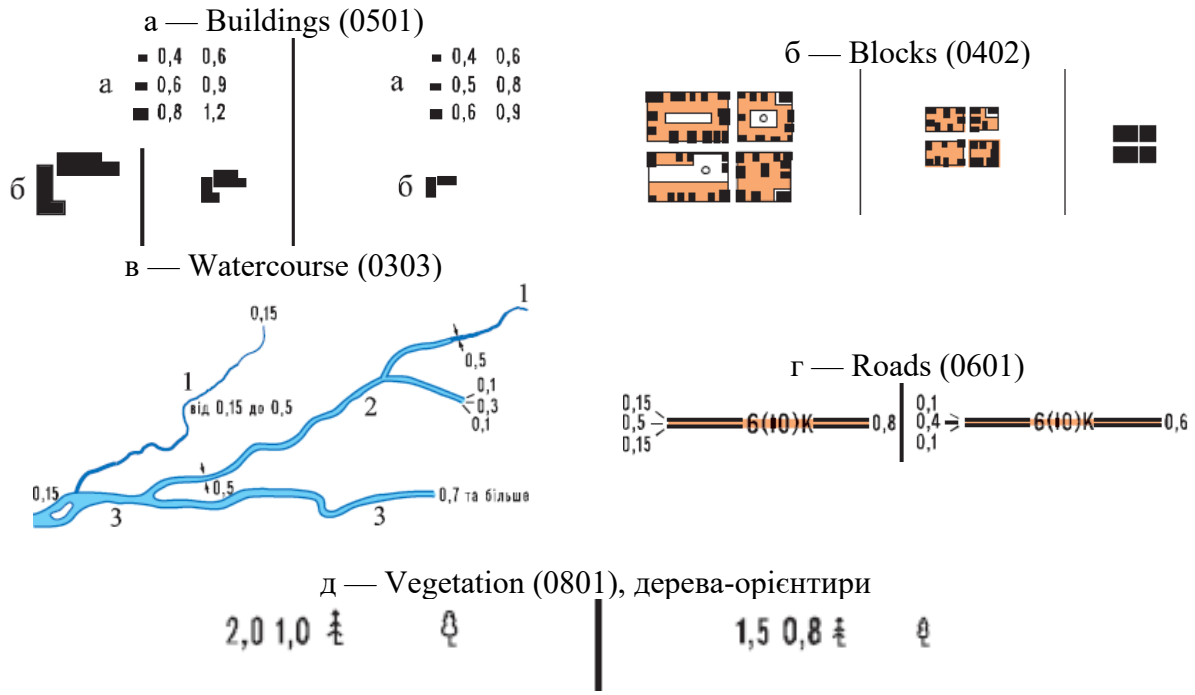


Рисунок Е.1 – Оригінальні зразки умовних знаків із проєкту Специфікацій (додаток А): а — будівлі; б — квартали; в — водотоки; г — дороги; д — дерева-орієнтири

Джерело: фрагменти таблиць А.5, А.4, А.3, А.6 та А.8 Специфікацій [38, с. 636, 633, 615, 646, 670 відповідно]; збережено оригінальний графічний зміст.