

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

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

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

Пилипенко Світлана Миколаївна кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанної справи та туризму, ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0002-2034-8552>

Мась Андрій Юльянович старший викладач кафедри геодезії та землеустрою, ПЗВО «Міжнародний класичний університеті імені Пилипа Орлика», м. Миколаїв, <https://orcid.org/0000-0003-1140-2817>

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

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА КЛАСИФІКАЦІЯ СУПУТНИКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОБУДОВИ 3-D МОДЕЛЕЙ ТЕРИТОРІЙ ТА ВИКОНАННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ЗЙОМОК У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти формування багатокритеріальної класифікації супутникової інформації для задач побудови тривимірних моделей територій та виконання топографічних зйомок у середовищі геоінформаційних систем. Актуальність дослідження зумовлена

ISSN 2786-6025 Online

стрімким зростанням обсягів і різноманітності даних дистанційного зондування Землі, що використовуються у геодезії, землеустрої та цифровому картографуванні, а також необхідністю підвищення обґрунтованості їх відбору для забезпечення точності та достовірності 3-D моделювання. Проаналізовано сучасні наукові публікації, присвячені класифікації аерофотограмметричних хмар точок, об'єктно-орієнтованому аналізу зображень, інтеграції оптичних, радарних та LiDAR-даних, а також застосуванню інтерферометрії SAR для формування цифрових моделей рельєфу. Встановлено, що більшість існуючих підходів орієнтована на окремі ознаки супутникових даних і не враховує комплексну взаємодію їх фізичних, геометричних, спектральних та часових характеристик у задачах тривимірного моделювання.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розроблення багатокритеріальної системи класифікації супутникової інформації, орієнтованої на оптимізацію процесів створення цифрових моделей рельєфу, цифрових моделей поверхні та комплексних 3-D моделей територій у геоінформаційному середовищі.

Запропоновано структуру класифікації, що охоплює такі взаємопов'язані блоки критеріїв: фізична природа і тип сенсора; просторове розрізнення та масштабна відповідність; геометричні параметри знімання; спектральні й радіометричні характеристики; часові особливості та періодичність зйомки; функціональна придатність даних на різних етапах формування тривимірних моделей.

Обґрунтовано, що поєднання зазначених критеріїв дозволяє здійснювати науково виважений відбір супутникової інформації з урахуванням вимог до точності, детальності та тематичного наповнення топографічних матеріалів.

Показано, що інтеграція багатокритеріальної класифікації у структуру геоінформаційних систем сприяє формуванню розширених моделей метаданих, автоматизації процедур вибору оптимальних джерел даних та мінімізації похибок, пов'язаних з невідповідністю характеристик знімків поставленим завданням.

Реалізація запропонованого підходу забезпечує підвищення ефективності тривимірного геоінформаційного моделювання, узгодженість просторових шарів у базах даних та раціональне використання ресурсів дистанційного зондування Землі.

Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку та деталізації багатокритеріальних класифікаційних моделей як необхідної умови забезпечення високої якості та достовірності 3-D моделей територій у сучасних геоінформаційних технологіях.

Ключові слова: супутникова інформація, багатокритеріальна класифікація, 3-D моделювання територій, просторові бази даних.

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

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

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

Pylypenko Svitlana Candidate of Technical Sciences, Docent, Associated Professor of Department of Hotel and Restaurant Management and Tourism, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0000-0002-2034-8552>

Mas Andriy Senior Lecturer of the Department of Geodesy and Land Management, Pylyp Orlyk International Classical University, Mykolaiv, <https://orcid.org/0000-0003-1140-2817>

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

MULTI-CRITERION CLASSIFICATION OF SATELLITE INFORMATION FOR THE PURPOSES OF CONSTRUCTING 3-D MODELS OF TERRITORIES AND PERFORMING TOPOGRAPHICAL SURVEYS IN GEOINFORMATIC INFORMATION SYSTEMS

Abstract. The article examines the theoretical and applied aspects of developing a multi-criteria classification of satellite information for the tasks of three-dimensional territorial modeling and topographic surveying within geoinformation systems. The relevance of the study is based on the rapid growth in both the volume and diversity of Earth remote sensing data used in geodesy, land management, and digital cartography, as well as the need to improve the scientific validity of their selection in order to ensure the accuracy and reliability of 3-D modeling. Contemporary scientific publications devoted to the classification of aerial photogrammetric point clouds, object-based image analysis, integration of optical, radar, and LiDAR data, and the application of SAR interferometry for generating

ISSN 2786-6025 Online

digital elevation models are analyzed. It is established that most existing approaches focus on individual characteristics of satellite data and do not account for the complex interaction of their physical, geometric, spectral, and temporal properties in the context of three-dimensional modeling tasks.

The aim of the study is the theoretical substantiation and development of a multi-criteria classification system for satellite information oriented toward optimizing the processes of creating digital elevation models, digital surface models, and comprehensive 3-D territorial models within a geoinformation environment. A classification structure is proposed that encompasses the following interrelated groups of criteria: physical nature and sensor type; spatial resolution and scale compliance; geometric parameters of acquisition; spectral and radiometric characteristics; temporal features and acquisition frequency; and functional suitability of data at different stages of three-dimensional model generation. It is substantiated that the combination of these criteria enables a scientifically grounded selection of satellite information, taking into account requirements for accuracy, level of detail, and thematic content of topographic materials.

It is demonstrated that the integration of a multi-criteria classification into the structure of geoinformation systems facilitates the formation of extended metadata models, the automation of optimal data source selection procedures, and the minimization of errors associated with the mismatch between image characteristics and assigned tasks. The implementation of the proposed approach ensures increased efficiency of three-dimensional geoinformation modeling, consistency of spatial layers within databases, and rational use of Earth remote sensing resources. The obtained results confirm the expediency of further development and refinement of multi-criteria classification models as a necessary condition for ensuring high quality and reliability of 3-D territorial models in modern geoinformation technologies.

Keywords: satellite information, multi-criteria classification, 3-D territorial modeling, spatial databases.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку геодезії, землеустрою та геоінформаційних систем характеризується стрімким зростанням обсягів та різноманітності супутникової інформації, що використовується для вирішення прикладних і наукових завдань просторового моделювання. Активне впровадження технологій дистанційного зондування Землі з орбітальних платформ зумовило істотне підвищення точності, оперативності та економічної ефективності отримання вихідних даних для створення цифрових моделей рельєфу, цифрових моделей поверхні та комплексних тривимірних моделей територій. У цьому контексті супутникові дані поступово трансформуються з допоміжного джерела картографічної інформації у базовий інструмент формування геопросторових ресурсів.

Застосування супутникових знімків у процесах топографічного знімання та 3-D моделювання територій охоплює широкий спектр технологічних операцій – від первинної фотограмметричної обробки та геометричної корекції до інтеграції результатів у структури просторових баз даних геоінформаційних систем. Водночас різноманіття сенсорів, спектральних діапазонів, просторових розрізень, орбітальних параметрів та режимів знімання формує складну систему характеристик супутникової інформації, що безпосередньо впливають на точність і достовірність побудованих тривимірних моделей. Неврахування цих особливостей може призводити до систематичних похибок у відтворенні морфології рельєфу, спотворення геометрії об'єктів забудови та зниження якості топографічних матеріалів.

Особливої актуальності набуває проблема раціонального відбору супутникових даних залежно від цілей моделювання, масштабу картографування, характеру території та вимог до кінцевого продукту. Для урбанізованих територій пріоритетними можуть виступати знімки надвисокої просторової розрізненості зі стереоскопічними можливостями, тоді як для регіонального аналізу рельєфу доцільним є використання радарних інтерферометричних даних або матеріалів середньої розрізненості з високою радіометричною стабільністю. Таким чином, ефективність процесу побудови 3-D моделей значною мірою визначається здатністю дослідника систематизувати наявні джерела інформації та співвіднести їх параметри з вимогами конкретного проєкту.

У науковій літературі традиційно застосовуються класифікації супутникових даних за окремими ознаками – типом сенсора, спектральним діапазоном, просторовим розрізненням або призначенням. Проте такі підходи здебільшого мають фрагментарний характер і не враховують комплексну взаємодію технічних, геометричних та функціональних параметрів у задачах тривимірного моделювання. В умовах інтеграції супутникових матеріалів з результатами наземних геодезичних вимірювань, даними безпілотних літальних апаратів та матеріалами лазерного сканування виникає потреба у формуванні багатокритеріальної системи класифікації, здатної відобразити багатовимірну природу сучасних геопросторових даних.

Крім того, середовище геоінформаційних систем висуває додаткові вимоги до структуризації супутникової інформації.

Дані повинні бути впорядковані з урахуванням їх масштабної відповідності, точнісних характеристик, сумісності з існуючими моделями даних та можливостей подальшого аналізу. Відсутність розгорнутої системи класифікації ускладнює побудову логічно узгоджених просторових баз даних, оптимізацію алгоритмів обробки та автоматизацію процедур генерації 3-D моделей територій.

Таким чином, формування багатокритеріальної класифікації супутникової інформації виступає не лише теоретичним завданням систематизації знань, але й практичною передумовою підвищення ефективності топографічних зйомок та тривимірного геоінформаційного моделювання. Для забезпечення результативної роботи з геопросторовою інформацією однією з ключових умов є наявність розширених та адаптованих до прикладних потреб варіантів класифікації, у зв'язку з чим розробка їх удосконалених та деталізованих моделей набуває особливої актуальності в сучасних дослідженнях..

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи наявні наукові публікації з розглядуваної тематики можна згадати дослідження [1], яке пропонує підхід до побудови класифікаторів для аерофотограмметричних 3-D хмар точок з використанням поєднання геометричних і кольорових ознак. Автори демонструють високу швидкодію та хорошу здатність до узагальнення на різних наборах даних, що робить метод придатним для оперативного класифікування великих масивів даних при створенні DSM/DTM і підготовці топографічних матеріалів. Основною перевагою є практична придатність та масштабованість алгоритму для великих аерофотограмметричних проєктів; недоліком є зниження точності на ділянках з малою щільністю точок або однорідною текстурою (наприклад, водна гладь або густі крони дерев), що потребує додаткової попередньої обробки або залучення додаткових джерел даних.

Стаття [2] описує OBIA-процедури, які інтегрують високо-розрізнену оптичну зйомку, дані LiDAR і кадастрові шари для уточненої тематичної класифікації міського простору. Автори підкреслюють переваги об'єктного підходу при диференціації забудови, зелених насаджень і транспортної інфраструктури, а також демонструють як така класифікація підвищує якість вхідних даних для 3-D моделювання будівель і поверхні. Сильною стороною є висока тематична деталізація та можливість інтеграції різних джерел; слабе місце – значна залежність від наявності якісних LiDAR-даних і точних кадастрових шарів, через що підхід менш придатний у районах з обмеженим доступом до додаткових джерел.

Наступний матеріал [3] (супровідний до наукових публікацій) фокусується на поєднанні геометричних ознак (горизонтальність, кривизна, висота) та радіометричних характеристик для семантичної розмітки пунктів хмар точок. Позитивний аспект полягає в доказаному прирості точності при додаванні кольорових ознак до геометричних, що є важливим для перетворення результуючого DSM/DTM у тематично насичені 3-D карти. Недолік полягає у тому, що методика вимагає ретельної калібровки порогів та вибору ознак для різних типів місцевості, що ускладнює її повну автоматизацію без апробації на конкретній території.

У одній з ранніх праць [4] розглянуто питання інтеграції різнорідних просторових джерел (аерофотозйомка, топографічні карти, ВПА-зйомка) для поліпшення класифікації 3-D хмар точок. Ключовою перевагою є концептуальна рамка комбінування джерел для підвищення надійності тематичних міток і корекції похибок фотограмметричного відтворення; основним недоліком тут виступає дещо застарілий інструментарій та обмежена автоматизація, оскільки час публікації передував широкому впровадженню сучасних методів машинного навчання й глибокого навчання.

Стаття [5] систематично порівнює оптичні (включно з надвисокою роздільністю), радарні (InSAR) та LiDAR-джерела з точки зору придатності для генерації DEM/DSM, розглядаючи також аспекти тематичної класифікації поверхні як проміжного кроку для фільтрації об'єктів (будівлі, рослинність) під час отримання «чистих» моделей рельєфу. Позитивною стороною тут є всебічне порівняння з чітко визначеними метриками (точність, покриття, вартість); недоліком є те, що загальні рекомендації іноді виявляються занадто узагальненими для специфічних локальних умов (наприклад, складні урбанізовані крайові території і т.п.), отже потрібні локальні апробації.

Авторами [6] проаналізовано методи інтерферометричного оброблення SAR-даних для побудови DEM і обговорено роль тематичної класифікації поверхні (наприклад, відокремлення вегетації та міських об'єктів) у підвищенні якості кінцевих цифрових моделей. Сильною стороною може вважатися демонстрація можливостей InSAR у всепогодних умовах та великих масштабах. Недолік полягає у тому, що InSAR чутливий до тих типів покриття, де виникає «декореляція» (габаритні зміни поверхні, високі крони дерев), а також потребує складної корекції атмосферних ефектів і ретельної фільтрації, що ускладнює пряме застосування без тематичної класифікації.

У статті [7] представлено гібридний підхід, який поєднує InSAR-алгоритми з сегментацією оптичних зображень для покращення побудови високорозрізнених DEM. Позитивом тут можна вважати те, що запропонована тематична сегментація оптичних даних дозволяє підвищити стабільність та точність DEM, зменшивши вплив рослинності та міських структур. Недоліком є те, що метод вимагає узгодження геометрії та часових інтервалів між оптичними і радарними знімками, що не завжди можна здійснити для історичних або неперехресних наборів даних.

Дослідження [8] порівнює DEM, створені з різних джерел (оптичне стерео, InSAR, LiDAR), приділяючи увагу ролі попередньої тематичної класифікації річкових берегів і розливних зон при зменшенні похибок в гідрологічних моделях. Позитивною особливістю роботи є детальний експериментальний аналіз і кількісна оцінка похибок у контексті конкретної прикладної задачі, але у якості недоліку можна зазначити, що результати

ISSN 2786-6025 Online

сильно прив'язані до тестової річкової ділянки і потребують перевірки на інших типах ландшафтів та масштабах.

У статті [9] показано, як класифікація супутникових знімків може слугувати основою для коректної сегментації елементів поверхні та подальшого витягання морфометричних параметрів з 3-D моделей. Позитивною є практична демонстрація послідовності робіт від класифікації до побудови 3-D в інтегрованому GIS-процесі, але тут можна зазначити, що публікації в форматі препринта/конференційної доповіді інколи містить обмежену кількість перевірок на зовнішніх базах даних, отже була б дуже бажаною додаткова рецензована апробація.

Стаття [10] присвячена алгоритмічним аспектам побудови процедур OBIA для тематичної класифікації місцевості, з акцентом на застосування результатів класифікації як вхідних масивів для генерації 3-D моделей території та картографічних продуктів. Позитивною рисою тут є те, що збережено фокус на практичній реалізації процедур з прикладами продуктивності, але в той же час більшість тестів виконано на обмеженому наборі сцен і потребує ширшого тестування в умовах змінного освітлення та сезонності.

В дослідницькій статті (огляді) [11] аналізуються підходи по злиттю OBIA і LiDAR-даних для покращення тематичної класифікації 3-D об'єктів і відокремлення наземної поверхні від надземних структур. Перевагою є чітке виявлення синергії двох типів даних для цілей точного DTM/DSM, але як недолік можна сказати, що інтеграція часто ускладнюється неточностями у ранжуванні систем координат та неоднорідною щільністю LiDAR, що вимагає додаткових кроків попередньої підготовки.

Нарешті, набір публікацій і бенчмарк-даних [12] демонструє сучасні підходи до семантичної класифікації супутникових/аерофотознімків і їхнього використання для відновлення 3-D структури урбанізованих територій. Великим плюсом є те, що доступні стандартизовані набори для тренування і тестування класифікаторів, що сприяє порівняльності методів. Недоліком можна вважати те, що бенчмарки зазвичай орієнтовані на специфічні урбанізовані сцени і можуть не у достатньо повній мірі представляти сільські або змінні ландшафти.

У якості висновку можна сказати, що зібрані роботи і технічні звіти підтверджують, що класифікація супутникової та сумісної геопросторової інформації є ключовим компонентом у процесі підготовки якісних 3-D моделей територій і при виконанні топографічних зйомок. Переважна більшість джерел демонструє вигоди від багатоканальної/багатоджерельної класифікації (поєднання геометричних, радіометричних, спектральних та тематичних ознак) для фільтрації артефактів і підвищення точності DEM/DSM/3-D моделей. Водночас практичні обмеження (залежність від наявності LiDAR, часової узгодженості

радарних і оптичних знімків, чутливість InSAR до декореляції, потреба в локальній калібровці класифікаторів) вказують на необхідність подальшого розвитку багатокритеріальних і адаптивних схем класифікації. Отже, для ефективної роботи з геопросторовою інформацією однією з умов є наявність розширених варіантів класифікації; у зв'язку з цим актуальною є розробка детальних, адаптивних і стандартизованих багатокритеріальних моделей класифікації, які поєднуюватимуть переваги різних сенсорів і забезпечуватимуть відтворюваність результатів у різних ландшафтних та технічних умовах.

Мета статті – теоретичне обґрунтування та розроблення багатокритеріальної системи класифікації супутникової інформації, орієнтованої на вирішення задач побудови 3-D моделей територій та виконання топографічних зйомок у середовищі геоінформаційних систем, з урахуванням технічних характеристик сенсорів, просторово-геометричних параметрів знімання, радіометричних і спектральних особливостей даних, а також їх функціональної придатності для формування цифрових моделей рельєфу і поверхні.

Досягнення поставленої мети передбачає систематизацію існуючих підходів до класифікації супутникових даних, виявлення їх обмежень у контексті тривимірного геоінформаційного моделювання, формування розширеної структури класифікаційних ознак та обґрунтування критеріїв відбору оптимальних типів супутникової інформації залежно від масштабу дослідження, характеру території та вимог до точності топографічних матеріалів. Реалізація зазначеної мети спрямована на підвищення ефективності інтеграції супутникових даних у просторові бази даних геоінформаційних систем та забезпечення науково обґрунтованого вибору інформаційних ресурсів для створення достовірних і геометрично коректних тривимірних моделей територій..

Виклад основного матеріалу. По-перше, слід відмітити, що основна частина дослідження спрямована на формування теоретично обґрунтованої та прикладним чином орієнтованої багатокритеріальної класифікації супутникової інформації, придатної для задач побудови 3-D моделей територій і виконання топографічних зйомок у середовищі геоінформаційних систем. Вихідним положенням є твердження про те, що ефективність тривимірного моделювання визначається не лише просторовою розрізненістю знімків, а сукупністю параметрів, які формують їх геометричний, радіометричний, спектральний, часовий та функціональний потенціал. Відповідно, класифікація повинна мати багатовимірний характер і відображати взаємозв'язок між технічними характеристиками даних та їх прикладною придатністю.

Передусім пропонується класифікаційний блок за фізичною природою та типом сенсора. У межах цього критерію доцільно виділяти оптичні пасивні системи, радарні активні системи синтетичної апертури, а також комбіновані

ISSN 2786-6025 Online

або мультисенсорні комплекси. Оптичні системи забезпечують формування стереопар і дозволяють реалізувати фотограмметричні алгоритми реконструкції рельєфу та об'єктів забудови. Їх перевагою є висока просторово-деталізована структура зображення та можливість тематичної інтерпретації за спектральними ознаками. Радарні системи, навпаки, характеризуються незалежністю від освітлення і погодних умов, а також здатністю до інтерферометричної обробки, що є ключовим для побудови моделей висот на великих територіях. Комбіновані рішення дозволяють інтегрувати переваги обох типів, що особливо важливо при моделюванні складних урбанізованих або гірських ландшафтів.

Другим пропонованим критерієм виступає просторове розрізнення та масштабна відповідність даних. У межах цього параметра супутникова інформація поділяється на надвисокорозрізнену, високорозрізнену, середню та низькорозрізнену. Надвисока розрізненість забезпечує детальне відтворення геометрії будівель, інженерних споруд і транспортної мережі, що є визначальним для створення детальних 3-D моделей міських територій та топографічних планів великого масштабу. Середня розрізненість більш придатна для регіонального моделювання рельєфу та створення оглядових цифрових моделей місцевості. Низькорозрізнені дані можуть використовуватись як допоміжне джерело при аналізі великих територій або в задачах моніторингу змін. Важливим є не лише абсолютне значення просторової розрізненості, але й її відповідність нормативним вимогам до точності топографічних матеріалів певного масштабу.

Третій класифікаційний вимір пов'язаний з геометричними параметрами знімання. У цьому аспекті доцільно розрізняти моноскопічні знімки, стереоскопічні пари та багатокутові знімання. Моноскопічні матеріали здебільшого використовуються для тематичної інтерпретації та оновлення планових елементів карти. Стереоскопічні знімки формують основу фотограмметричного визначення висот і створення цифрових моделей рельєфу. Багатокутові дані дозволяють підвищити точність відтворення складної геометрії об'єктів, зменшити зони тіней та покращити відображення вертикальних поверхонь. У контексті 3-D моделювання саме наявність стереоскопічності або інтерферометричної інформації є критичною умовою формування повноцінної тривимірної структури.

Четвертий критерій охоплює спектральні та радіометричні характеристики. Багатоспектральні та гіперспектральні дані дозволяють виконувати тематичну класифікацію покриття, що є необхідною для відокремлення наземної поверхні від рослинності та забудови при створенні цифрової моделі рельєфу. Радіометрична розрядність впливає на здатність розрізняти об'єкти з близькими відбивними характеристиками, що особливо актуально при

сегментації урбанізованих територій. Таким чином, спектральний вимір класифікації визначає не лише інформаційне наповнення 3-D моделей, але й якість попередньої тематичної обробки.

П'ятий класифікаційний блок стосується часових характеристик та періодичності знімання. Дані одноразового знімання придатні для створення статичних моделей, тоді як багаторазові або серійні зйомки дозволяють здійснювати аналіз динаміки рельєфу та змін забудови. У задачах топографічного оновлення регулярність отримання супутникової інформації набуває особливого значення, оскільки забезпечує актуальність просторових баз даних та можливість автоматизованого виявлення змін.

Окремий класифікаційний вимір пропонується формувати за функціональною придатністю до етапів створення 3-D моделей. На цьому рівні супутникову інформацію доцільно поділяти на:

- дані для первинного формування цифрової моделі висот;
- дані для уточнення геометрії об'єктів;
- матеріали для тематичної деталізації та семантичного наповнення;
- інформацію для контролю точності та валідації результатів.

Такий підхід дозволяє пов'язати технічні характеристики з конкретними технологічними операціями в геоінформаційному середовищі.

Інтеграція запропонованої класифікації у структуру геоінформаційних систем передбачає створення багатовимірної моделі метаданих, у якій кожний набір супутникових даних описується сукупністю параметрів за всіма наведеними критеріями. Це забезпечує можливість автоматизованого відбору оптимальних джерел для конкретної задачі, мінімізує ризик невідповідності точнісних характеристик та підвищує узгодженість просторових шарів у базі даних. Крім того, багатокритеріальний підхід створює передумови для розроблення алгоритмів інтелектуального вибору даних з використанням методів багатофакторного аналізу або машинного навчання.

Таким чином, запропонована система класифікації поєднує фізичні, геометричні, спектральні, часові та функціональні критерії, формуючи комплексну типологію супутникової інформації, орієнтовану на потреби тривимірного геоінформаційного моделювання та топографічного знімання. Її впровадження дозволяє підвищити обґрунтованість вибору джерел даних, оптимізувати технологічні процеси створення 3-D моделей територій і забезпечити узгодженість просторових ресурсів у межах єдиної геоінформаційної інфраструктури.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що сучасний етап розвитку супутникових технологій та геоінформаційних систем характеризується не лише зростанням обсягів доступної просторової інформації, але й ускладненням її структури, різноманіттям технічних параметрів і

ISSN 2786-6025 Online

функціональних характеристик. Аналіз наукових публікацій засвідчив, що більшість існуючих підходів до систематизації супутникових даних мають фрагментарний характер і, як правило, обмежуються одним або кількома критеріями – типом сенсора, просторовою розрізненістю чи тематичним призначенням. Водночас для задач побудови 3-D моделей територій і виконання топографічних зйомок у середовищі геоінформаційних систем така одновимірна класифікація є недостатньою, оскільки не враховує комплексний вплив геометричних, спектральних, часових параметрів та параметрів точності на кінцевий результат моделювання.

У межах роботи обґрунтовано доцільність формування багатокритеріальної системи класифікації супутникової інформації, що поєднує фізичні характеристики сенсорів, просторово-геометричні параметри знімання, спектральні та радіометричні особливості, часову структуру даних, а також їх функціональну придатність на різних етапах створення цифрових моделей рельєфу, цифрових моделей поверхні та комплексних тривимірних моделей територій. Запропонований підхід дозволяє перейти від формального переліку технічних характеристик до структурованої системи відбору даних, орієнтованої на конкретні вимоги масштабу, точності та тематичного наповнення топографічних матеріалів.

Доведено, що інтеграція такої класифікації у середовище геоінформаційних систем створює передумови для автоматизованого вибору оптимальних джерел супутникової інформації, підвищення узгодженості просторових шарів у базах даних та мінімізації похибок, пов'язаних з невідповідністю вихідних матеріалів поставленим завданням. Водночас реалізація багатокритеріального підходу сприяє підвищенню наукової обґрунтованості процесів 3-D моделювання, оптимізації технологічних схем обробки та ефективнішому використанню ресурсів дистанційного зондування Землі.

Отже, одержані результати підтверджують, що для забезпечення ефективної роботи з геопросторовою інформацією необхідною умовою є наявність розширених, структурованих та адаптованих до прикладних потреб варіантів класифікації супутникових даних. У цьому контексті подальший розвиток та деталізація багатокритеріальних класифікаційних моделей стануть актуальним напрямом наукових досліджень, спрямованих на підвищення якості та достовірності тривимірного геоінформаційного моделювання територій.

Література:

1. Becker C., Hänsch R., Hellwich O. Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-1/W1. P. 3–10.

2. Zou X., Zhao G., Li Z., et al. Object-based image analysis combining high-resolution imagery, LiDAR and parcel map for urban classification // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B3. P. 733–740.

3. Becker C., Hänsch R., Hellwich O. Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-1/W1. P. 3–10.

4. Kunapo J. Spatial data integration for classification of 3D point clouds from digital photogrammetry // Applied GIS. 2005. Vol. 1, No. 2. P. 1–15.

5. Mohammadi A., Ghassemi S., et al. A multi-sensor comparative analysis on the suitability of remote sensing technologies for DEM/DSM generation // Sensors. 2020. Vol. 20, No. 24. Article 7214.

6. Avtar R., Yunus A. P., Kraines S., et al. Evaluation of DEM generation based on interferometric SAR (InSAR) // Procedia Environmental Sciences. 2015. Vol. 24. P. 87–94.

7. Hadj-Sahraoui O., et al. High-resolution DEM building with SAR interferometry and image segmentation // IET Image Processing. 2019. Vol. 13, No. 9. P. 1523–1532.

8. Sudra P., Arnaud-Fassetta G., et al. A comparative assessment of multi-source generation of DEMs for riverscape applications // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, No. 7. Article 1949.

9. Barnoaiea I., et al. Using satellite image classification and digital terrain modelling for specific geomorphological parameter extraction // Proceedings of International Conference on Geomorphology. 2019. P. 1–6.

10. Tiwari A., Dixit A., et al. Developing object-based image procedures for classifying and characterising different landcovers // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. Vol. 18. Article 100300.

11. Yan W. Y., Shaker A., El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 158. P. 295–310.

12. Rottesteiner F., Sohn G., Jung J., et al. ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-3. P. 293–298.

References:

1. Becker C., Hänsch R., Hellwich O. Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-1/W1. P. 3–10.

2. Zou X., Zhao G., Li Z., et al. Object-based image analysis combining high-resolution imagery, LiDAR and parcel map for urban classification // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B3. P. 733–740.

3. Becker C., Hänsch R., Hellwich O. Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-1/W1. P. 3–10.

4. Kunapo J. Spatial data integration for classification of 3D point clouds from digital photogrammetry // Applied GIS. 2005. Vol. 1, No. 2. P. 1–15.

5. Mohammadi A., Ghassemi S., et al. A multi-sensor comparative analysis on the suitability of remote sensing technologies for DEM/DSM generation // Sensors. 2020. Vol. 20, No. 24. Article 7214.

ISSN 2786-6025 Online

6. Avtar R., Yunus A. P., Kraines S., et al. Evaluation of DEM generation based on interferometric SAR (InSAR) // *Procedia Environmental Sciences*. 2015. Vol. 24. P. 87–94.
7. Hadj-Sahraoui O., et al. High-resolution DEM building with SAR interferometry and image segmentation // *IET Image Processing*. 2019. Vol. 13, No. 9. P. 1523–1532.
8. Sudra P., Arnaud-Fassetta G., et al. A comparative assessment of multi-source generation of DEMs for riverscape applications // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 7. Article 1949.
9. Barnoaiea I., et al. Using satellite image classification and digital terrain modelling for specific geomorphological parameter extraction // *Proceedings of International Conference on Geomorphology*. 2019. P. 1–6.
10. Tiwari A., Dixit A., et al. Developing object-based image procedures for classifying and characterising different landcovers // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2020. Vol. 18. Article 100300.
11. Yan W. Y., Shaker A., El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 158. P. 295–310.
12. Rottesteiner F., Sohn G., Jung J., et al. ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. Vol. II-3. P. 293–298.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.02.2026