

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Куць Віктор Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Виділення меж земельних ділянок за даними аерофотозйомки з
безпілотних літальних апаратів з використанням ГІС (на прикладі
території с. Хмелева)

(назва роботи)

Геоінформаційні системи і технології

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

В. М. Куць

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.г.н, доц. Давибіда Лідія Іванівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Давибіда Л.І.		

7.Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	ГІС-підходи та методи автоматизованого визначення меж земельних ділянок		
2	Матеріали та методи дослідження		
3	Результати дослідження		
	Автоматизоване кадастрове картографування		

Студент _____
(підпис)Куць В.
(прізвище та ініціали)Керівник роботи _____
(підпис)Давибіда Л.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота зосереджена на вивченні потенціалу використання геоінформаційних систем (ГІС) для автоматизованого окреслення кордонів земельних наділів, ґрунтуючись на даних аерофотозйомки, здійсненої за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Ключова мета цього дослідження полягає у створенні та практичному тестуванні ГІС-методології для ідентифікації меж ділянок землі на базі аерофотоматеріалів, отриманих від безпілотників, із кінцевою метою покращення точності, прискорення та забезпечення автоматизації процедур кадастрового картографування.

В рамках роботи здійснено глибокий аналіз сучасних підходів до опрацювання візуальних даних, методів перетворення контурів у векторний формат, а також інструментарію геопросторового аналізу, які спільно гарантують високий рівень точності при встановленні меж ділянок у межах кадастрових зон.

Предмет дослідження — це процедура ідентифікації та графічного представлення кордонів земельних наділів в офіційній державній системі земельного кадастру, з використанням можливостей геоінформаційних систем та даних, отриманих завдяки дистанційному зондуванню Землі.

Акцент зроблено на створенні спеціалізованої ГІС-методології.

Вона передбачає інтеграцію фотограмметричних результатів і геодезичних вимірювань задля побудови детальної цифрової моделі рельєфу та її подальшого ефективного застосування у процесах ведення кадастрової документації.

Об'єктом цього дослідження слугують методики, алгоритмічні підходи та інструментальні засоби, які застосовуються в ГІС-середовищі для обробки аерофотоматеріалів, отриманих з безпілотних літальних

апаратів (БПЛА), з метою автоматизованого визначення та подальшої векторизації контурів і меж земельних ділянок.

Здобуті висновки чітко засвідчують переваги інтеграції БПЛА та ГІС-технологій, демонструючи їхню високу ефективність у процесі актуалізації даних державних кадастрів, значному зниженні часових та ресурсних витрат на виконання польових геодезичних робіт, а також у підвищенні загальної точності координат для ключових точок межування.

Опрацьований підхід придатний для використання установами, що займаються обліком земельних ресурсів, підприємствами, які спеціалізуються на землеустрої, а також у процесі розробки містобудівної документації.

Ключові слова: ГІС, аерофотозйомка, безпілотні літальні апарати, межі земельних ділянок, кадастрові роботи, фотограмметрія, цифрова модель місцевості.

ABSTRACT

The master's thesis focuses on studying the potential of using geographic information systems (GIS) for automated delineation of land boundaries, based on aerial photography data taken using unmanned aerial vehicles (UAVs).

The key goal of this research is to create and practically test a GIS methodology for identifying land boundaries based on aerial photography obtained from drones, with the ultimate goal of improving the accuracy, acceleration, and automation of cadastral mapping procedures.

The work provides an in-depth analysis of modern approaches to visual data processing, methods for converting contours into vector format, and geospatial analysis tools, which together guarantee a high level of accuracy when establishing land boundaries within cadastral zones.

The subject of the study is the procedure for identifying and graphically representing the boundaries of land plots in the official state land cadastre system, using the capabilities of geographic information systems and data obtained through remote sensing of the Earth.

The emphasis is on the creation of a specialized GIS methodology.

It involves the integration of photogrammetric results and geodetic measurements to build a detailed digital terrain model and its subsequent effective use in the processes of maintaining cadastral documentation.

The object of this study are the methods, algorithmic approaches and tools used in the GIS environment for processing aerial photographs obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs) for the purpose of automated determination and subsequent vectorization of contours and boundaries of land plots.

The obtained conclusions clearly demonstrate the advantages of integrating UAVs and GIS technologies, demonstrating their high efficiency in the process of updating state cadastre data, significantly reducing time and

resource costs for performing field geodetic works, as well as in increasing the overall accuracy of coordinates for key surveying points.

The developed approach is suitable for use by institutions engaged in land resource accounting, enterprises specializing in land management, as well as in the process of developing urban planning documentation.

Keywords: GIS, aerial photography, unmanned aerial vehicles, land boundaries, cadastral works, photogrammetry, digital terrain model.

ЗМІСТ

Вступ	9
1 ГІС-підходи та методи автоматизованого визначення меж земельних ділянок	12
1.1 Отримання просторових даних для кадастрових потреб з використанням ДЗЗ, БПЛА та GNSS	12
1.2 Геоінформаційні системи та методи автоматизованого формування кадастрових меж	13
2 Матеріали та методи дослідження	15
2.1 Дані БПЛА	15
2.2. Довідкові дані	19
2.2.1 Формування еталонного шару меж	20
2.3 Метод визначення видимих меж та робочий процес	21
2.3.1. Вилучення ознак ENVI (FX)	21
2.3.2 Робочий процес визначення видимих меж	26
3 Результати дослідження	33
4 Автоматизоване кадастрове картографування	51
4.1. Методика автоматичного вилучення меж	51
4.2 Оцінка якості	55
4.3. Переваги та обмеження методу ENVI FX	59
4.4 Застосування у ГІС середовищі	63
Висновки	66
Список використаних джерел	69

ВСТУП

Формування всебічного, достовірного та оновленого земельного реєстру є однією з критично важливих цілей для ефективного територіально-просторового адміністрування у переважній більшості держав світу. Це, власне, кадастр надає правову чіткість кордонам земельних володінь, слугує основою для податкової системи, планування використання земель, зваженого розподілу наявних ресурсів, а також для розробки стратегічних планів регіонального розвитку.

Для української держави питання створення модернізованого кадастру набуває особливої значущості, враховуючи поточну земельну реформу, активізацію ринку земельних наділів, переведення у цифровий формат процедур землеустрою та впровадження політики відкритого управління просторовими відомостями. Ключовим завданням сучасності є не просто формування кадастрового масиву даних, а гарантування його стабільного й актуального поповнення з урахуванням справжніх трансформацій, що відбуваються у сфері використання земель. У сьогоdnішньому контексті земельний кадастр розглядається як критично важливий елемент державної геоінформаційної інфраструктури. Його дієвість критично залежить від ступеня вдосконалення геоінформаційних систем (ГІС), чия функція полягає в об'єднанні, зберіганні, маніпулюванні, аналітичному опрацюванні та графічному відображенні просторової інформації.

Метою роботи є обґрунтування та дослідження можливостей використання геоінформаційних систем у поєднанні з даними дистанційного зондування Землі та аерофотозйомки з БПЛА для автоматизованого формування та актуалізації кадастрових меж земельних ділянок, з підвищенням точності, оперативності та економічної ефективності кадастрових процедур, а також створення та практичне

тестування ГІС-методології для ідентифікації меж ділянок землі на базі аерофотоматеріалів, отриманих від безпілотників, із кінцевою метою покращення точності, прискорення та забезпечення автоматизації процедур кадастрового картографування.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається розв'язання таких **завдань**:

1) Проаналізувати сучасний стан та проблеми ведення земельного кадастру в умовах цифрової трансформації.

2) Дослідити можливості використання геоінформаційних систем у кадастровій діяльності.

3) Оцінити ефективність застосування даних дистанційного зондування Землі та аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для кадастрових потреб.

4) Розглянути та порівняти алгоритмічні підходи автоматизованого виділення меж земельних ділянок на основі растрових зображень.

5) Обґрунтувати доцільність використання об'єктно-орієнтованого аналізу зображень у задачах формування кадастрових полігонів.

6) Дослідити можливості інтеграції результатів автоматизованої векторизації у кадастрові бази геоданих ГІС.

Об'єктом дослідження є процеси формування, ведення та оновлення земельного кадастру з використанням геоінформаційних технологій.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та інструменти геоінформаційних систем і дистанційного зондування Землі, що застосовуються для автоматизованого визначення та актуалізації меж земельних ділянок.

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні можливостей інтеграції даних БПЛА та супутникових знімків високої роздільної

здатності у кадастрові ГІС з дотриманням топологічної цілісності та виявленні переваг автоматизованих підходів формування меж земельних ділянок порівняно з традиційними геодезичними методами з позицій оперативності та ресурсоефективності.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час формування та оновлення кадастрових карт і баз геоданих та впровадження розглянутих підходів у діяльність органів землеустрою та кадастрового адміністрування.

1 ГІС-ПІДХОДИ ТА МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК

1.1 Отримання просторових даних для кадастрових потреб з використанням ДЗЗ, БПЛА та GNSS

ГІС-інструментарій слугує інтелектуальним підґрунтям для створення цифрових кадастрових рішень, де узгоджуються дані, отримані в результаті дистанційного моніторингу Землі (ДЗЗ), точних вимірювань за допомогою GNSS-обладнання, аерофотознімків, зроблених дронами, та безпосередніх польових досліджень [1].

У сучасному світі безпілотні авіаційні системи (БАС) є одним із ключових засобів для отримання просторової інформації з надзвичайно високою деталізацією [2].

Вони дають можливість швидко створювати цифрові двійники рельєфу та цифрові моделі рельєфу (ЦМР), цифрові моделі об'єктів (ЦМО), масиви точок та ортофотографічні плани, які з легкістю приєднуються до географічних інформаційних систем (ГІС) для фахової обробки.

Звичні підходи до кадастрових вимірювань, що використовують геодезичне обладнання, хоч і гарантують високий рівень прецизійності, проте вимагають значних часових, фінансових та людських ресурсів, особливо при охопленні обширних територій [3-5].

Використання методів дистанційного зондування, зокрема супутникових зображень з високою роздільною здатністю (HRSI) та аерозйомки, виконаної безпілотними літальними апаратами (БПЛА), у поєднанні з аналітичними можливостями геоінформаційних систем (ГІС), дозволяє відчутно покращити виконання кадастрових процедур. Це сприяє зниженню фінансових витрат та прискоренню актуалізації даних кадастру.

Кадастрова документація, як правило, містить просторове відображення офіційно зафіксованих меж земельних угідь, споруд та інших об'єктів, прив'язаних до певної території [6].

1.2 Геоінформаційні системи та методи автоматизованого формування кадастрових меж

З метою автоматизації створення та подальшого оновлення таких карт, сучасні ГІС інтенсивно інтегрують алгоритми, що базуються на комп'ютерному зорі, а також методи цифрового опрацювання зображень.

Застосування таких підходів дає змогу ідентифікувати візуальні розділові лінії – зелені насадження, шляхи, паркани, лінії забудов, які нерідко відповідають фактичним границям земельних ділянок [7].

У різних працях було наочно доведено практичну цінність алгоритмічних рішень для знаходження контурів зокрема, методу Хафа, а також техніки розділення із застосуванням середнього зсуву для точної фіксації помітних кордонів кадастрових одиниць на основі даних аерофотозйомки та космічних знімків [4, 8, 9].

Однак, можливості розширення сфери застосування таких методів та точність визначення місцезнаходження в просторі є недостатніми, особливо при роботі з заплутаним міським середовищем.

Через це у галузі створення кадастрових карт зростає інтерес до об'єктно-орієнтованих засобів аналізу зображень (ООАЗЗ), які дають змогу одночасно обробляти спектральні, фактурні та конфігураційні параметри об'єктів.

У межах актуальних геоінформаційних платформ подібні принципи втілюються за допомогою спеціалізованих модулів, наприклад ENVI Feature Extraction (ENVI FX), котрі здійснюють автоматичне формування векторних сутностей на основі растрових даних, створюючи полігональні структури з

правильною топологією, які згодом можна успішно інтегрувати в бази геоданих кадастру.

Поєднання даних, отриманих через аерофотозйомку, із можливостями геоінформаційних систем (ГІС) дає змогу конструювати багатосарові просторові сховища інформації.

У цих сховищах кожна окрема земельна ділянка відображається у вигляді замкненої геометричної фігури (полігону), яка, своєю чергою, наділена комплексом властивостей (атрибутів) — чи то правового, економічного, чи екологічного характеру.

Використовуючи функціонал для просторового аналізу, оператор має можливість провести ретельну геометричну перевірку встановлених кордонів, визначити ступінь накладання (перетину) землекористувань, ідентифікувати диспути щодо меж, а також здійснювати регулярне відстеження трансформацій у використанні земель протягом певного часового проміжку.

Крім того, застосування ГІС надає доступ до моделей даних, таких як "Набір кадастрових ділянок" (Parcel Fabric), що використовуються, наприклад, у програмному забезпеченні ArcGIS Pro. Це забезпечує надійне збереження топологічних взаємозв'язків між сусідніми об'єктами, підтримуючи цілісність топологічних даних та фіксуючи повну історію змін кожного об'єкта, внесеного до кадастрового реєстру. Через це кадастрові географічні інформаційні системи (ГІС) послідовно трансформуються в комплексні платформи для адміністрування просторових ресурсів країни. Вони отримують можливість гарантувати своєчасність, достовірність та публічний доступ до інформаційних масивів [3].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Дані БПЛА

Місцем, яке визначено для досягнення запланованого результату, обрано дослідну зону в сільській місцевості, а саме земельні наділи, що належать ТОВ "ХМЕЛЕВА" і знаходяться в с. Хмелева, Коломийського району, Івано-Франківської області.

Цей вид місцевості ідеально підходить для вивчення автоматизованого розпізнавання меж земельних ділянок, оскільки тут присутнє значне число фізичних ліній розділу, які можна помітити: дороги, краї полів, паркани, захисні лісові смуги та скупчення дерев.

Саме ці елементи створюють точні просторові віхи, які можуть бути залучені як геометричні підказки для визначення меж кадастру в контексті геоінформаційного аналізу.

Задля гарантування високої точності географічного розташування ортофотопланів під час аерофотозйомки було виконано попередню прив'язку знімків до координат за рахунок використання наземних опорних точок (НОТ), які розташовані рівномірно по всій площі, що вивчається.

Наземні контрольні пункти визначалися за допомогою режиму кінематичної зйомки в реальному часі (RTK), що використовував GNSS-приймач Leica серії 1200.

Цей прилад був під'єднаний до референтної мережі System Solution, яка забезпечувала необхідні коригувальні дані.

Коригування сигналів відбувалося в режимі "always-on" (постійний зв'язок) із супутниковими угрупованнями GPS та GLONASS.

Загалом було встановлено 12 наземних контрольних пунктів.

Середнє значення показника ослаблення точності позиціонування (PDOP) коливалося від 1,2 до 1,7.

Такі низькі показники свідчать про те, що умови для спостережень були стійкими, а геометрія розташування супутників — надійною.

Координатні дані отриманих з наземних контрольних точок були введені у середовище геоінформаційної системи (ГІС).

Це слугувало еталонною основою, яка була необхідна як для процесу ортофототрансформування знімків, так і для подальшого просторового уточнення зібраних даних з безпілотного літального апарата (БПЛА).

Польоти проводилися на висоті 80 м із таким запасом перекриття кадрами, а саме: мінімум 70% у поздовжньому напрямку та 60% у поперечних напрямках між рядами маршрутів.

Це дозволило створити стійке перекриття для генерації густого масиву точок (хмари).

У підсумку, було відзнято 354 фотографії.

Після їх подальшого фотограмметричного опрацювання, ці кадри було об'єднано в цілісний ортофотоплан.

Повітряне знімання відбулося дев'ятнадцятого жовтня 2021 р., в умовах ідеального для цього часу атмосферного стану — небо було чистим, а сонячне світло падало на поверхню рівномірно.

Зенітний кут сонця у момент зйомки дорівнював близько 35 градусів, що допомогло звести до мінімуму утворення тіней та спотворень рельєфу на фінальних фотографіях.

Сумарна територія, що потрапила в зону обстеження, склала 25 гектарів.

Набуті відомості пройшли опрацювання в комплексі програм Agisoft Metashape Professional, у межах якого здійснювалися орторектифікаційні процедури, коригування рівня яскравості, створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) і формування кінцевого ортофотоплану.

Згодом отримані напрацювання були імпортовані до системи геоінформаційної бази (Geodatabase) платформи ArcGIS Pro задля

забезпечення подальшої детальної оцінки та автоматизованого ідентифікування контурних меж, використовуючи функціонал модуля ENVI Feature Extraction (ENVI FX).

Щоб встановити рівень планової точності сформованого ортофотознімка, було проведено зіставлення координат наземних опорних точок, які фіксувалися під час польових робіт за допомогою GNSS-обладнання, із їхніми відповідниками, визначеними безпосередньо на поверхні ортофотоплану.

Обчислена величина середньоквадратичного відхилення (СКВ) склала 2,5 см, що повністю задовольняє критерії високоточного геопросторового моделювання.

Дані валідації свідчать про відмінну точність геореференсування, завдяки чому отримані фотоматеріали можуть слугувати надійною базою для створення векторних шарів контурів земельних меж у складі кадастрової геоінформаційної системи.

Технічні параметри процедури збору інформації деталізовано в Таблиці 2.1, а отриманий після обробки даних з БПЛА ортофотоплан обстеженої місцевості зображено на рисунку 1.

Таблиця 2.1 Таблиця параметрів аерофотозйомки з БПЛА

Локація	Модель БПЛА	Камера / Фокусна відстань [мм]	Перекриття поздовжнє / бокове [%]	Висота польоту [м]	GSD [см]	Пікселі
Івано-Франківська обл.	DJI Phantom 4 Pro	1" CMOS, 20 Мп / 24 мм	80 / 70	80	2.0	35 551 × 31 098

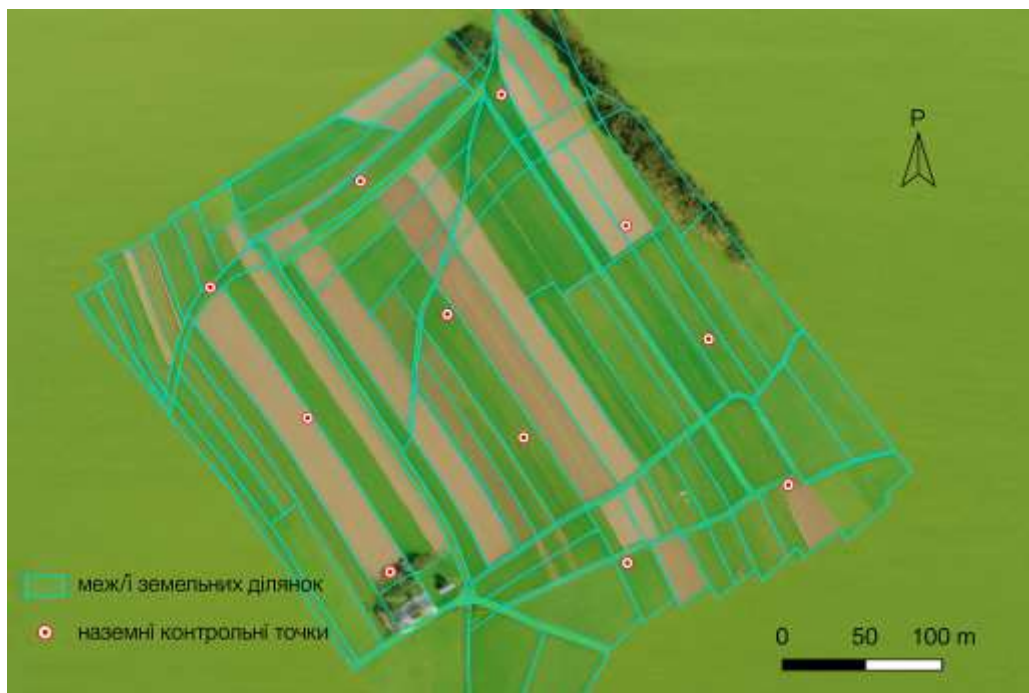
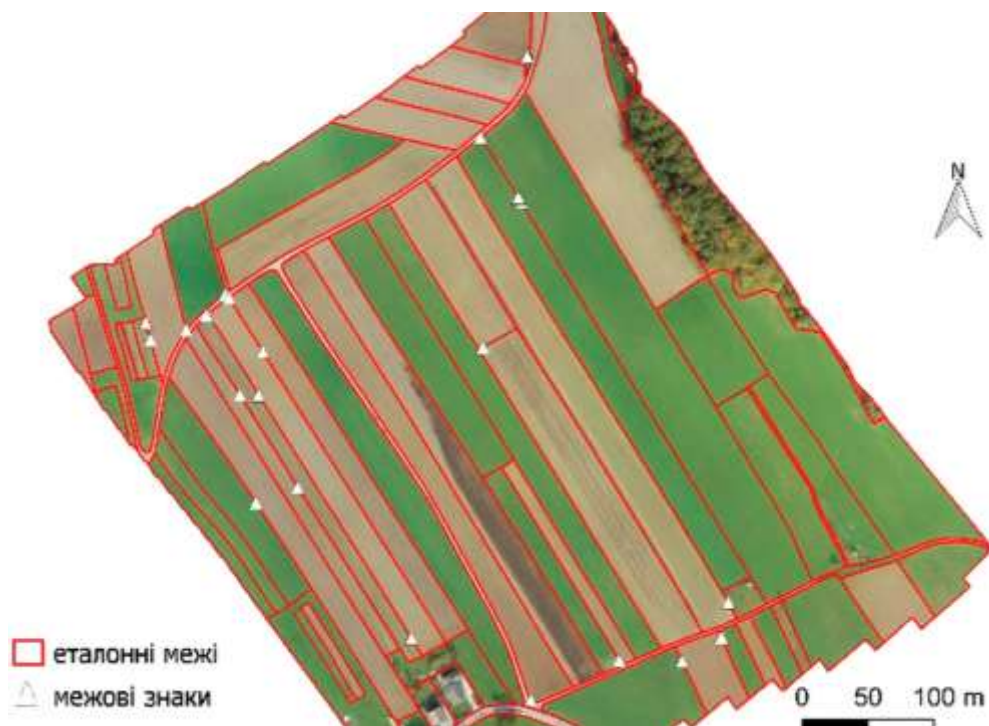
**а****б**

Рисунок 2.1 – Кадастрова карта та наземні контрольні точки (GCP) (а), видимі межі об'єкта, нанесені вручну, що використовуються як опорні дані для визначення якості виявлення/вилучення (б)

2.2 Довідкові дані

Для зіставлення здобутих даних із наявною кадастровою документацією ми застосували офіційну мапу кадастру, яку було завантажено з онлайн-ресурсу Державної служби України з геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр).

Цей інтернет-портал виступає державним ресурсом відкритих геопросторових даних, що відкриває користувачам доступ до відомостей про земельні наділи, їхні ідентифікаційні номери, контури, розміри та функціональне призначення.

Офіційну кадастрову мапу було інтегровано в програмний комплекс ArcGIS Pro як векторний шар і суміщено з ортофотопланом, отриманим за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА) (рис. 2а).

З метою досягнення ідеального співпадіння шарів використано процедуру геоприв'язки із застосуванням єдиних систем координат УСК2000 та WGS-84, що уможливило об'єднання різноманітних даних в єдину геоінформаційну базу.[10]

Після того, як було накладено шар даних кадастру на ортофотоплан, ми одразу здійснили візуалізаційний та просторовий розбір, застосовуючи засоби просторового коригування (spatial adjustment tools).

Отримані результати негайно засвідчили наявність значних розбіжностей між фактично помітними межами земельних ділянок, які можна було побачити на ортофотознімку, та офіційними обрисами, зафіксованими в кадастрі.

Переважна більшість цих меж не корелювала з реальними фізичними елементами місцевості - шляхами, краями сільськогосподарських угідь, зеленими насадженнями типу лісосмуг або огорожами.

Попередній аналіз дав змогу встановити, що лише приблизно 8% від усіх кадастрових кордонів можна вважати такими, що справді збігаються з фактично існуючими межами, які були ідентифіковані та оцифровані вручну на ортофотозображенні (за умови, що допустима похибка становить 25 сантиметрів).

Ця невідповідність демонструє незадовільну геопросторову точність офіційної кадастрової схеми.

Це можна пояснити її історичним корінням: значний обсяг інформації був оцифрований з паперових топографічних та кадастрових матеріалів, що були розроблені десятки років тому без залучення новітніх GNSS-систем або аерофотограмметричних методів.

На рівні ГІС-платформи це вилилося в топологічні проблеми — виникнення накладень, розбіжностей у межах та зміщень полігональних об'єктів порівняно з реальною ситуацією на місцевості.[11]

Для фіксації цих відхилень були використані програмні модулі перевірки топології (topology checker) та інструменти накладання (overlay analysis), що дало змогу виміряти рівень точності й внутрішньої узгодженості даних кадастру.

2.2.1 Формування еталонного шару меж

Через зафіксовані невідповідності, як основа для подальших досліджень, ми взяли за еталонний набір інформації границю, яку було визначено і нанесено вручну.

Ця межа була створена безпосередньо за ортофотопланом, отриманим з безпілотного літального апарату.

Процедура ручного переведення до цифрового формату виконувалася в програмному середовищі ArcGIS.

Для забезпечення точності використовували прив'язку до контрольних точок (GCP), а фінальні дані зберігалися у форматі GeoPackage.

При створенні цього інформаційного про шарку акцент робився на елементах ландшафту, які можливо було чітко ідентифікувати візуально: автошляхи, обриси полів, загородження, лінії забудов, ряди зелених насаджень і подібне.

Зазначені складові слугували візуальними маркерами, завдяки чому вдалося окреслити гранично точні межі землевикористання (див. Рис. 2б).

Отже, ці вручну оцифровані лінії були визнані як основна, еталонна геопросторова база для зіставлення з результатами автоматичного виділення меж із даних БПЛА.

Це дозволило здійснити об'єктивне оцінювання точності функціонування алгоритмів, впроваджених у програмному блоці ENVI Feature Extraction (ENVI FX).[11]

2.3. Метод визначення видимих меж та робочий процес

2.3.1. Вилучення ознак ENVI (FX)

Модуль ENVI Feature Extraction (ENVI FX) є інструментом, що розроблений для об'єктно-орієнтованої обробки растрових даних у складі геоінформаційного програмного забезпечення.

Його функціонал поєднує послідовні процедури сегментації та класифікації, завдяки яким стає можливим ідентифікувати та виокремлювати об'єкти згідно з їхніми спектральними, просторовими й текстурними ознаками.

У межах цієї роботи, ключову роль відігравали процеси сегментації, а також отримання просторових властивостей, притаманних кожному

виділеному об'єкту, що є вирішальним кроком для подальшого аналізу та визначення візуальних меж кадастрових одиниць.

Крок 1. Розподіл візуальних даних на окремі частини

У ENVI FX процедура сегментування ґрунтується на методі аналізу градієнтів, поєднаному з гідрологічним моделюванням водозбірних басейнів.

Це дає змогу розмежувати цифрове зображення на однотипні зони, керуючись локальними відмінностями у показниках спектральної інтенсивності.

Методика охоплює декілька наступних кроків:

1. Створення карти градієнтів для кожної смуги спектру, що міститься на зображенні.
2. Розрахунок кумулятивної функції розподілу значень градієнтів з метою встановлення необхідного масштабного простору для сегментування.
3. Внесення змін до градієнтної карти за допомогою використання параметра масштабування, що відображає встановлений поріг для розпізнавання меж.
4. Застосування операції перетворення вододілів (Watershed Transformation) для точного визначення контурів об'єктів.

Мапу градієнтів розраховують, спираючись на дві основні стратегії:

- Підхід, базований на контурах, який залучає алгоритми пошуку меж і найкраще спрацьовує з об'єктами, які мають виражені контури — як-от автомобільні шляхи або огорожі.
- Підхід, базований на інтенсивності, який оцінює усереднену спектральну світність пікселів і використовується для поверхонь із малою деталізацією або плавними переходами — наприклад, для ґрунтових моделей висот або ділянок із повільною зміною рівня відбиття світла.

Оптимальний вибір методики залежить від виду вихідного матеріалу: для аерознімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів, доречніше використовувати метод контурів, оскільки він дозволяє якісно розділити об'єкти, спираючись на текстурні особливості їхньої поверхні.

Після того, як мапу градієнтів вже вибудовано, проводиться велика нормувальна операція, мета якої — сфокусувати увагу виключно на найпомітніших градієнтних переходах.

Зокрема, якщо обрано рівень масштабування у 50 відсотків, то всі градієнтні величини з меншими показниками будуть відкинуті.

Зазвичай, такі показники пов'язані з незначними шумами або ледве помітними коливаннями світлосили.

У міру того, як рівень масштабування підвищується, загальна кількість виявлених сегментів поступово скорочується.

При цьому контури, що залишаються, набувають більш узагальненого вигляду.

Ця особливість є критично важливою, особливо коли йдеться про кадастрові роздільні лінії, адже вони мусять бути уніфіковані та узгоджені на рівні цілісних полігонів.

Після того, як градієнтну карту змінили, застосовується алгоритм "водозбору".

Цей процес ґрунтується на концепції, подібній до заповнення резервуарів у цифровому просторі рельєфу: найтемніші пікселі ми сприймаємо як "низини" або "басейни", тоді як найяскравіші кольори відповідають "вершинам" чи "височинам".

Поступово, крок за кроком, ця процедура заповнює всю площу, що допомагає виділити чіткі сегменти, які мають схожі спектральні властивості.

Кінцевий підсумок цієї фази — це вже розділене на частини зображення.

Кожен виділений об'єкт у ньому отримує свій індивідуальний номер (унікальний ідентифікатор) та асоційоване із ним середнє значення спектру.

Крок 2. Злиття фрагментів

Початкове розбиття може спричинити зайве дроблення об'єктів (так звану *over-segmentation*), тому наступна дія полягає у злитті (*merging*) суміжних частин, що демонструють схожі *spectral* чи текстурні характеристики.

У застосуванні ENVI FX це досягається комплексом *Full Lambda Schedule*, що задає граничне значення для об'єднання — коефіцієнт λ (лямбда).

Коли $\lambda = 20$, система приєднує 20% найближчих елементів, які мають мінімальні відмінності за спектром та просторовими параметрами. При $\lambda = 0$ злиття не відбувається, тоді як збільшення λ створює значно більш узагальнену модель контурів.

Ця методологія дає можливість знайти найкраще співвідношення між рівнем деталізації та ступенем узагальнення, що є критично важливим, зокрема, для позначення кадастрових кордонів, які характеризуються вираженою просторовою ієрархією.

Крім того, введено змінну для керування розміром текстурного вікна (ядра), що задає просторові рамки, в яких відбувається аналіз текстурних характеристик окремих пікселів.

Стандартно це ядро має розмір 3×3 пікселі; однак його можна розширити аж до 19×19 для роботи зі складнішими структурами — наприклад, для ідентифікації неоднорідних текстур, які трапляються в лісових угіддях або на полях.

Крок 3. Вивантаження даних та створення геоінформаційної основи

На цій, кінцевій, стадії результати проведеної сегментації переводяться (експортуються) у два різні для подальшого використання формати:

- у форматі растрових даних (GeoTIFF, "ГеоТІФФ") — це потрібно для забезпечення цілісності та збереження ієрархічної структури здійсненої класифікації;
- у форматі векторних даних (Shapefile або ж GeoPackage) — це дає змогу легко внести виокремлені межі в існуючі геоінформаційні системи (ГІС).

Для кожного ідентифікованого об'єкта формується повний набір атрибутивних даних, який містить: просторові показники (а це площа, периметр, а також координати його центральної точки), спектральні відомості (тобто усереднені показники відбивання світла в межах кожної смуги спектра) і текстурні характеристики (до них відносяться ентропія, диференціація (дисперсія), а також ступінь однорідності).

Перераховані вище параметри є критично важливими для проведення подальшої глибинної аналітики, для виконання автоматизованої процедури класифікування, чи для верифікації того, наскільки точно ідентифіковані межі співпадають із реально існуючими межами кадастрових ділянок.

Здобуті підсумкові дані уможливають включення відокремлених об'єктів до кадастрової ГІС-системи, що створює передумови для автоматизованого зіставлення визначених меж з офіційною кадастровою інформацією.[10],[11]

Це, в свою чергу, закладає підвалини для актуалізації просторових відомостей в умовах цифрового перетворення.

2.3.2. Робочий процес визначення видимих меж

Послідовність дій, що дозволяє визначити межі видимості зображено на рисунку 2, охоплює чотири ключові фази.



Рисунок 2.2 - Послідовність дій кадастрового картографування на основі автоматичного виявлення та вилучення видимих меж із зображень БПЛА

У процесі подальшої праці послідовність кроків була сформована наступним чином:

Початкові дві фази — попередня підготовка знімків та ідентифікація їхніх обрисів — були втілені в життя в програмному комплексі ENVI 5.5.

Для цього застосовувався функціонал ENVI Feature Extraction (ENVI FX).

Подальші операції — а саме: очищення даних (фільтрація), мінімізація складності ліній (спрощення контурів) та просторове поєднання (зіставлення) — здійснювалися за допомогою інструментарію ARCGIS, що

гарантувало сумісність із існуючою основою геодезичних кадастрових записів.

Спершу ортофотознімки, отримані з безпілотного літального апарату (БПЛА), пройшли процес повторної дискретизації, що було здійснено з метою встановити, який саме вплив матиме варіабельність просторової роздільної здатності на кінцеві результати сегментаційного аналізу.

Вихідна роздільна здатність, що становила 2 см, була знижена до значень у 25 см, 50 см та 100 см.

Вибір саме цих рівнів ґрунтувався на типових масштабах, що використовуються у кадастровому картографуванні, а також на стандартних розмірах наземних точок керування.

Для вказаної процедури дискретизації було застосовано підхід усереднення пікселів, що сприяє пом'якшенню різких перепадів яскравості та забезпечує поліпшення однорідності загального спектрального поля.

Крім того, проводилося тестування із залученням методів найближчого сусіда та білінійної інтерполяції, проте відмінності, що стосувалися б кількості чи просторового розташування автоматично визначених меж, не були виявлені.

Такий метод також дозволив встановити обчислювальну продуктивність алгоритмів ENVI FX під час зменшення роздільної здатності, що є критично важливим для великомасштабного кадастрового картографування значних за розміром територій.

Модуль ENVI FX було застосовано до кожного з повторно дискретизованих ортофотопланів.

Сегментування реалізовувалося з урахуванням двох головних параметрів: ступеня масштабування (Scale Level) та ступеня злиття (Merge Level).

Інтервал значень для масштабування знаходився в межах 50–80, а для злиття — 50–99, зі зміною через кожні 10 одиниць.

Якщо фіксували стрімке зростання числа ідентифікованих елементів, крок приросту редукували задля точнішого визначення ідеального набору параметрів.

Типові значення для розміру ядра текстури становили 3×3 пікселі; при цьому, навіть під час експериментів із найбільшим ядром (19×19) значних змін у формуванні контурів не спостерігалось.

Для кожного заданого поєднання параметрів генерували векторні зображення границь, представлені як полігональні фігури.

За підсумками роботи було розроблено п'ятдесят різних версій карт меж на кожен із рівнів деталізації ортофотоплану.

На додачу до просторових характеристик, увага приділялася таким показникам, як чисельність об'єктів та час, необхідний для їхньої обробки; це, своєю чергою, відкривало шлях до ґрунтовнішого зіставлення ефективності роботи алгоритмічних рішень.

Фінальні етапи обробки в середовищі ArcGIS охоплювали:

а) усунення незначних елементів — всі багатокутники, чия площа не досягала до 204 м^2 (це відповідало мінімальному еталонному периметру), були стерті;

б) унормування границь — геометричні характеристики відсіяних елементів піддавалися модифікації та виправленню задля поліпшення їхньої топологічної відповідності;

в) підбір оптимальних налаштувань — шукалися такі пари "масштаб-злиття", що забезпечили б кількість фінальних об'єктів максимально наближену до еталонної позначки (68 елементів, з допустимим відхиленням у 10).

Для вирівнювання ліній розмежування використовувався метод фільтра Калмана, що ефективно зменшував різкі локальні скачки контурів, зберігаючи при цьому їхній первинний образ.

Внаслідок цього окреслені межі пройшли процедуру топологічного спрощення, що гарантувало бездоганне відображення утворених багатокутників у геоінформаційних системах (ГІС) кадастрового призначення.

Кожен спрощений елемент отримав маркування «відфільтрований та згладжений», що дало змогу зіставити вихідні дані з проміжними результатами з різних фаз автоматизації.

Перевірка достовірності проводилася з використанням об'єктно-орієнтованого методу, оскільки кінцеві дані мали вигляд векторних зображень.

Застосовувався підхід аналізу накладання буферних зон (Buffer Overlay Analysis), сутність якого полягає у формуванні буферної області навколо контрольних або отриманих контурів та обчисленні відсотка їхнього взаємного покриття.

Рівень просторової відповідності між автоматично визначеними контурами та еталонними даними був встановлений на основі відсотка спільності їхніх границь.

Ця методика дала змогу отримати кількісну оцінку продуктивності вибраних параметрів масштабування та об'єднання.

Крім того, вона дозволила визначити, наскільки перспективним є застосування інструментарію ENVI FX для автоматизації процесів кадастрового картографування.

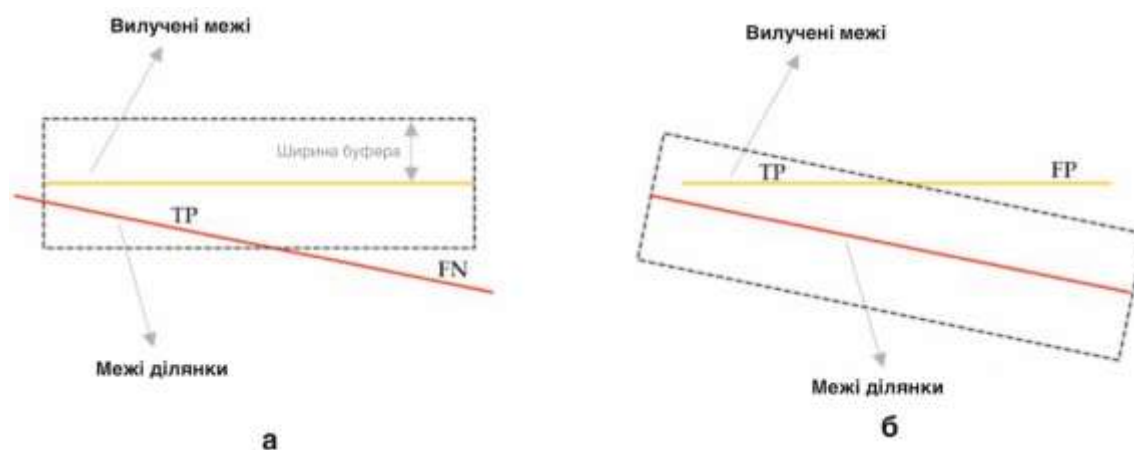


Рисунок 2.3 – Метод оцінки точності на основі об'єктів — метод накладання буфера: (а) Зіставлене посилення, (б) Зіставлене вилучення.

На додаток до всього, для глибшого тлумачення показників оцінки точності, ми виконали зіставний розбір роботи алгоритму ENVI FX.

Цей аналіз враховував вплив просторової чіткості ортофотоплану, характеристик збільшення та ступеня агрегації.

Завдяки цьому ми змогли визначити, як саме ці змінні впливають на геометричну коректність контурів, передбачуваність результатів та ефективність обчислювальних операцій.

Зокрема, було зафіксовано, що у випадку підвищення коефіцієнта масштабування (вище 70), хоча і зменшується число незначних фрагментів, водночас погіршується промальовування меж, що негативно відбивається на коефіцієнті повноти виділення об'єктів.

При масштабах, що коливаються в середньому діапазоні (60–70), вдається отримати найкращий компроміс між показниками правильності та повноти, що переконливо доводить раціональність використання комплексних критеріїв під час виконання кадастрових досліджень.

Отримані дані засвідчили, що для буферної зони завтовшки 50 см, середній рівень повноти фіксувався на межі 78–82%, тоді як параметр правильності сягав 84–88%, а об'єднаний (інтегративний) індекс загальної

якості становив приблизно 80–85%, що варіювалося з урахуванням просторової деталізації початкового ортофотоплану.

Для об'єктів, що мали буферну зону 25 см, зафіксовано знижену точність (це зумовлено більш суворим обмеженням просторового допуску); водночас, у радіусі 100–200 см спостерігався стійкий зв'язок між визначеними межами та фактичними контурами в кадастрі.[11]

Було також проведено співставлення різних наборів даних: автоматично визначених, відфільтрованих, спрощених та зведених (спрощено-відфільтровані) об'єктів.

Воно показало, що найбільш надійні показники якості можна отримати лише після здійснення комплексної постобробки.

Інтегрування процедури фільтрації невеликих полігонів та застосування фільтра Кальмана для згладжування контурів дає можливість посилити топологічну правильність векторних елементів і мінімізувати кількість невірних співпадінь, що безпосередньо відбивається на кінцевій точності відображення даних у кадастрі.

Отже, здійснений розгляд стверджує результативність підходу автоматизованого знаходження чітких границь за допомогою ENVI FX, у комплексі з можливостями ArcGIS для подальшої обробки даних.

Отримані відомості свідчать про таку річ: навіть коли якість деталізації оригінальних знімків із дрона погіршується, описана система все ще здатна підтримувати прийнятний рівень точності.

Цей рівень є цілком достатнім для оновлення офіційних кадастрових документів, моніторингу змін у використанні земельних угідь, а також для виявлення невідповідностей у визначенні меж ділянок, особливо в аграрних регіонах.

Застосування цієї методології на практиці, а саме у сфері геоінформаційного аналізу, надає можливість істотно зменшити тривалість робіт, які виконуються безпосередньо "у полі", мінімізувати необхідні

фінансові вкладення і, як наслідок, підняти загальну результативність у сфері територіального просторового адміністрування.

Це є критичною фазою на шляху до повної цифрової трансформації української системи державного земельного кадастру.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Підсумки здійсненого вивчення чітко засвідчили значну продуктивність симбіозу аерозйомки, виконаної за допомогою БПЛА, і методик аналізу зображень, що ґрунтуються на об'єктному підході, в програмному забезпеченні ENVI FX.

Це забезпечило механізоване визначення кордонів ділянок землі всередині географічних інформаційних систем.

Набуті відомості дали змогу повноцінно оцінити, як саме просторова деталізація, коефіцієнти масштабування та злиття елементів впливають на якісні показники й точність ідентифікації контурів меж.

Водночас, було підтверджено, що використання ГІС-методологій є цілком виправданим для цілей кадастрового картографування.

Зміна просторової роздільної здатності (GSD) ортофотоплану, отриманого з безпілотного літального апарату (БПЛА), у бік її зменшення (тобто збільшення числового значення GSD) призвела до значних змін у складі та особливостях автоматично ідентифікованих об'єктів.

У міру збільшення GSD від початкових 2 см до значень 25, 50 та 100 см, було зафіксовано послідовне скорочення чисельності виокремлених сегментів, що чітко вказує на помітну втрату детальності відображення земної поверхні.

Причиною цього є те, що використання більш крупного GSD призводить до злиття та втрати необхідної спектральної контрастності для менших топографічних елементів та лінійних об'єктів агроландшафту (зокрема, вузьких доріг, польових прокопів, зелених насаджень-огорож), що унеможлиблює їхнє ефективне автоматичне розпізнавання.

Водночас, зі збільшенням показника GSD, прискорюється й обробка інформації: усереднений термін, необхідний для створення однієї схеми

кордонів, становив від однієї до двох хвилин, що цілком задовольняє потреби при виконанні значних обсягів земельно-кадастрових операцій.

Цей аспект набуває особливої значущості для організацій державного чи місцевого самоврядування, де оперативність внесення змін до кадастрових даних є вирішальною для збереження актуальності просторових інформаційних систем.

Як продемонстровано у таблиці 3.1 та на графічних зображеннях 3.1, 3.2 за однакових налаштувань масштабування та злиття, вищий показник GSD тягнув за собою зменшення кількості ідентифікованих лінійних об'єктів (меж).

Таблиця 3.1 – Відстань до наземного зразка (GSD) та кількість пікселів після попередньої обробки зображення

Наземні контрольні точки [см]	Пікселі	Метод пересемплювання
25	2856 × 2498	Середнє значення пікселів
50	1428 × 1249	Середнє значення пікселів
100	714 × 625	Середнє значення пікселів

Наприклад, якщо GSD дорівнював 2 см, система ідентифікувала понад 1200 сегментів на межі, тоді як при GSD у 100 см їхня кількість ледве сягала позначки 450.

Схожа закономірність слугує доказом надзвичайної реакції алгоритму ENVI FX на якість просторового розрізнення початкових фотознімків.

Зіставлення інформації вказує, що хоча зростання параметра рівня поділу на сегменти (Scale Level) з 50 до 80 спричиняє поступове зниження загальної кількості виявлених кордонів, одночасно поліпшується їхня згуртованість у просторі та відповідність дійсним зовнішнім обрисам об'єктів.

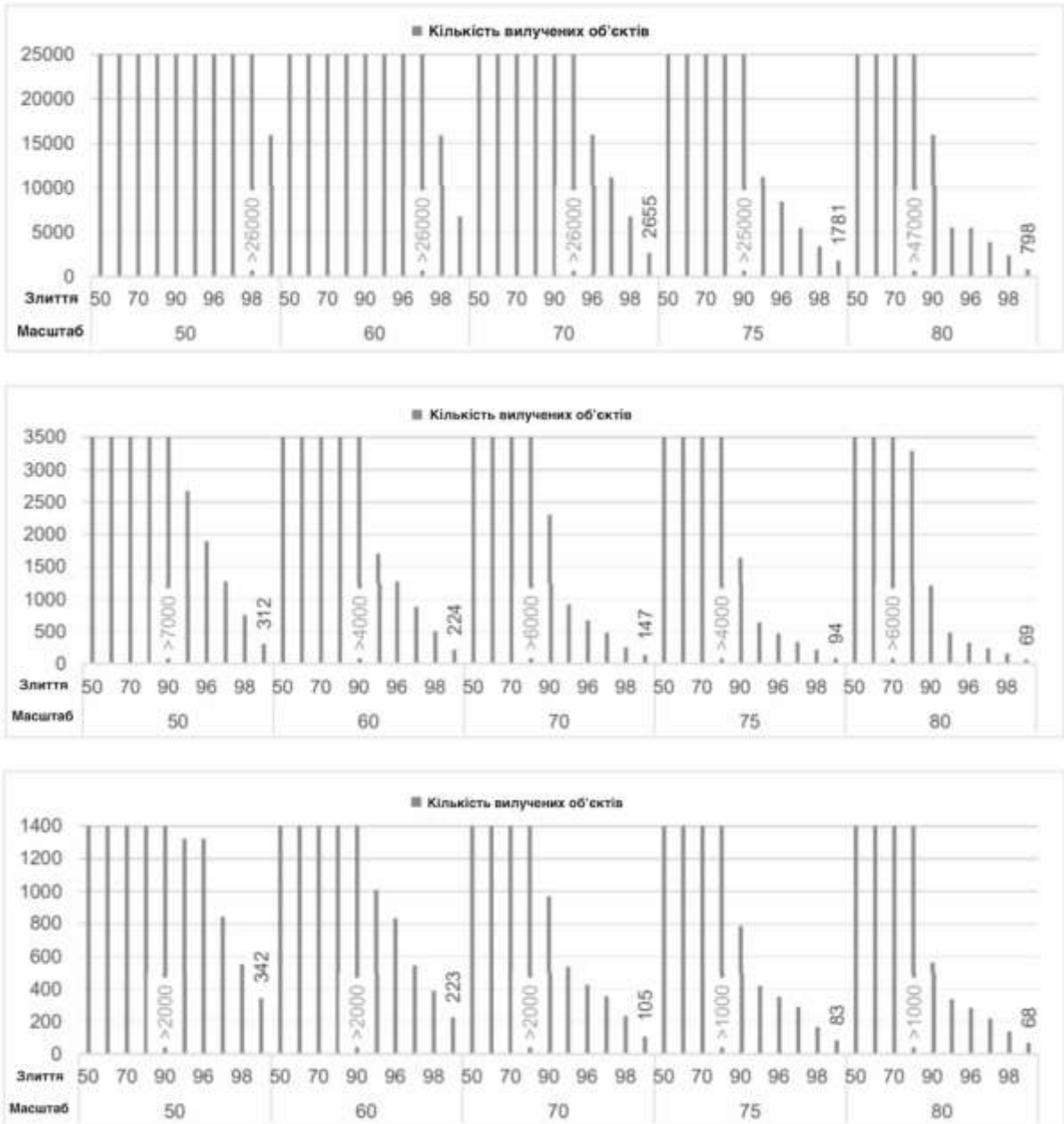


Рисунок 3.1 - Рівень масштабування та об'єднання та кількість вилучених об'єктів з повторно розподілених ортозображень БПЛА:б(а) відстань до наземної вибірки (GSD) 25 см, (б) GSD 50 см (в) GSD 100 см

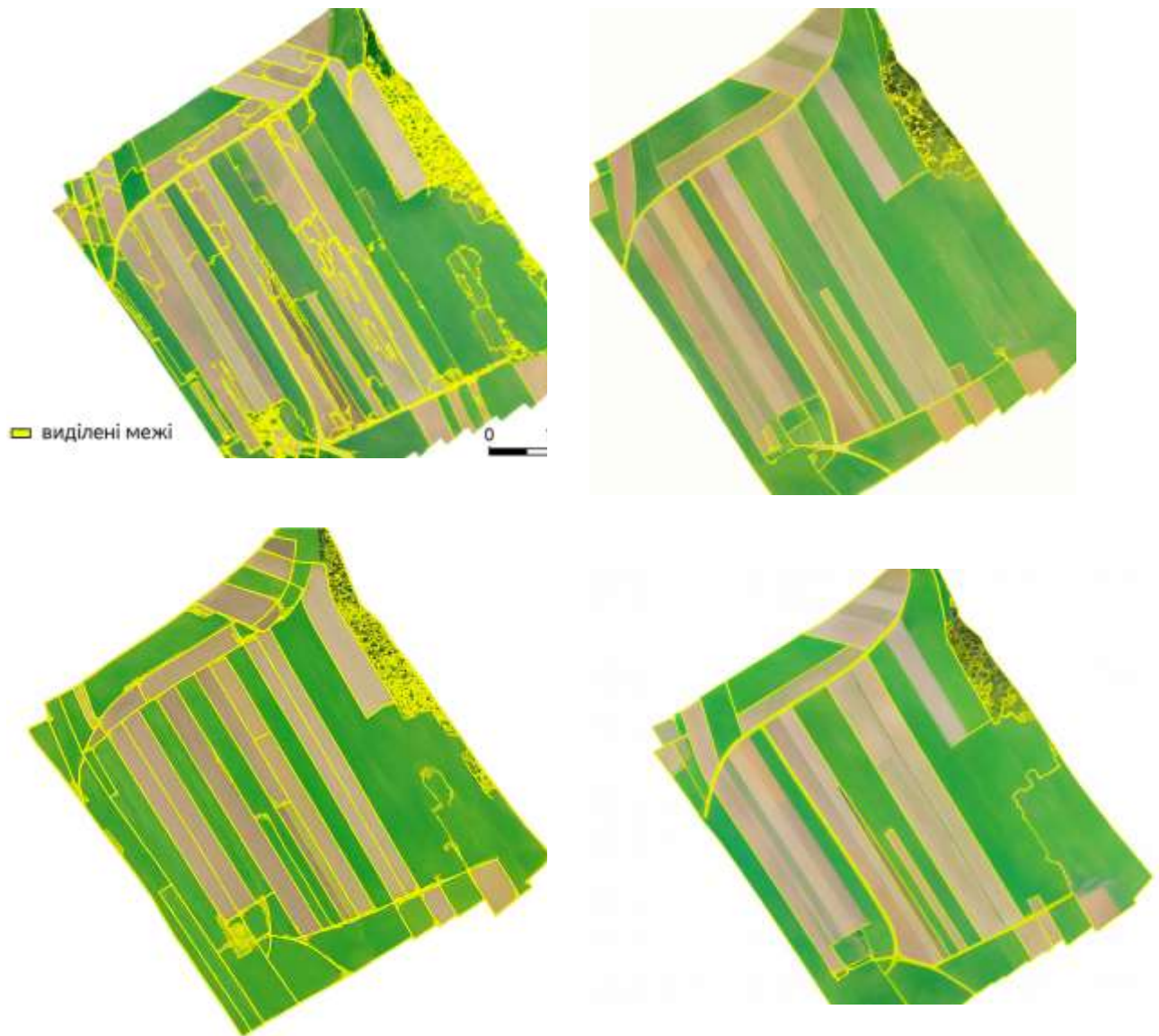


Рисунок 5. Приклади витягнутих межевих карт

Це обумовлено тим, що на вищих рівнях узагальнення несуттєві невеликі коливання яскравості зображення пропускаються, і формування контурів відбувається тільки на підставі надійних змін спектральних характеристик.

Крім того, параметр злиття (Merge Level) значно впливав на конфігурацію сегментів.

При мінімальних значеннях (50–60) створювалися надто подрібнені межі, водночас як при максимальних (90–99) відбувалося злиття сусідніх

об'єктів, що іноді спричиняло втрату дрібних деталей на складних територіях.

Найкращих показників було досягнуто при параметрах масштабу від 60 до 70 та злиття від 80 до 90, коли число знайдених об'єктів максимально збігалось з кількістю еталонних контурів.

Шляхом застосування методики аналізу перекриття буферних зон (Buffer Overlay Analysis) було здійснено кількісну оцінку просторової відповідності між межами, визначеними автоматично, та контрольними (еталонними) наборами даних.

Це оцінювання виконувалося для буферних зон, визначених з радіусами у 25 см, 50 см, 100 см та 200 см.

Отримані дані продемонстрували, що у випадку буфера 50 см середня повнота (recall) виявлення меж досягла 80%, точність (precision) — 87%, а інтегрована якість (F1-score) становила 84%.

Після розширення буферної зони до 100 см, ключові метрики стабілізувалися (повнота — 85%, точність — 89%).

Цей факт свідчить про те, що досягнуті показники повністю відповідають загальноприйнятим стандартам допусків, які застосовуються при виконанні кадастрових робіт на територіях сільськогосподарського призначення.

Найменше підтвердження точності спостерігалось для зони відступу у 25 см, і це цілком передбачувано, адже контури мають незначні відхилення, спричинені топографічними особливостями, шумами датчиків та помилками прив'язки до географічних координат.

Поглиблене вивчення засвідчило, що очищення від малих за площею об'єктів та вирівнювання країв за допомогою алгоритму Кальмана сприятливо відображається на кінцевій якості отриманих даних.

Застосування цих кроків збільшило усереднені метрики повноти та достовірності на 3–5%, а точність визначення місцезнаходження кордонів підвищилася на 7–10%.

Таким чином, післяобробка виявилася дієвою у підвищенні відповідності векторних меж за топологічними критеріями та усуненні окремих недоліків процесу сегментування.

Підсумовуючи здобуті завдяки дослідженню дані, можна окреслити наступні ключові положення:

- Застосування методики, базованої на ENVI FX, гарантує суттєву автоматизацію процедури визначення меж, зберігаючи при цьому рівень точності, що є цілком прийнятним для виконання кадастрових завдань;
- Оптимальним компромісом між детальністю виявлення контурів та часом, необхідним для їхньої обробки, є використання аерознімків, отриманих з безпілотних авіаційних комплексів (БПЛА), з показником GSD (Ground Sample Distance) до 25 сантиметрів;
- Найбільш ефективні параметри для операцій масштабування (Scale) й об'єднання (Merge) при виконанні кадастрових проєктів встановлено у діапазоні Scale = 60–70 та Merge = 80–90 відповідно;
- Додаткова обробка даних у середовищі ARCGIS сприяє значному підвищенню просторової коректності результатів, забезпечуючи формування векторних елементів, які є топологічно бездоганними та готовими для безперешкодного включення до національних кадастрових геоінформаційних систем (ГІС);
- Зроблені висновки однозначно демонструють значні можливості інтеграції ГІС-методологій та технологічних рішень на базі БПЛА (дронів) для актуалізації кадастрових планів, здійснення контролю за використанням земельних фондів, а також для цілей просторового планування на територіях сільської місцевості.

Отже, застосування об'єктно-орієнтованих підходів до аналізу візуальних даних у сукупності з геоінформаційними системами (ГІС) формує фундамент для створення наступної генерації кадастрових рішень, які зможуть ефективно обробляти значні масиви просторової інформації, автоматично ідентифікувати зміни в контурах та гарантувати їхнє безперервне цифрове актуалізування.

Глибший розгляд того, як параметри масштабування та агрегації впливають на результати автоматизованого розпізнавання контурів, виявив виразну кореляцію між рівнем деталізації візуального матеріалу та загальною кількістю виділених сегментів.

Коли показники рівнів збільшення та інтеграції у алгоритмі ENVI FX ставали меншими, він генерував значно більшу кількість контурних об'єктів для всіх передискретизованих ортофотознімків, отриманих з БПЛА.

Причиною цього є те, що при мінімальному рівні масштабування програмне забезпечення реагує навіть на мінімальні спектральні відмінності, сприймаючи найдрібніші нерівності поверхні як самостійні фрагменти.

Подібні встановлені значення є дуже зручними для глибокого аналізу деталей, але спричиняють надмірну роздробленість обрисів і ускладнюють подальший процес перетворення меж у векторний формат з метою створення кадастрових карт.

З іншого боку, зростання показників масштабування та об'єднання призводило до поступового зменшення кількості визначених меж, що вказує на більш узагальнене сприйняття ландшафту (Мал. 4).

Найвідчутніше зниження числа окреслених об'єктів для сегментації фіксувалося при значеннях масштабу, що коливалися від 70 до 80, а також рівні об'єднання 95–99.

Саме тоді процедура починала інтегрувати сусідні зони зі схожими спектральними ознаками в спільні полігональні об'єкти.

Ця закономірність особливо чітко проявляється на знімках із меншою деталізацією, де контури менш виразні, і це підвищує ймовірність їхнього злиття.

Ба більше, з'ясовано, що зниження величини приросту параметра консолідації (λ) до одиниці в проміжку 95–99 робить процедуру сегментації гіперчутливою: навіть мізерна модифікація цього значення спричиняє значне скорочення числа виявлених границь.

Така особливість функціонування алгоритму детермінується тим, що на підвищених значеннях λ система оперує поблизу межі тотального злиття об'єктів, і навіть незначне зростання провокує «злиття» великого обсягу контурів.

Задля встановлення найбільш сприятливих значень параметрів масштабування та інтегрування, які можна використовувати для автоматизованого виявлення меж кадастрових одиниць, було обрано процедуру відсіювання результатів, ґрунтуючись на мінімальній площі об'єктів, задокументованій у референсних відомостях.

Завдяки такому рішенню вдалося відкинути невеликі полігональні утворення, нетипові для фактичних земельних наділів, і сфокусувати увагу на контурах, що несуть кадастрову цінність.

Отримані після відсіювання дані, представлені на ілюстрації 3.3, свідчать про те, що найвища ступінь кореляції з еталонними вибірками фіксується при діапазонах масштабування 60–70 та діапазонах об'єднання 80–90.

У цьому інтервалі спостерігається ідеальна рівновага між ступенем деталізації та рівнем узагальнення контурів: система ідентифікує об'єкти, які максимально точно відображають фактичні ділянки за їхньою геометрією та площею, з рекордно низькою кількістю помилкових виділень (як зайвих, так і пропущених меж).

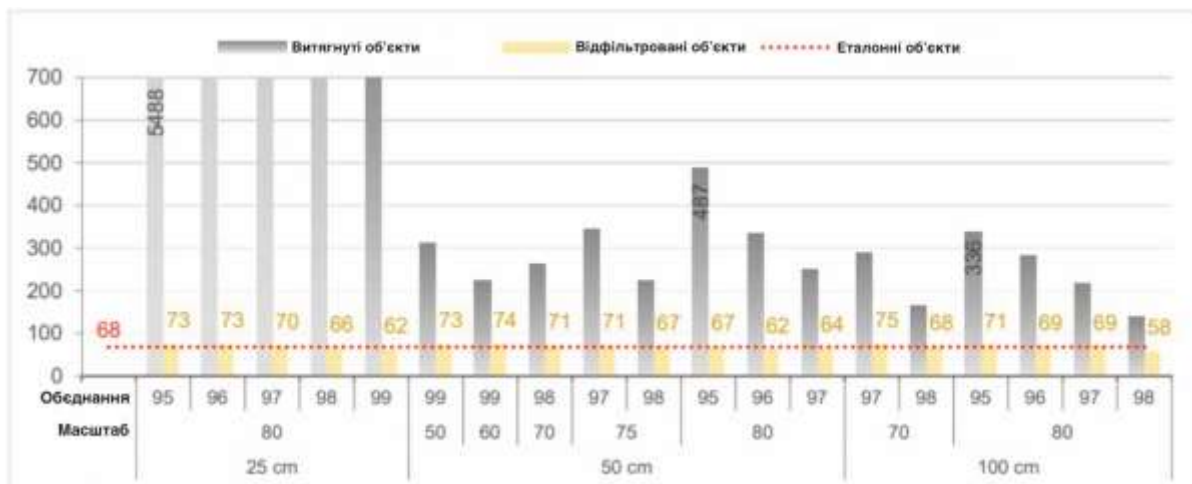


Рисунок 3.3 - Порівняння кількості вилучених та відфільтрованих об'єктів

Підсумовуючи, отримані дані доводять, що стратегічно вірне налаштування параметрів масштабування та об'єднання меж відіграє вирішальну роль у гарантуванні топологічної бездоганності та просторової точності меж, автоматично визначених у межах кадастрових геоінформаційних систем.

Аналіз параметрів, що визначають масштабування та об'єднання, продемонстрував пряму кореляцію їхніх ідеальних значень із просторовою деталізацією знімків, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Зокрема, для ортофотопланів із високою чіткістю (GSD 25 см) найефективніше автоматичне визначення меж досягалося при використанні масштабу 80 і рівнях об'єднання в діапазоні 95–99.

Ця комбінація дозволяє досягти оптимального компромісу: зберегти найдрібніші деталі контурів, одночасно відфільтровуючи контури-шуми, які не мають жодного відношення до кадастрових об'єктів.

Що стосується ортофотопланів із меншою деталізацією (GSD 50 см та 100 см), оптимальні налаштування змістилися: найкращі результати забезпечують масштаб 70–80 та рівні об'єднання 95–98 (відповідно до візуалізації на рис. 6).

Причина цього полягає в тому, що з більшим GSD (відстань між центрами пікселів) зменшується контраст між об'єктами, розташованими поруч.

Занадто сильне зменшення розміру зображення (зниження масштабу) може призвести до виникнення штучних границь через відмінності в спектральних характеристиках.

Виявлено кілька місцевих відхилень для GSD 50 см, де алгоритм показував кращі результати при нижчих значеннях масштабування (50–60) та найвищому показнику об'єднання.

Це, можливо, пов'язано зі специфікою поверхневої текстури та нерівномірним розташуванням об'єктів — зокрема, межами між ділянками, розділеними вузькими шляхами або ділянками рослинного покриву.

Спільна тенденція, що підтверджується для будь-яких рівнів GSD, свідчить, що ідеальні налаштування масштабування та об'єднання для кадастрового картографування знаходяться в діапазонах 70–80 та 95–99 відповідно (див. рис. 5).

Здобуті показники чудово корелюють із висновками попередніх розвідок стосовно взаємозалежності просторової чіткості та продуктивності методів сегментації в ENVI FX, доводячи надійність і повторюваність цієї процедури.

Для ґрунтовнішого дослідження відібрали об'єкти, що були найкраще визначені за параметрами масштабування 80 та об'єднання 95.

Вибір пояснюється тим, що саме при цій конфігурації досягалася максимальна кількість відсіяних полігонів із збереженням первинної топологічної структури граничних ліній (див. рис. 3.4).

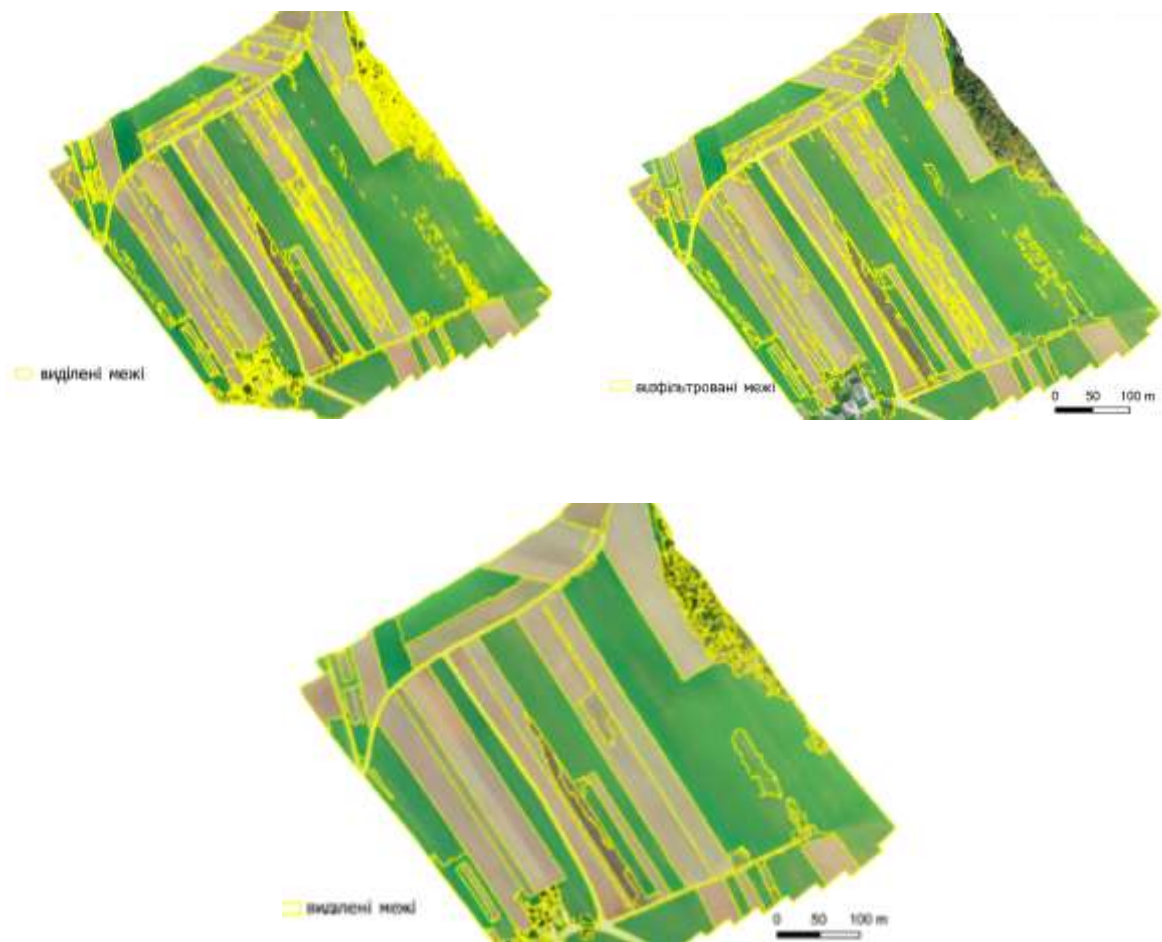


Рисунок 3.4 Вилучені об'єкти на рівні масштабування

На додаток, зазначений вище перелік параметрів був ідентичний для всіх трьох ступенів просторової деталізації, що значно полегшує уніфікацію процедури опрацювання кадастрової інформації в межах інтегрованої ГІС-методології.

Щодо фінально визначених оптимальних груп об'єктів, до них також було імплементовано механізм фільтрації, який забезпечив вилучення полігональних елементів, площа яких була меншою за мінімально допустиму межу, розраховану виходячи з еталонних контурів.

Завдяки цьому підходу вдалося сформувати контури, що є структурно гармонійними, топологічно бездоганними та повністю релевантними вимогам, висунутим до кадастрового картографування.

Внаслідок виконаних дій отримано скупчення спрощених та селектованих контурних об'єктів, які можна застосовувати для подальшого внесення до геоінформаційної бази даних.

Зазначені контури можуть слугувати базою для актуалізації кадастрової документації, формування спеціалізованих шарів землеустрою чи автоматизованої перевірки офіційних меж у реєстрових системах Держгеокадастру.

Отже, проведене вивчення надало змогу встановити найкращі налаштування алгоритму ENVI FX, які гарантують найвищу точність та стійкість автоматичного розпізнавання кадастрових контурів на знімках з різною просторовою роздільною здатністю, а також довести доцільність використання уніфікованого ГІС-підходу для територій різноманітного характеру.

Після векторизації контурів і подальшої постобробки, впроваджено ще один ступінь — програмне раціоналізування граничних об'єктів.

Це робилося для того, щоб зменшити число кутових точок полігонів, водночас зберігаючи геометричну прецизійність та просторове співвідношення до справжніх межових ліній кадастру.

Техніка спрощення опрацьовувала як початкові (неочищені), так і вже просіяні об'єкти.

Це надало можливість виявити, як ступінь узагальнення впливає на якість точкового визначення меж.

Аналіз виявив, що послідовне вирівнювання і наступне раціоналізування межових ліній дають оптимальну рівновагу між точністю та топологічною гармонією.

Зокрема, в тих випадках, коли спочатку проводилося вирівнювання ідентифікованих меж, а потім застосовувалася процедура спрощення, то похибка точкового визначення спрощених об'єктів майже не відрізнялася від похибки вихідних, виділених контурів (див. рис. 3.5).

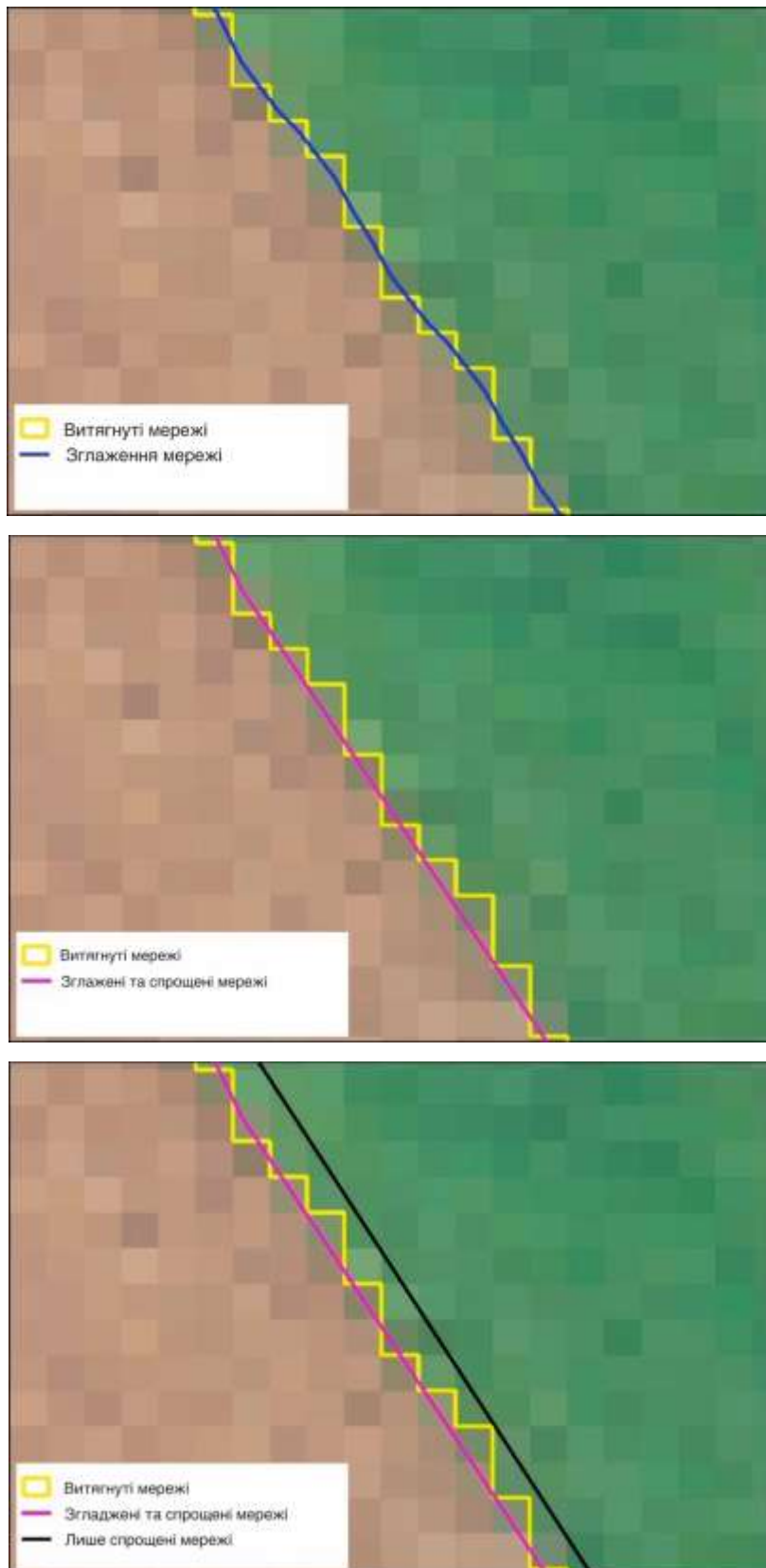


Рисунок 3.5 - Вилучені об'єкти, згладжені та спрощені

Це підтверджує, що попередня операція згладжування перед подальшим спрощенням суттєво стабілізує геометрію лінійних об'єктів, мінімізуючи різкі стрибки, які могли б спричинити небажані зміщення після процедури спрощення.

Також ранні випробування засвідчили, що застосування алгоритму спрощення безпосередньо (тобто без попереднього етапу згладжування) може призводити до локальних відхилень границь від їхнього оригінального розташування.

Подібні відхилення стають особливо виразними у точках критичних змін кута напрямку границі чи на відрізках зі складною просторовою конфігурацією – зокрема, на контурах лісових масивів або нерегулярних обрисах орних земель.

Ця обставина виникає через те, що пряме спрощення алгоритмічно усуває вузли без аналізу локальних коливань кривизни лінії, що в окремих випадках призводить до знецінення просторової точності.

Натомість, комбінація згладжування за допомогою фільтра Кальмана та подальшого геометричного спрощення гарантувала високу рівність контурів і забезпечило збереження їхньої структурної цілісності.

Цей метод дає змогу запобігти спотворенню форми та вважається рекомендованою стандартною операцією після оброблення, необхідною під час оформлення кадастрових кордонів, отриманих із аерофотозйомки безпілотними літальними апаратами.

Отож, висновки підтверджують, що поетапний, двофазний підхід до обробки, який поєднує згладжування і спрощення, виявляється оптимальним для узагальнення об'єктів-меж у ГІС.

Це пояснюється тим, що такий метод дозволяє не лише забезпечити високу точність розміщення об'єктів у просторі, але й покращити топологічну коректність полігональних даних, а також суттєво зменшити

помилки зміщення позиції, що є критично важливим для наступного застосування цих даних, зокрема, у кадастровій картографії.

Для визначення просторової достовірності автоматично ідентифікованих об'єктів, що позначають межі, було використано прийом накладання буферних зон (Buffer Overlay Method).

Сутність цього методу полягає у проведенні порівняльного аналізу між просторовим розміщенням згенерованих контурів і еталонно заданими межами шляхом створення навколо останніх зон-буферів фіксованої товщини.

Цей підхід знайшов своє застосування для всіх чотирьох категорій інформації: отриманих об'єктів, спрощених отриманих об'єктів, профільтованих об'єктів та спрощених профільтованих об'єктів.

Це забезпечило ґрунтовну оцінку впливу кожної стадії обробки на кінцевий рівень якості результатів.

Згідно з результатами проведеного аналізу, розбіжність в оцінці точності між початковими та спрощеними об'єктами виявилася несуттєвою, що є вагомим доказом дієвості використаного алгоритму спрощення.

Факт збереження просторового розташування об'єктів навіть після їхньої геометричної генералізації підтверджує правильний порядок дій при обробці даних та загальну надійність застосованої методології (див. табл. 3.2–3.5).

Таблиця 3.2 - Оцінка точності виділення меж для 25 см, масштаб 80, злиття

95

Ширина буфера [см]	Повнота [%]		Точність [%]		Якість [%]	
	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані
25	58	37	18	26	16	20
50	73	48	28	39	26	31
100	78	56	38	50	36	41
200	81 (81)	61 (62)	48 (49)	59 (61)	46 (46)	50 (48)

Таблиця 3.4 - Оцінка точності виділення меж для 50 см, масштаб 80, злиття 95.

Ширина буфера [см]	Повнота [%]		Точність [%]		Якість [%]	
	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані
25	45	40	28	35	21	23
50	64	55	46	56	38	41
100	71	61	57	68	48	52
200	75 (74)	65 (67)	65 (66)	76 (77)	56 (53)	59 (56)

Таблиця 3.5 - Оцінка точності виділення меж для 100 см, масштаб 80, злиття 95

Ширина буфера [см]	Повнота [%]		Точність [%]		Якість [%]	
	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані	Виділені	Відфільтровані
25	31	27	21	24	14	15
50	53	47	39	43	29	30
100	67	59	58	64	47	47
200	73 (71)	63 (67)	66 (66)	72 (73)	55 (52)	55 (52)

Значний акцент було зроблено на тому, як просторова роздільна здатність (ПРЗ) впливає на метрики точності.

З буферною зоною 2 метри, найвищі показники коректності фіксувалися при ПРЗ 50 см і ПРЗ 100 см, де 66% меж були ідентифіковані правильно.

Це можливо пояснити тим, що зниження детальності візуального матеріалу сприяє зменшенню шуму та виключенню надмірних невеликих елементів, які інколи помилково класифікуються як справжні межі.

Метод усунення малих полігональних об'єктів значно покращив коректність фінальних результатів для всіх значень ПРЗ.

Усунення дрібних, тих що не потрапили до кадастру, об'єктів посприяло зменшенню кількості хибнопозитивних контурів, що, зі свого боку, підвищило точність ідентифікації при ледь помітному зменшенні показника повноти.

Такий результат відповідає принципам теорії просторової генералізації, згідно з якою процес спрощення моделі неминуче веде до втрати незначних, хоча й малих за розміром, деталей.

Найвищі показники серед усіх підходів до обробки були зафіксовані для відфільтрованих об'єктів при просторовій роздільній здатності (GSD) 50 см (див. рис. 3.6): тут правильність сягнула 77%, тоді як повнота склала 67%.

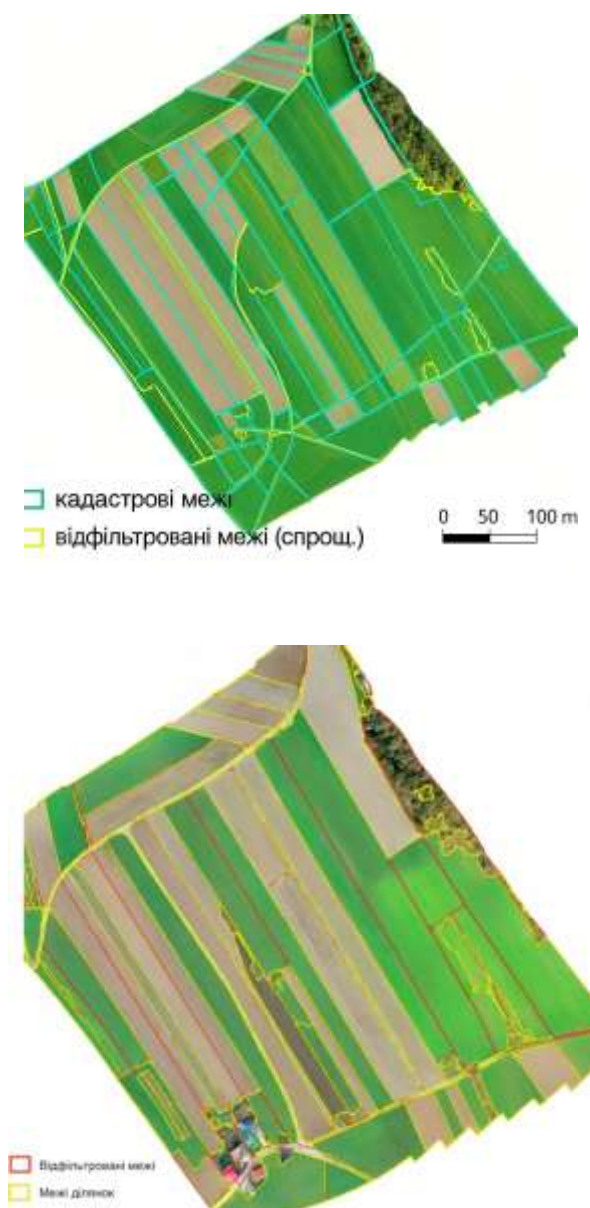


Рисунок 3.6 - Відфільтровані об'єкти рівня масштабування 80 та рівня об'єднання 95

Подібні кількісні дані є цілком прийнятними для цілей кадастрового картографування аграрних земель, оскільки ключовим завданням тут є якісне відображення зовнішніх меж значних за площею угідь, а не документування дрібних, локалізованих видозмін.

У підсумку, аналіз точності засвідчив: використання методів фільтрації та спрощення у поєднанні з правильно підібраними налаштуваннями масштабування й агрегації дає змогу формувати кадастрові контури, які вирізняються геометричною стійкістю, топологічною бездоганністю та високою надійністю, що робить їх ідеальними для включення у просторово-орієнтовані інформаційні системи (ГІС).

Отже, представлені результати підтверджують ефективність та практичну цінність обраної методології для автоматизованого процесу актуалізації кадастрових планів і спостереження за змінами у використанні земельних ресурсів.

4 АВТОМАТИЗОВАНЕ КАДАСТРОВЕ КАРТОГРАФУВАННЯ

4.1. Методика автоматичного вилучення меж

Найважливий робочий процес створювався з огляду на необхідність розробки автоматизованого методу кадастрового картографування, що ґрунтується на даних БПЛА, і передбачає залучення модуля ENVI Feature Extraction (ENVI FX) для ідентифікації помітних меж земельних ділянок (див. рис. 2.1).

Методологія охоплювала чотири головні фази:

1. початкове опрацювання візуальних даних;
2. ідентифікація та відокремлення контурів;
3. доопрацювання отриманих результатів;
4. верифікація коректності застосованого підходу.

На етапі початкового опрацювання здійснювалася зміна вибірки аерофотознімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів.

Це дало змогу вивчити, як саме просторова деталізація (GSD) впливає на ефективність та якість процедури сегментації.

Здобуті дані яскраво продемонстрували, що операції з підвищенням GSD (тобто, коли маємо справу з менш деталізованими знімками) призводять до зростання швидкості розрахунків і зменшення обсягу ідентифікованих контурів.

Натомість, зменшення GSD (що означає кращу деталізацію) збільшувало кількість ідентифікованих прикордонних об'єктів, хоча й коштом значного збільшення ресурсів для обчислень.

Отже, просторова роздільна здатність пікселя є ключовим елементом, який визначає оптимальний баланс між точністю вимірювань і швидкістю процесу ідентифікації межових ліній для цілей кадастру.

Сам процес виявлення та відокремлення кордонів (друга фаза) безпосередньо залежав від конкретних налаштувань, таких як Рівень масштабування (Scale Level) та Рівень злиття (Merge Level), які використовувалися всередині програмного модуля ENVI FX.

Зменшення числових показників цих характеристик спричиняло зайве роздроблення, де загальна чисельність ідентифікованих об'єктів могла сягати кількох тисяч одиниць.

У подібних ситуаціях комп'ютерна програма трактувала навіть найменші коливання текстури поверхні як окремі, незалежні межі.

На противагу цьому, використання завищених значень цих конфігурацій провокувало надмірне узагальнення, наслідком чого було об'єднання сусідніх фрагментів в одну цілісну область.

Ключовим завданням на цій стадії була потреба у знаходженні оптимальної золоті середини між загальною кількістю елементів, автоматично позначених системою, та фактичною кількістю еталонних меж, які були встановлені до цього.

Особливо ефективними для автоматизованого знаходження помітних меж землекористування стали саме ті значення параметрів масштабування та групування, які дозволяли отримати число виділених об'єктів, максимально наближене до фактичної кількості кадастрових ділянок.

Метою наступного, третього етапу — постобробки результатів — було визначення найбільш слушних рівнів для масштабу та об'єднання, а також підвищення точності геометричних форм через їхнє спрощення та коректне згладжування контурів.

Шляхом фільтрації отриманих даних було встановлено, що оптимальні параметри складають: діапазон масштабу — 70–80, а для об'єднання — 95–99.

Власне, ці межі частот (спектральні діапазони) дозволяли з максимальною точністю відтворити обриси меж земельних ділянок

(кадастру) у межах досліджуваної ділянки, яка переважно складалася з відкритого рілля (аграрних угідь), транспортних магістралей і мінімальної кількості споруд (забудови).

Варто підкреслити, що вибрані (описані) налаштування (параметри) не є універсальними і можуть потребувати корекції в залежності від морфології (типу) ландшафту.

У випадках, коли територія має значну концентрацію будівель, високу щільність зелених насаджень або складну топографію, вимагається проведення додаткових досліджень для оптимізації та налаштування параметрів функціонування (алгоритму).

Відтак, отримані на цей час висновки доцільно сприймати як вихідну точку (базові показники) для регіонів з переважаючим аграрним характером (сільської місцевості), тоді як для ділянок зі значною концентрацією міської інфраструктури (урбанізованих зон) необхідне подальше уточнення (калібрування) методології процесу.

Коли вже обрані найкращі параметри, етапи корекції масштабування та зведення об'єктів можна не включати в наступні ітерації опрацювання даних. Це значно спрощує та пришвидшує загальний робочий процес (див. рис. 2.2).

Завдяки включенню етапів очищення даних, вирівнювання та спрощення контурів, вдалося підвищити топологічну точність прикордонних об'єктів та забезпечити надійність їхнього розміщення у просторі в межах геоінформаційних систем (ГІС).

Застосування такої комплексної методики дало змогу сформувати контури, які є водночас геометрично точними, але й достатньо спрощеними для їх подальшого внесення до реєстрів кадастрових даних.

Остання фаза, яка включала оцінювання достовірності, ґрунтувалася на методі накладання із застосуванням буферних зон.

Цей підхід дає можливість визначити, наскільки просторово співпадають автоматично виявлені межі з тими, що прийняті як еталонні.

З розширенням зони буфера зафіксовано зростання повноти, точності та загальної якості метрик, оскільки більша захисна зона ефективно нівелює невеликі локальні відхилення у визначенні місця розташування.

Для забезпечення єдиного підходу до оцінювання, у межах даного аналізу порівняння результатів здійснювалося із застосуванням буфера радіусом 2 м, що відповідає стандартним вимогам до точності, які зазвичай застосовуються у кадастровій практиці для територій сільської місцевості.

Водночас, для офіційного зіставлення з даними кадастрових планів, доцільно використовувати параметри буферних зон, визначені згідно з місцевими нормативними актами щодо допустимої точності.

Дотримання цієї умови гарантує відповідність отриманих показників національним стандартам та підсилює їхню юридичну валоризацію.

Загалом, застосована методологія опрацювання даних ідеально вписується у стандартну архітектуру сучасних Географічних Інформаційних Систем (ГІС), спеціалізованих на кадастровому картографуванні.

Це досягається завдяки ефективному поєднанню передових функцій комп'ютерного зору, технологій знімкування Землі з висоти (дистанційного зондування) та потужних інструментів просторового аналізу.

Ключова цінність цієї системи полягає у вбудованих автоматизованих етапах: це і фільтрація даних для усунення зайвих або занадто дрібних об'єктів, і процедура згладжування контурних ліній, що визначають межі ділянок.

Додатковою перевагою є адаптивна функція регулювання параметрів масштабування, що гарантує значне зростання надійності та прецизійності фінальних картографічних результатів.

Даний підхід пропонує повноцінне, інтегроване рішення для аерофотознімання за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з метою кадастру.

Він не обмежується лише автоматизацією ідентифікації видимих меж, але й істотно знижує вплив суб'єктивних людських рішень.

Завдяки цьому забезпечується високий рівень повторюваності (відтворюваності), максимальна точність і гарантована геометрична коректність просторових даних.

4.2. Оцінка якості

Оцінювання якості автоматично виокремлених контурів засвідчило, що вкрай важко домогтися високого ступеня як повноти, так і точності для різних рівнів деталізації та комбінування елементів.

Коли ці параметри були доведені до граничних позначок, виявилось, що певна кількість об'єктів залишилася поза увагою, а деякі контури втратили свою виразність через надмірне спрощення.

Разом з тим, граничні установки масштабування та групування надали змогу алгоритму ENVI FX ідентифікувати інтегровані сукупності об'єктів, зокрема межі лісових масивів чи окремих смуг дерев, що було особливо помітно при просторовому дозволі 50 см та 100 см (див. рис. 3.3).

Відтак, з'ясувалося, що під час роботи зі зображеннями, які мають відмінну просторову роздільність, нелегко віднайти єдиний набір параметрів, здатний гарантувати як високу повноту охоплення, так і точність у визначенні кордонів.

З цієї причини було використано стратегію фільтрації, основним критерієм якої слугувала найменша площа об'єкта, а також загальна чисельність контурів меж, встановлених на основі еталонних даних.

Застосування цього методу дало змогу знизити ймовірність надлишкового поділу на сегменти та запобігти ігноруванню меж, які мали б бути помітні.

Задля наступного етапу дослідження, були визначені найкращі параметри для обробки: scaling — 80, та злиття (merging) — 95.

Ці значення використовувалися для всіх трьох груп фотографій, що мали різний ґрунт-просторовий інтервал (GSD).

Такий підхід дозволив оцінити, як одне й те саме поєднання налаштувань позначається на результаті при зміні просторової роздільної здатності (див. рис. 3.2).

Варто підкреслити, що обрані параметри не є універсально ідеальними для кожної окремої тестової ділянки.

Наприклад, для невеликих регіонів, точність визначення меж збільшувалася при встановленні найвищих можливих значень параметрів масштабування та об'єднання (див. рис. 3.3).

Зіставний розгляд засвідчив: при незмінному рівні певних характеристик (Масштаб = 80, Злиття = 95) точність результатів мала тенденцію до зростання зі збільшенням GSD — у межах від 25 см до 50 см.

Для GSD, що дорівнював 100 см, показник точності практично не відрізнявся від того, що спостерігався при 50 см.

Таким чином, зі зниженням детальності вхідного зображення, розроблений алгоритм стає менш чутливим до випадкових локальних шумів, що, своєю чергою, покращує стійкість кінцевих рішень.

Як підсумок, GSD у 50 см продемонстрував найвищу продуктивність серед трьох випробуваних варіантів у процесі ідентифікації помітних меж кадастрових ділянок.

Якісний розбір, здійснений щодо автоматично отриманих, відсіяних та мінімізованих компонентів, виявив відсутність помітної відмінності у показниках вірогідності між початковими та спрощеними контурами.

Даний факт засвідчує надзвичайну стійкість застосованої методики зменшення об'єму, оскільки вона забезпечила збереження вихідної географічної позиції кордонів без значних викривлень.

Незважаючи на те, що процедура мінімізації не зробила значного впливу на числові виміри чіткості, вона володіє критичною утилітарною вагою у сфері кадастрового моделювання.

Межі об'єктів кадастру традиційно зображаються прямими відрізками, де кількість кутових точок є мінімальною.

Це спрощує їх подальше збереження, обробку в системах та інтеграцію до геоінформаційних сховищ.

Експериментальні дані показують, що при використанні масштабу 80 та ступеня агрегації 95, повнота меж, що були автоматично розпізнано, становила 74%.

Тоді як їхня точність дорівнювала 66% за умови GSD у 50 см.

Використання методу фільтрації значно поліпшило ці параметри: повнота зросла до 67%, а точність — до 77%.

Отже, показник точності (правильності) автоматично знайдених меж наблизився до 80%.

Це вважається досить високим показником для використання у кадастрових потребах.

Удосконалення акуратності пояснюються тим, що було прибрано невеликі об'єкти, що не стосувалися кадастру, спеціально видалено контури, розташовані у лісових масивах та зонах забудови на ортофотознімку, які жодним чином не відображали реальні межі земельних ділянок.

Як наслідок, фінальна карта меж вміщувала виключно добре окреслені контури об'єднаних об'єктів — це були лінії, що відділяли поля, дорожні смуги та ряди насаджень (рис. 3.5).

Щодо дорожньої мережі, вдалося досягти приблизно 85% точності та 70% повноти покриття, що є дуже добрими практичними результатами для цілей моделювання простору.

Треба пам'ятати, що нелегко досягнути таких показників при автоматизованому окресленні всіх помітних границь кадастрових одиниць, оскільки обриси меж земельних ділянок набагато складніші за контури прямолінійних об'єктів, наприклад, автомобільних шляхів.

Встановлення точності ґрунтувалося на еталонних контурах, визначених ручним способом (рис. 2.1).

Для формування контрольних наборів інформації застосовувалась візуальна інтерпретація аерофотознімків, зроблених безпілотниками, а видимі граничні лінії переносилися в цифровий формат оператором вручну.

Хоча може існувати варіативність в оцифруванні між різними виконавцями, у цьому конкретному проекті переважна частина контурних ліній була ясно окреслена, що знизило до мінімуму вплив людської суб'єктивності.

Слід звернути увагу, що ми не застосовували офіційні матеріали кадастру, тому що відображені в них межі не збігалися з фактичними, видимими елементами на ортофотоплані (рис. 2.1), що потенційно могло викривити фінальні показники оцінювання.

З цієї причини, застосування програмного комплексу ENVI FX у комбінації з інструментами ГІС для автоматизованого окреслення кордонів засвідчило свою ефективність як дієва методика для формування, актуалізації та перевірки точності кадастрових планів.

Як наслідок, підхід до автоматизованого визначення чітких візуальних границь, що базується на обробці знімків з безпілотних літальних апаратів, продемонстрував свою працездатність у різних практичних сценаріях:

- гарантує стійку точність, що перевищує 75%, навіть з урахуванням відсіювання малих об'єктів контуру;
- зберігає ключові топологічні характеристики кордонів навіть після процесу їхнього спрощення;
- дозволяє гнучко змінювати робочі параметри відповідно до специфіки території, наприклад, для суто сільських угідь чи районів зі змішаним типом забудови.

Відповідно, сукупність отриманих даних підтверджує, що розроблена ГІС-технологія є повністю виправданою для використання у поточних завданнях кадастрового обліку, картографії та моніторингу земельних ресурсів.

4.3 Переваги та обмеження методу ENVI FX

Задіяння функціоналу модуля ENVI Feature Extraction (ENVI FX) у межах реалізованого алгоритму дій засвідчило низку вагомих переваг, які підтверджують його можливість використовуватися для автоматизованого складання кадастрових мап.

Ключовою сильною стороною є здатність ENVI FX опрацьовувати весь масив ортофотопланів, отриманих із безпілотників, при цьому не вимагаючи їх попереднього з'єднання в мозаїку чи додаткових трансформацій форматів файлів.

Це суттєво полегшує виконання робочих завдань, мінімізує витрати часу на обробку інформації та знижує вірогідність виникнення помилок при послідовному виконанні операцій.

Важливою перевагою ENVI FX є також те, що він самостійно створює замкнені контури об'єктів у векторному вигляді, що дозволяє отримати топологічно правильні багатокутники, які одразу можна використовувати в геоінформаційних системах (див. рис. 3.4).

Таким чином, усувається потреба у додаткових стадіях фінальної обробки, як-от ручне переведення контурів у векторний формат або їхня подальша топологічна перевірка.

Для кожного ідентифікованого об'єкта формується комплект просторових, спектральних та текстурних характеристик, які автоматично заносяться до таблиці атрибутів, що надалі спрощує їх класифікацію та подальший аналіз отриманих даних.

Здобуті векторні, прив'язані до місцевості обриси відіграють ключову роль у процесах кадастру, оскільки дають можливість швидко формувати або актуалізувати документацію щодо землеустрою без необхідності тривалих очних інспекцій на місцях.

У аграрних регіонах, де домінують великі, відкриті території з помітно окресленими природними кордонами, інструментарій ENVI FX засвідчив значний потенціал у виявленні меж земельних наділів.

Проте, цей підхід не позбавлений певних недоліків.

Зіставлення здобутих результатів із показниками інших методик автоматизованого окреслення меж на цей час є ускладненим через розбіжності в умовах, за яких збиралися дані, - типи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), якісні характеристики датчиків, рівень освітлення, пора року, а також рельєфні особливості досліджуваного району.

Для забезпечення об'єктивного порівняння між різними алгоритмами потрібне їхнє застосування на одній і тій самій ділянці.

Серед наявних рішень, такі підходи, як MRS (Мультироздільна Сегментація), ESP (Оцінка Параметра Масштабу) та Сегментація методом Зсуву Середнього (Mean-Shift Segmentation), також генерують векторні багатокутники й не вимагають додаткового зшивання (мозаїкування).

Однак, метод gPb (Глобалізована Ймовірність Межі), на відміну від програмного продукту ENVI FX, потребує подальшої конвертації растрових

контурів у векторний формат і не є ефективним для обробки габаритних зображень (розміром понад 1000×1000 пікселів).

У цьому контексті ENVI FX гарантує завершений векторний результат і топологічну цілісність отриманих меж без необхідності додаткових стадій обробки.

Одним із помітних недоліків, що був виявлений, є підвищена сприйнятливість системи ENVI FX до затінених зон та варіацій у світловому потоці.

Регіони, прикриті тінню, здатні бути хибно розтлумачені системою як контури об'єктів, що є особливо актуальним для ортофотопланів, які були зроблені при високому куті нахилу сонця.

Щоб знизити вплив цього явища, радиться проводити фотографування у період близько полудня або ж за умови хмарної погоди, коли тіні мають найменшу виразність.

Ще одним чинником, який може впливати на кінцеву точність, виступають погодні умови — рух повітря, рівень вологості та коливання освітленості, що призводять до змін спектральних ознак досліджуваної поверхні.

Додаткове обмеження полягає в тому, що ENVI FX є комерційним програмним продуктом без відкритого вихідного коду, на відміну від таких плагінів для ARCGIS, як, наприклад, Mean-Shift чи SLIC.

Це створює труднощі для його широкого впровадження у відкритих кадастрових системах, де пріоритетним є використання вільно доступних та поширюваних інструментів.

Окрім того, було виявлено, що виділені на передискретизованих зображеннях межі об'єктів нерідко збігаються з контурами пікселів, що вимагає проведення подальших операцій згладжування та спрощення їхньої форми, щоб їхня геометрія відповідала кадастровим одиницям, прийнятим у ГІС.

З огляду на те, що морфологічна будова кадастрових кордонів є значно складнішою, ніж у природних або штучних фізичних об'єктів (як-от автошляхи, лісові смуги, водотоки), досягнення повної автоматизації процесу ідентифікації меж земельних ділянок наразі залишається нездійсненим завданням.

Процедура фінальної верифікації отриманих даних має обов'язково відбуватися за безпосередньої участі як власників земельних активів, так і уповноважених представників установ, що здійснюють ведення кадастрового реєстру.

Додатковою проблемою є те, що даний підхід здатний виявляти лише ті межі, які візуально помітні, тоді як у контексті реального кадастрового обліку певна кількість меж має суто умовний характер або ж фізично не маркована на ландшафті.

Зокрема, дві суміжні ділянки, які перебувають у власності однієї особи, нерідко обробляються спільно, формуючи єдиний сільськогосподарський масив без будь-якої чіткої видимої лінії розмежування.

Отже, автоматичне визначення видимих границь слід сприймати як фазу, що підтримує створення кадастрової інформації, а не як абсолютно самостійний вид діяльності.

Важливо також брати до уваги нормативні перешкоди, що стосуються використання БПЛА — у численних місцевостях діють унікальні правила для польотів, які роблять застосування дронів обмеженим в межах забудов або біля критично важливих споруд.

Це звужує потенціал для масового застосування цього підходу в умовах міст.

Таким чином, система ENVI FX продемонструвала відмінну результативність у сільській місцевості, особливо там, де об'єкти мають чіткі просторові межі.

Проте для застосування в умовах міських забудов необхідна корекція робочих параметрів, вдосконалення методів нівелювання ефекту тіні, а також спільна робота з додатковим інструментарієм ГІС, що забезпечить підвищену надійність одержуваних даних.

4.4. Застосування у ГІС середовищі

Автоматизований метод складання кадастрових мап, який ми використали, довів свою ефективність і практичність у процесі створення та актуалізації кадастрових планів у контексті геоінформаційних систем.

Фінальні дані надаються у векторному форматі з геоприв'язкою, що гарантує абсолютну сумісність із провідними ГІС-додатками, як-от ArcGIS, Global Mapper та іншими.

Це дозволяє безпосередньо вносити видобуті лінії меж до просторових баз даних.

Відсутність необхідності в конвертації чи додатковій обробці даних спрощує подальшу роботу, пов'язану з аналізом та картографією.

Запропонований процес, завдяки своїй багатогранності, знаходить застосування там, де немає кадастрових карт, або ж ті, що існують, є застарілими, а також у місцевостях з реалізованою ідеєю «Кадастру, придатного для цілей» (Fit-For-Purpose Cadastre).

Ця методика дає можливість оперативно формувати основні кадастрові компоненти, сфокусовані на потребах конкретних населених пунктів, уникнувши при цьому тривалих і фінансово затратних виїздів на місцевість.

Найбільш результативним цей метод виявився в аграрних районах, оскільки фізичні розділові лінії (шляхи, зрошувальні канали, захисні смуги дерев, контури полів) чітко видно на аерофотознімках, зроблених дронами.

За таких обставин робочий процес може бути задіяний як безпосередньо для початкового формування кадастрових планів, так і для актуалізації та ретельної перевірки наявних координат.

Якщо порівнювати з внесенням даних вручну, то автоматизоване ідентифікування видимих кордонів дає змогу істотно скоротити часові та матеріальні витрати, одночасно гарантуючи незмінно високу якість отриманих даних.

У державах з розвинутою економікою цей підхід може слугувати інструментом для зіставлення чинних кадастрових документів із фактичним розподілом та використанням земельних ділянок.

У ситуаціях, де фіксуються невідповідності між документально встановленими кордонами та існуючими обрисами власності, виявлені візуальні межі можуть слугувати відправною точкою для нового кадастрового вимірювання чи перерозмежування земельних наділів.

Це означає, що такий метод допомагає зміцнити відкритість і правдивість даних у земельних кадастрах.

Крім того, цей спосіб дозволяє впровадити комбіновану стратегію оновлення кадастрових даних: якщо виникає потреба у більшій точності, просторові елементи, визначені автоматизовано, можуть бути скориговані фахівцями (ручний режим) із використанням аерофотознімків, отриманих з безпілотників, або ж підтверджені шляхом традиційних геодезичних вимірювань на місцевості.

Таким чином досягається найкращий компроміс між оперативністю виконання завдань, фінансовими витратами та достовірністю отриманих вислідів.

Ключовим моментом незмінно лишається перевірка визначених меж безпосередньо місцевими жителями та тими, хто володіє землею.

Для забезпечення юридичної сили кадастрових відомостей, усі контури, ідентифіковані автоматизовано, потребують затвердження з боку

зацікавлених сторін — тобто господарів і тих, хто користується цими земельними об'єктами.

Ця методологія узгоджується з ідеями кадастру, заснованого на участі (Participatory Cadastre), який об'єднує автоматизовані технології та законність правового поля.

У сукупності, цей запропонований підхід до робочого процесу прокладає шлях до всеохоплюючої цифрової перебудови кадастрової сфери, особливо в державах, що розвиваються, де нагально потрібне оперативне, економічно доступне та безпомилкове формування кадастрових реєстрів.

Він інтегрує високу технологічну результативність знімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), значний аналітичний потенціал середовищ географічних інформаційних систем (ГІС) та абсолютну точність алгоритмів комп'ютерного зору, створюючи надійний фундамент для розгортання автоматизованих систем управління земельними ресурсами нової генерації.

ВИСНОВКИ

У рамках проведення магістерського дослідження мною було сформовано та успішно перевірено на практиці методологію автоматизованого картографування кадастрових даних.

Цей процес базувався на аналізі знімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), та включав використання спеціалізованого модуля ENVI FX в середовищі ГІС.

Основне завдання цього інструменту полягало в автоматичному розпізнаванні та точному виділенні візуальних контурів об'єктів.

Головна настанова цього наукового пошуку полягала у створенні високопродуктивної процедури, що забезпечувала б гармонійне поєднання можливостей технологій дистанційного зондування Землі, принципів фотограмметрії та геоінформаційного аналізу.

Це злиття мало слугувати єдиним, цілісним підходом для здійснення цифрового оновлення кадастрових реєстрів.

Початкова фаза дослідження сконцентрувалася на ідентифікації ключових операцій обробки, критично важливих для формування ефективної процедури кадастрового картографування.

При цьому приймалися до уваги можливості та ліміти програмного забезпечення ENVI FX у контексті сегментації та класифікації візуальних даних.

Висновки чітко засвідчили, що найбільш прецизійні видимі контури об'єктів кадастру досягалися на основі ортофотопланів, які характеризувалися значнішою величиною просторової роздільної здатності (GSD).

Було встановлено оптимальні налаштування для процесів масштабування та інтегрування, які забезпечили максимальну якість

результатів: вони знаходились у діапазоні 70–80 для масштабування та 95–99 для операції об'єднання.

Застосована методологія фільтрації сприяла мінімізації чисельності помилково позитивних сегментів, що, в свою чергу, підвищило точність автоматичного розпізнавання меж.

Найвищі показники були зафіксовані для ортофотознімків, отриманих з БПЛА з розміром пікселя (GSD) 50 см, де достовірність (точність) сягнула 77 %, а охоплення (повнота) — 67 %.

Ці коефіцієнти демонструють цілком прийнятний рівень для початкового етапу створення кадастрових карт та формування обліку земельних ділянок (земельних реєстрів).

Розроблений алгоритм роботи продемонстрував найбільшу результативність на ділянках, що відповідають сільським ландшафтам, котрі характеризуються наявністю значної кількості добре помітних фізичних демаркаційних ліній (наприклад, автомобільні шляхи, меліоративні канали, границі орних земель).

Ця методика дозволяє суттєво пришвидшити створення нових кадастрових мап, знизити кількість необхідних ручних операцій та організувати систематизований збір земельної інформації, що є критично важливим для потреб ефективного територіального менеджменту.

У країнах із розвиненою економікою цей самий підхід може бути застосований для ревізії та актуалізації раніше створених кадастрів, оскільки автоматично встановлені контури відображають фактичну картину розподілу земельних ділянок.

З іншого боку, для отримання юридичної сили отримані дані мають бути обов'язково верифіковані власниками землі та іншими зацікавленими сторонами під час процедури офіційного підтвердження інформації.

Варто підкреслити, що автоматичне розпізнавання фізичних меж є виключно початковою фазою при створенні цифрової кадастрової карти.

Щоб досягти максимально високої точності, потрібна обов'язкова систематизація отриманих результатів із низкою допоміжних баз даних — зокрема, результатами геодезичної зйомки, даними, зібраними під час польових робіт, а також офіційними юридичними реєстрами.

Надалі, запропонована методика може бути модернізована через впровадження методів спільного географічного збору інформації (Participatory GIS), що дозволить власникам землі безпосередньо долучатися до перевірки та підтвердження розташування меж їхніх ділянок.

Це дасть змогу об'єднати акуратність технологічного процесу із законністю юридичного підґрунтя, сформувавши засади для оновленого, прозорого й стабільного земельного реєстру, що відповідатиме актуальним потребам ефективного використання земель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернігів 2002р.
8. Руденко, В. Г., Мальований М. С. (2020). Геоінформаційні системи та технології в кадастровій діяльності. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 186 с.
9. Бабяк, В. М., & Гладкий, В. І. (2019). Основи дистанційного зондування Землі та цифрової фотограмметрії. – Київ: КНУБА, 212 с
10. Шевченко, В. В., & Корнієнко, А. О. (2021). Використання БПЛА для оновлення топографічних та кадастрових планів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, №93, 32–41.
11. Fetai, Vujar & Oštir, Krištof & Fras, Mojca & Lisec, Anka. (2019). Extraction of Visible Boundaries for Cadastral Mapping Based on UAV Imagery. Remote Sensing.
12. Хей, Г. Дж., Кастілья, Г. (2008). Географічний об'єктно-орієнтований аналіз зображень (GEOBIA): Нова назва для нової дисципліни. У: Об'єктно-орієнтований аналіз зображень. Springer, Берлін, Гейдельберг, 75–89.

13. Лю, Ю., та Мейсон, П. (2009). Основна обробка зображень та ГІС для дистанційного зондування. Чичестер: Wiley-Blackwell.

14. Тернер, Д., Люсьєр, А., та Вотсон, К. (2012). Автоматизований метод створення георектифікованих мозаїк зі знімків БПЛА. Дистанційне зондування, 4(5), 1392–1410.

15. Сюе, Дж., Су, Б. (2017). Значні показники рослинності дистанційного зондування: огляд розробок та застосувань. Журнал датчиків, 2017, 1–17.

16. Zhang, Y., & Lin, H. (2019). Інтеграція БПЛА-фотограмметрії та ГІС для визначення кадастрових меж. *Sensors*, 19(15), 3315.

17. Коева, М., Bennett, R., Gerke, M., & Zevenbergen, J. (2019). Використання БПЛА для управління земельними ресурсами: шлях до підвищення прозорості та ефективності. *Land Use Policy*, 87, 104059.

18. Li, Z., Zhu, C., Gold, C. (2005). Цифрове моделювання місцевості: принципи та методологія. CRC Press.

19. Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). Дистанційне зондування та інтерпретація зображень (7-е видання). Wiley.

20. Берроу, П. А., та Макдоннелл, Р. А. (1998). Принципи геоінформаційних систем. Видавництво Оксфордського університету, Нью-Йорк.

21. Лонглі, П. А., Гудчайлд, М. Ф., Магуайр, Д. Дж., та Райнд, Д. В. (2015). Географічні інформаційні системи та наука (4-те видання). Вайлі.

22. Томпальські, П., Купс, Н. К., та Вайт, Дж. К. (2020). Геопросторове застосування інтеграції даних LiDAR та БПЛА для картографування лісів. *Ліси*, 11(1), 24.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

«Виділення меж земельних ділянок за даними аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів з використанням ГІС (на прикладі території с. Хмелева)»

Обсяг пояснювальної записки: 70 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)