

## ГЕОПРОСТОРОВА ПІДТРИМКА



Стаття та будь-який пов'язаний з нею опублікований матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).  
The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

УДК 528.711.1:528.44

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2026.67.126-134>

Денис БИКОВЕЦЬ, курсант

ORCID ID: 0009-0005-4236-9388

e-mail: d.bikovets2004@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Руслан КОЛЬЦОВ, канд. техн. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-8441-9575

e-mail: koltsov.ruslan@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ПОЛЬОВИХ АЕРОЗНІМАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ОНОВЛЕННЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ПЛАНІВ МІСЦЕВОСТІ

**Вступ.** У статті розглядається актуальна проблема оперативного оновлення топографічних планів масштабу 1 : 500 в умовах гострої необхідності швидкої актуалізації геопросторових даних для потреб інженерії та кадастру. Застосування традиційних методів наземного знімання часто виявляється неефективним через високу трудомісткість. Інтеграція сучасних безпілотних систем у робочий процес забезпечує отримання детальних ортофотопланів із надвисокою розрізненістю. Метою дослідження є обґрунтування та розроблення практичних рекомендацій щодо застосування сучасних топографічних польових аерознімальних комплексів для оновлення великомасштабних планів місцевості.

**Методи.** Для проведення дослідження було задіяно сучасні топографічні комплекси DJI Inspire 2 та спеціалізовані системи P316. Методика дослідження базується на комплексному поєднанні передового фотограмметричного оброблення масивів даних у середовищі Pix4Dmatic і подальшої аналітичної векторизації об'єктів у ArcGIS Pro. Особливу увагу приділено використанню технологій високоточного позиціонування Real Time Kinematic та Post-Processed Kinematic для фіксації координат центрів проєктування. Такий підхід дає змогу забезпечити суворе дотримання геометричних параметрів при побудові цифрових моделей місцевості й автоматизувати процес створення топографічної основи.

**Результати.** Під час дослідження встановлено оптимальні технічні параметри аерознімання та алгоритми цифрового оброблення даних, що дають змогу стабільно досягати середньоквадратичної помилки положення об'єктів у межах 0.05 м. Обґрунтовано суттєві переваги переходу на сучасне спеціалізоване програмне забезпечення для суттєвого підвищення загальної продуктивності праці фахівців. Експериментально доведено, що використання зв'язки Pix4Dmatic та ArcGIS Pro дає змогу значно скоротити час на камеральне оброблення, забезпечуючи при цьому високу деталізацію і точність, необхідну для планів масштабу 1 : 500.

**Висновки.** Запропоновано й апробовано комплексну технологічну схему оновлення планів, яка забезпечує високу точність отриманих результатів і суттєво скорочує терміни виконання камеральних робіт за рахунок глибокої автоматизації основних процесів. Упровадження методики на основі сучасних топографічних польових аерознімальних комплексів дає змогу мінімізувати вплив людського фактору й оптимізувати витрати ресурсів при створенні великомасштабної картографічної продукції. Практичне застосування розроблених рекомендацій підтвердило їхню ефективність для оперативного моніторингу територій, що є критично важливим для актуалізації геопросторових баз даних у сучасних умовах.

**Ключові слова:** топографічний польовий аерознімальний комплекс, аерознімання, топографічний план, БПЛА, Pix4Dmatic, ArcGIS Pro, Real Time Kinematic, Post-Processed Kinematic, великомасштабне картографування, цифрова модель місцевості, геопросторові дані, фотограмметрична обробка, ортофотоплан, автоматизація польових робіт, центри проєктування, геодезичний моніторинг.

#### Вступ

Сучасний етап розвитку геодезичної науки та виробництва характеризується стрімким переходом від традиційних методів збирання геопросторових даних до автоматизованих високотехнологічних систем. Особливого значення це набуває при веденні й оновленні топографічних планів великих масштабів, зокрема 1 : 500 (Держстандарт України, 1994). Такі плани є базовою основою для інженерних пошуків, проєктування складних підземних комунікацій, детального планування міської забудови й моніторингу об'єктів критичної інфраструктури (Шипулін, 2015). Проте в умовах воєнного стану та необхідності екстреного оновлення даних для відновлення територій класичні методи наземного знімання з використанням електронних тахеометрів і GNSS-

приймачів у режимі "статика" стикаються із серйозними викликами: надмірною тривалістю робіт, обмеженим доступом до об'єктів через мінну небезпеку чи руйнування, а також значною вартістю польового етапу (Железняк, 2018).

Одним із найперспективніших шляхів подолання цих проблем є впровадження топографічних польових аерознімальних комплексів. Ці комплекси, інтегруючи в собі сучасні безпілотні авіаційні системи й цифрові сенсори надвисокої роздільної здатності, дають змогу виконувати знімання великих територій у максимально стислі терміни (Готов, & Чижевський, 2015). Проте, незважаючи на технічну досконалість сучасних безпілотних літальних апаратів, таких як DJI Inspire 2, або спеціалізованих комплексів P316, ключовим фактором

успіху залишається технологія камерального оброблення отриманих даних (DJI, 2026).

Традиційні фотограмметричні методи поступово витісняються новими алгоритмами Structure from Motion та Multi-View Stereo, які реалізовані у професійному програмному забезпеченні нового покоління (Pix4D, 2026). У цьому контексті критично важливим стає вибір інструментарію, здатного не лише обробляти масиви "сирих" даних, а й інтегрувати їх у професійне ГІС-середовище без втрати геометричної точності та деталізації (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Саме тому в цій роботі основна увага приділяється поєднанню потужностей Pix4Dmatic для первинного фотограмметричного оброблення та ArcGIS Pro для геоінформаційного аналізу й високоточної векторизації об'єктів місцевості (Esri, 2026a).

Проблема оновлення великомасштабних планів за допомогою аерознімання полягає у необхідності забезпечення середньоквадратичної помилки положення об'єктів не більше 0,1 мм у масштабі плану (що для масштабу 1 : 500 становить лише 5 см). Досягнення такої точності вимагає не лише використання передових методів позиціонування Real Time Kinematic та Post-Processed Kinematic, а й глибокого розуміння внутрішніх процесів ортотрансформування, побудови щільних хмар точок та їхньої класифікації (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999).

Актуальність цього дослідження підкріплюється тим, що використання ArcGIS Pro відкриває принципово нові можливості для створення просторових геоданих надвисокої роздільної здатності, що є значно інформативнішим за класичний двовимірний план (Esri, 2026a). Проте в професійному середовищі все ще залишається потреба в чітких прикладних рекомендаціях щодо параметрів польотного завдання, щільності розташування опорних точок Ground Control Points і вибору алгоритмів фільтрації для виділення рельєфу під рослинністю. Пропонована стаття має на меті систематизувати ці аспекти й запропонувати технологічний ланцюжок оновлення топографічних планів 1 : 500, який дасть змогу значно скоротити камеральний етап робіт, забезпечуючи при цьому суворе дотримання метрологічних показників (Закон України № 353-XIV, 1998).

**Огляд літератури.** Глибокий аналіз сучасного стану наукових досліджень у галузі геодезії, фотограмметрії та дистанційного зондування Землі свідчить про наявність значного наукового інтересу до впровадження безпілотних авіаційних систем у процеси великомасштабного картографування. Питання теоретичного обґрунтування функціонування топографічних польових аерознімальних комплексів як складних інтегрованих інформаційних систем детально розглядаються у роботах І. В. Пампухи (2022). Автор акцентує увагу на тому, що в умовах сучасних викликів, зокрема воєнного стану, розвиток технічних засобів геодезичного забезпечення сил оборони має базуватися на принципах мобільності, точності та швидкості оброблення даних, що повною мірою забезпечується використанням сучасних топографічних польових аерознімальних комплексів (Генеральний штаб ЗСУ, 2023).

Особливе місце в науковій дискусії займає проблематика метрологічної надійності даних, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів. Питання точності побудови цифрових моделей рельєфу й оцінювання впливу зовнішніх факторів на якість кінцевої продукції ґрунтовно досліджені у працях М. М. Кубявки (2021). У своїх роботах автор проводить порівняльний

аналіз точності класичних методів наземного знімання та аерознімальних робіт, доводячи, що за умови використання високоточних Global Navigation Satellite System-сенсорів і правильної конфігурації польотного завдання застосування безпілотних авіаційних систем дає змогу досягти субсантиметрової похибки, яка є критично важливою для планів масштабу 1 : 500 (Третяк, & Глотов, 2018). Проте автор також зазначає, що ефективність таких робіт напряму залежить від кваліфікації оператора й алгоритмів камерального оброблення.

Важливий внесок у розроблення методичних засад оновлення топографічних карт і планів із широким застосуванням ГІС-технологій зробили А. А. Лященко та Д. О. Кінь (2019). У їхніх спільних дослідженнях наголошується на необхідності переходу від дискретного оновлення картографічних матеріалів до створення систем безперервного моніторингу змін на місцевості. Автори вказують на те, що інтеграція аерознімальних даних у єдине геоінформаційне середовище дає змогу не лише актуалізувати геометрію об'єктів, а й значно збагатити атрибутивний складник баз геоданих, що є необхідною умовою для цифрового управління територіями.

Окремий блок досліджень присвячений технологічним можливостям сучасного програмного забезпечення нового покоління. Технічні огляди й документація розробників систем ArcGIS Pro, що забезпечують роботу функцій ArcGIS Pro, указують на значний прорив у сфері геоінформаційного аналізу й автоматизованої векторизації геопросторових даних (Esri, 2026a). Аналіз цих джерел підтверджує, що впровадження хмарних обчислень та алгоритмів штучного інтелекту для автоматичної класифікації точок дає змогу обробляти масиви даних надвеликих обсягів із безпрецедентною швидкістю (Esri, 2026b). Це створює передумови для відмови від застарілих напівавтоматичних методів векторизації на користь повністю інтегрованих ГІС-рішень (Шипулін, 2015).

Крім того, при розгляді нормативного складника більшості дослідників спираються на положення державних інструкцій, зокрема ГКНТА-2.04-02-98 (1999), які регламентують вимоги до точності знімання. Проте, як зазначається у багатьох фахових публікаціях, чинна нормативна база потребує адаптації до стрімкого розвитку технологій топографічних польових аерознімальних комплексів (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Незважаючи на значну кількість наукових праць, які розглядають окремі аспекти використання дронів, на сьогодні відчувається дефіцит комплексних практичних рекомендацій, які б поєднували можливості вузькоспеціалізованого програмного забезпечення, такого як Pix4Dmatic, з потужними аналітичними інструментами ArcGIS Pro (Pix4D, 2026). Саме необхідність створення такого наскрізного технологічного ланцюжка для потреб великомасштабного оновлення планів обумовлює актуальність і наукову новизну пропонованої статті.

**Мета дослідження:** обґрунтування та розроблення практичних рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу оновлення топографічних планів масштабу 1 : 500 із використанням топографічних польових аерознімальних комплексів. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати низку завдань, що включають аналіз технічних характеристик сучасних безпілотних авіаційних систем типу P316 та DJI Inspire 2, а також визначення найбільш ефективних режимів аерознімання для отримання знімків із надвисокою роздільною здатністю (DJI, 2026).

Важливим складником мети є дослідження можливостей поєднання вузькоспеціалізованого фотограм-

метричного програмного забезпечення Pix4Dmatic, що відповідає за швидке оброблення масивів даних, з потужним аналітичним інструментарієм ArcGIS Pro (Pix4D, 2026). Це дасть змогу розробити наскрізний алгоритм – від планування польотної місії та створення геодезичної основи до автоматизованої векторизації об'єктів місцевості й формування підсумкової цифрової моделі в єдиній системі координат (Esri, 2026с).

**Об'єктом дослідження** є технологія оновлення великомасштабних планів місцевості за допомогою аерознімальних методів, а **предметом** – сукупність методичних прийомів, параметрів польотного завдання та алгоритмів камерального оброблення, які забезпечують виконання вимог чинних нормативних документів щодо точності й деталізації картографічних матеріалів (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999). Кінцевим результатом дослідження має стати комплексна методика, яка дасть змогу геодезичним підрозділам виконувати роботи з інвентаризації та актуалізації планів 1 : 500 у 3–4 рази швидше, ніж при використанні традиційних наземних технологій, не втрачаючи при цьому якості й достовірності результатів (Бурштинська, & Станкевич, 2013; Дорожинський, & Тукай, 2008).

### Методи

Методологія дослідження базується на комплексному підході, що поєднує використання сучасних апаратних засобів безпілотної авіації та передових фотограмметричних алгоритмів оброблення даних (Бурштинська, & Станкевич, 2013). Основним інструментарієм для збирання первинної геопросторової інформації були топографічні польові аерознімальні комплекси на базі безпілотних літальних апаратів DJI Inspire 2 та спеціалізованого комплексу P316 (DJI, 2026). Вибір зазначених засобів обумовлений їхньою здатністю нести корисне навантаження у вигляді камер із високою роздільною здатністю та інтегрованими Global Navigation Satellite System-модулями, що підтримують режими позиціонування Real Time Kinematic та Post-Processed Kinematic (Глотов, & Чижевський, 2015). Це дає змогу фіксувати координати центрів проектування знімків із середньоквадратичною похибкою, яка не перевищує 3–5 см, що є базовою вимогою для створення планів масштабу 1 : 500 (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999).

Технологічний процес виконання робіт був розділений на три взаємопов'язані етапи: підготовчо-польовий, етап створення геодезичної основи й камеральний етап оброблення. На підготовчому етапі виконувалося проектування аерознімання з урахуванням рельєфу місцевості й необхідного розміру пікселя на місцевості (Ground Sample Distance) (Дорожинський, & Тукай, 2008). Для досягнення точності масштабу 1 : 500 розрахункова висота польоту становила від 80 до 120 м, що при використанні 20-мегапіксельних сенсорів забезпечує Ground Sample Distance у межах 1.5–2.5 см/пікс. Особлива увага приділялася налаштуванню параметрів перекриття: поздовжнє перекриття встановлювалося на рівні 80 %, а поперечне – 70–75 %, що є критичним для коректної роботи алгоритмів Structure from Motion під час автоматичного пошуку сполучних точок на зображеннях (Pix4D, 2026).

Створення геодезичної основи передбачало закладання та маркування контрольних і перевірочних точок на об'єкті знімання. Попри використання високоточних бортових приймачів, наявність наземних маркерів є обов'язковою для незалежного контролю якості й остаточної трансформації фотограмметричної моделі в систему координат WGS-84 (Кубявка, 2021). Визначення

координат маркерів проводилося супутниковими методами в режимі "кінематика", забезпечуючи єдність вимірювань між повітряним і наземним сегментами ТПАК (Литвиненко, & Кольцов, 2023).

Камеральне опрацювання масивів аерознімків було розподілене на два чітко розмежовані етапи, кожен з яких реалізовувався у спеціалізованому програмному забезпеченні з різним функціональним призначенням. На першому, фотограмметричному, етапі використовувався програмний продукт Pix4Dmatic – спеціалізований процесор, оптимізований для швидкого оброблення великих наборів даних (від 1000 до 2000 кадрів) із максимальним залученням потужностей графічних процесорів (Pix4D, 2026). У його середовищі виконувалося внутрішнє та зовнішнє орієнтування знімків, побудова розрідженої та щільної хмар точок, класифікація останньої, формування цифрової моделі поверхні та генерація вихідного ортофотоплану. Кінцевим продуктом цього етапу є геометрично точний пакет геоданих (хмара точок, цифрова модель поверхні й ортофотоплан), повністю готовий для передання на наступну стадію. Принципово важливо, що Pix4Dmatic виконує виключно фотограмметричне опрацювання і не застосовується для векторизації чи картографічного оформлення.

Другий етап – геоінформаційний – реалізовувався виключно в середовищі ArcGIS Pro (Esri, 2026a). На цьому етапі готові геодані з Pix4Dmatic імпортувалися у ГІС-середовище, де виконувалася аналітична стереовекторизація елементів ситуації та рельєфу, редагування топології, присвоєння атрибутів, нанесення об'єктів за допомогою стандартних умовних знаків і безпосереднє формування підсумкового топографічного плану в масштабі 1 : 500. ArcGIS Pro не використовується для первинного фотограмметричного опрацювання – його роль починається лише після отримання готових метричних продуктів від Pix4Dmatic. Такий чіткий розподіл функцій між програмними продуктами дає змогу розв'язувати складні технологічні завдання, за яких фотограмметричні й картографічні процеси не дублюють один одного (Шипулін, 2015).

### Результати

Практична реалізація, апробація та всебічна верифікація запропонованої методики комплексного використання сучасних топографічних польових аерознімальних комплексів дала змогу отримати надзвичайно широкий і репрезентативний масив даних. Ці дані стали фундаментальною науково-практичною основою для розроблення багаторівневих рекомендацій щодо кардинальної оптимізації процесів оновлення великомасштабних топографічних планів (Пампуха, 2022). Проведений повний цикл дослідницьких робіт охоплював логічно завершений шлях – від прецизійного збирання "сирих" цифрових даних у складних і варіативних польових умовах до фінального багатофакторного аналітичного оброблення, математичного моделювання та генерації кінцевих високоточних геопросторових продуктів (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Отримані результати наочно та беззаперечно демонструють високу технологічну ефективність синергічної інтеграції методів безпілотного аерознімання з новітніми програмними рішеннями останнього покоління (Esri, 2026b). Це дає змогу не лише гарантувати безумовне забезпечення суворої нормативної точності згідно з вимогами державних стандартів і галузевих інструкцій (зокрема базового регламенту ГКНТА-2.04-02-2002), а й суттєво, у кілька разів, розширити інформативну наповненість і семантичну якість топографічної основи за рахунок

упровадження ортофотопланів надвисокої просторової роздільної здатності (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999).

У ході серії експериментальних польових досліджень було детально й поглиблено оцінено критичний вплив параметрів польотного завдання, таких як відносна висота над рівнем поверхні, динамічна швидкість руху носія, кути нахилу та стабілізації сенсора, на якість, щільність і геометричну стабільність побудови хмар точок, цифрових моделей рельєфу та підсумкових картографічних матеріалів (Бурштинська, & Станкевич, 2013). Процес оброблення дав змогу виявити специфічні закономірності функціонування сучасних алгоритмів автоматизованої класифікації об'єктів та інтелектуальної векторизації елементів ситуації, що дало змогу виявити "вузькі місця" та оптимізувати камеральний етап для мінімізації часових витрат (Лященко, & Кінь, 2019). На основі глибокого порівняльного та статистичного аналізу результатів роботи у спеціалізованих обчислювальних середовищах Pix4Dmatic та ArcGIS Pro було сформульовано, перевірено й систематизовано основні технологічні рекомендації (Esri, 2026с; Pix4D, 2026). Ці результати представлені у формі логічно структурованих і деталізованих етапів, кожен з яких є критично важливим для забезпечення загальної достовірності, актуальності та метрологічної надійності оновлюваних великомасштабних планів місцевості (Дорожинський, & Тукай, 2008; Глотов, & Чижевський, 2015).

1. Першочерговим етапом у технологічному циклі використання топографічних польових аерознімальних комплексів є науково обґрунтоване проектування параметрів польоту, що безпосередньо визначає якість первинних метричних даних. Дослідженням встановлено, що для забезпечення точності топографічного плану масштабу 1 : 500 ключовим показником є лінійний розмір пікселя на місцевості (просторова роздільна здатність на землі). Емпірично доведено, що для надійного розпізнавання дрібних об'єктів ситуації, таких як люки підземних комунікацій, кути бордюрного каменю та

геометрія огорож, значення лінійного розміру пікселя не має перевищувати 2,0–2,5 см на піксель.

Досягнення таких параметрів для комплексів безпілотних літальних апаратів вимагає суворого дотримання висоти польоту в межах 85–110 м, залежно від фокусної відстані об'єктива й роздільної здатності матриці сенсора (DJI, 2026). Будь-яке перевищення вказаної висоти призводить до геометричної генералізації образів, що унеможливорює точну векторизацію елементів згідно із чинними умовними знаками (Держстандарт України, 1994). Окрему увагу приділено конфігурації перекриття знімків, оскільки надлишковість даних є запорукою стабільної роботи алгоритмів фотограмметричної тріангуляції. Традиційні значення перекриття у 60–70 %, прийнятні для дрібномасштабного картографування, є недостатніми для урбанізованих територій зі значною кількістю вертикальних об'єктів (Дорожинський, & Тукай, 2008). Для мінімізації "сліпих зон" і виключення радіальних спотворень будівель оптимальним визначено поздовжнє перекриття на рівні 80–85 % та поперечне 75–80 %. Така щільність фотофіксації забезпечує відображення кожної точки місцевості мінімум на п'яти – семи кадрах, що критично важливо для побудови щільної хмари точок без шумів і розривів (Pix4D, 2026).

Крім того, аналіз отриманих результатів дав змогу виявити закономірність між швидкістю руху носія та динамічним розмиттям зображення. Установлено, що при використанні затворів механічного типу швидкість польоту може досягати 7–9 м/с, тоді як при роботі з електронними затворами швидкість необхідно обмежувати до 4–5 м/с для запобігання дисторсійним викривленням матриці (Глотов, & Чижевський, 2015) (табл. 1). Розрахований таким чином польотний план дає змогу сформувати надлишковий і геометрично коректний масив даних, що є необхідною передумовою для наступних етапів фотограмметричного оброблення та гарантує метрологічну відповідність підсумкового плану до заданого масштабу (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999).

Таблиця 1

Розрахункові параметри аерознімання для масштабу 1 : 500

| Оптимізований параметр місії           | Розрахункове значення | Обґрунтування параметра                                                 |
|----------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Лінійний розмір пікселя на місцевості  | 2,0–2,5 см/пікс       | Ідентифікація малогабаритних об'єктів ситуації та підземних комунікацій |
| Висота польоту безпілотного апарата    | 85–110 м              | Утримання стабільного лінійного розміру пікселя на земній поверхні      |
| Поздовжнє перекриття цифрових знімків  | 80–85 %               | Мінімізація сліпих зон висотної забудови та споруд                      |
| Поперечне перекриття цифрових знімків  | 75–80 %               | Створення жорсткої фотограмметричної мережі для урбанізованих територій |
| Швидкість польоту (механічний затвор)  | 7–9 м/с               | Запобігання виникненню ефекту динамічного розмиття зображення           |
| Швидкість польоту (електронний затвор) | 4–5 м/с               | Нівелювання дисторсійних викривлень при фіксації кадрів                 |

2. Фундаментальною умовою забезпечення геодезичної точності оновлюваних планів є створення надійної опорної мережі й точне визначення координат центрів проектування знімків. У ході дослідження проаналізовано й апробовано два основні методи супутникового позиціонування: кінематика в реальному часі та постобробка кінематики. Установлено, що використання режиму кінематики в реальному часі на базі комплексів дає змогу отримувати координати знімків безпосередньо під час польоту із сантиметровою точністю, проте цей метод критично залежить від ста-

більності каналу зв'язку. Будь-які розриви в переданні поправок призводять до втрати фіксованого рішення, що на етапі фотограмметричної тріангуляції спричиняє локальні деформації моделі. На противагу цьому, застосування технології постоброблення кінематики продемонструвало вищу надійність при опрацюванні складних ділянок, оскільки дає змогу виконувати розрахунок траєкторії польоту після завершення місії, використовуючи сирі дані спостережень, що виключає вплив нестабільності радіозв'язку (Глотов, & Чижевський, 2015).

Попри високу точність бортових приймачів, результати досліджень підтверджують необхідність використання наземних опорних точок. Навіть за наявності точних координат центрів знімків відсутність наземної опори призводить до систематичних зсувів моделі по висоті (Кубявка, 2021). Оптимальною методикою для планів масштабу 1 : 500 визначено рівномірне розміщення маркерів по периметру й у центрі об'єкта знімання (Дорожинський, & Тукай, 2008). Для ділянки площею 10–15 гектарів мінімально необхідна кількість опорних точок становить 5–7 одиниць (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Маркування виконувалося за допомогою спеціалізованих контрастних маркерів, що забезпечує їх чітке дешифрування при заданому лінійному розмірі пікселя на місцевості (DJI, 2026).

Окремий блок результатів стосується оцінювання збіжності даних між супутниковими вимірюваннями й фотограмметричною моделлю. Використання контрольних перевірочних точок, які не брали участі у врівноваженні, дало змогу встановити середні квадратичні похибки, які повністю відповідають допускам нормативних документів для великомасштабного картографування (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999). Поеднання технології постоброблення кінематики з раціонально розташованою наземною геодезичною основою створює максимально жорсткий геометричний каркас, який нівелює похибки затвора камери та дрейф супутникових сигналів, гарантуючи метричну достовірність підсумкового ортофотоплану (Бурштинська, & Станкевич, 2013) (рис. 1).

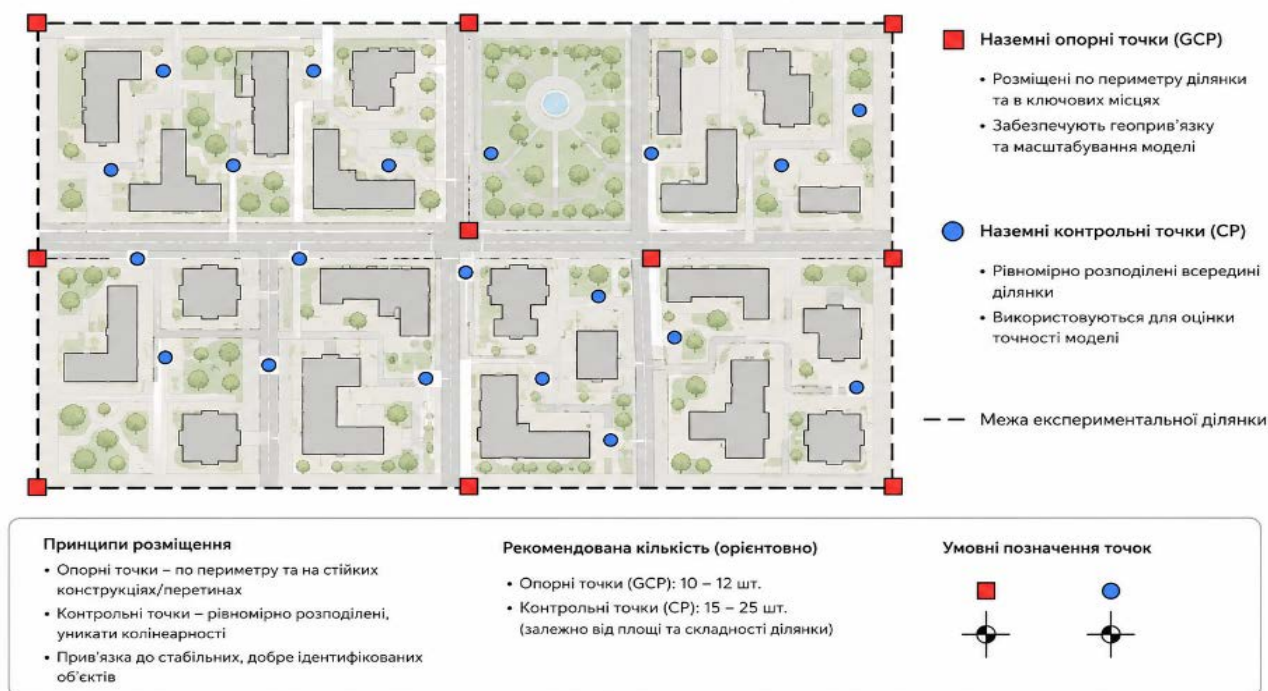


Рис. 1. Схема оптимального розташування опорних і контрольних точок

3. Етап камерального оброблення отриманих масивів аерознімків у програмному середовищі став ключовою ланкою у перетворенні дискретних двовимірних зображень на цілісну тривимірну метричну модель місцевості. Застосування цього програмного забезпечення дає значну перевагу у швидкості оброблення великих наборів даних завдяки оптимізованим алгоритмам структури за рухом і багатовидовому стерео, які максимально використовують потужності графічних процесорів (Pix4D, 2026). Первинним результатом оброблення стала побудова розрідженої хмари точок на основі автоматичного пошуку та зіставлення мільйонів сполучних точок (Бурштинська, & Станкевич, 2013). Експериментальним шляхом доведено, що використання глобального методу врівноважування блоку аерофотознімків дає змогу мінімізувати кутові нев'язки й забезпечити внутрішню геометрію моделі ще до моменту залучення наземних контрольних точок, що є критичним для збереження однорідності точності на великих площах (Глотов, & Чижевський, 2015).

Особлива увага була приділена етапу генерації щільної хмари точок, яка є цифровим аналогом лазер-

ного сканування. Результати показали, що при налаштуванні оптимальних параметрів вдається отримати детальну реконструкцію навіть таких складних об'єктів, як лінії електропередач, бордюри й елементи дорожньої розмітки (Лященко, & Кінь, 2019). Важливою перевагою алгоритмів є висока якість фільтрації шумів та артефактів, що виникають через рухомі об'єкти або відблиски від скляних поверхонь (Pix4D, 2026). Отримана щільність масиву є цілком достатньою для побудови цифрової моделі поверхні з кроком, що в кілька разів перевищує нормативні вимоги, даючи змогу фіксувати мікрорельєф із високою деталізацією (Дорожинський, & Тукай, 2008).

Результатом першого етапу стало формування гео-метрично коректної цифрової моделі поверхні та вихідної хмари точок (Кубявка, 2021) (рис. 2). Це дало змогу повністю усунути радіальні зміщення високих будівель і споруд, що зазвичай є головною проблемою класичної фотограмметрії (Шипулін, 2015). Усі розраховані елементи будувалися на основі щільної моделі поверхні як математичної основи для ортотрансформування кожного пікселя (Esri, 2026c). Сформований пакет геоданих забезпечив ідеальну метричну основу для

подальшого аналітичного опрацювання в геоінформаційному середовищі, даючи змогу переходити від сирої

фотограмметричної моделі до структурованої системи (Литвиненко, & Кольцов, 2023).



Рис. 2. Приклад хмари точок, (Esri, 2026a)

4. На наступному етапі дослідження було виконано інтеграцію оброблених фотограмметричних матеріалів у середовище ArcGIS Pro, функціональне призначення якого є логічним продовженням технологічного ланцюжка Pix4Dmatic (Шипулін, 2015). На відміну від попереднього програмного забезпечення, що відповідає за генерацію метричних геоданих, ArcGIS Pro використовується виключно як геоінформаційне середовище для аналітичної векторизації та картографічного оформлення підсумкового плану. На цьому етапі базовою основою слугують готові продукти з Pix4Dmatic: щільна хмара точок, цифрова модель поверхні й ортофотоплан. Повторна генерація цих матеріалів у середовищі ArcGIS Pro не застосовується (Esri, 2026a).

Ключовим завданням цього етапу є аналітична стереовекторизація елементів ситуації та рельєфу на основі імпортованих матеріалів. Алгоритми інтелектуального текстурування, реалізовані в ArcGIS Pro (рис. 3), дають змогу автоматично розпізнавати контури об'єктів і пропонувати первинні векторні межі, які оператор верифікує та доопрацьовує в режимі стереоскопічного перегляду (Лященко, & Кінь, 2019). При цьому забезпечується точна ідентифікація не лише великих споруд, а й малогабаритних елементів: меж типів покриття, огорож, інженерних комунікацій і фасадів будівель по вертикалі, що є критично важливим для планів у масштабі 1 : 500 (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Таким чином, ArcGIS Pro виконує виключно картографічно-аналітичні функції та завершує наскрізний технологічний цикл, у якому фотограмметричні дані трансформуються у структурований векторний топографічний план (Esri, 2026c).

5. Завершальним етапом дослідження стали розроблення та апробація методики безпосередньої векторизації ситуації та рельєфу на основі сформованих високоточних матеріалів аерознімання. У ході роботи в

середовищі геоінформаційної системи було встановлено, що використання ортофотопланів надвисокої просторової роздільної здатності у поєднанні із цифровими моделями рельєфу дає змогу виконувати оновлення планів масштабу 1 : 500 з продуктивністю, що у 3–4 рази перевищує традиційні методи оцифрування планшетів (Пампуха, 2022). Ключовою перевагою розробленого підходу є можливість накладання актуальних растрових даних на застарілу топографічну основу, що дає змогу миттєво ідентифікувати зміни в забудові, дорожній мережі та рослинності (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Автоматизоване розпізнавання контурів об'єктів (крім асфальтобетонного покриття або кутів капітальних споруд) забезпечує стабільну точність векторизації із середньоквадратичною похибкою, яка значно перевершує допуски для даного масштабу (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999).

Особлива увага приділялася технології камерального дешифрування, яка стала можливою завдяки високій деталізації знімків, отриманих із комплексів безпілотних літальних апаратів (DJI, 2026). Результати аналізу показали, що на ортофотопланах із лінійним розміром пікселя 2 см чітко розпізнаються не лише контури будівель, а й малорозмірні об'єкти: оглядові колодязі підземних мереж, електроопори, пожежні гідранти й окремі бордюри (Дорожинський, & Тукай, 2008). Це дало змогу розробити технологічний ланцюжок, за якого польове обстеження виконується лише для тих об'єктів, що приховані густою рослинністю або перебувають у мертвих зонах фотограмметричної моделі (Бурштинська, & Станкевич, 2013). Використання інструментів топологічного редагування забезпечило суворе дотримання правил замикання контурів і збереження атрибутивної інформації для цифрових кадастрових систем (Esri, 2026b).

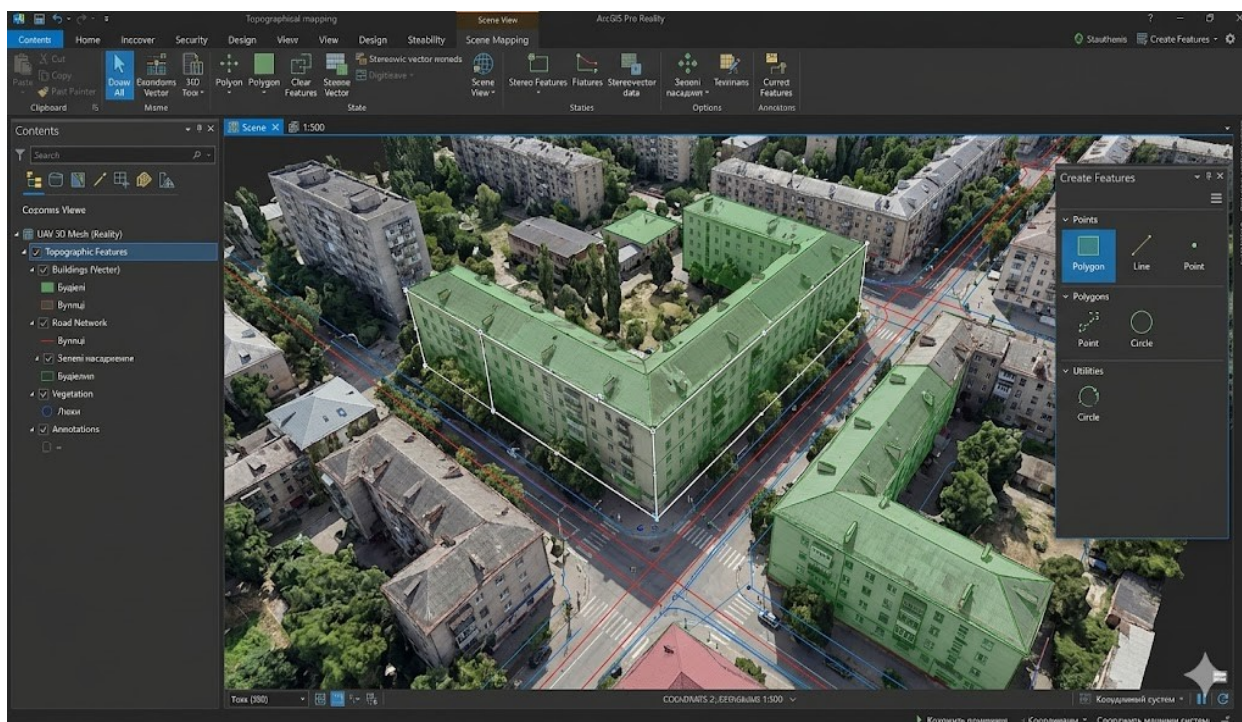


Рис. 3. Візуалізація тривимірного текстурованого мешу та процес стереовекторизації споруд у середовищі ArcGIS Pro, (Esri, 2026c)

Фінальним результатом етапу стало формування оновленого цифрового топографічного плану у векторному форматі, що повністю відповідає вимогам чинних нормативних документів та умовних знаків для масштабу 1 : 500 (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999) (рис. 4). Порівняльний аналіз оновлених ділянок із контрольними наземними вимірюваннями за

допомогою електронного тахеометра підтвердив абсолютну збіжність даних (Лященко, & Кінь, 2019). Інтегроване використання топографічних польових аерознімальних комплексів і спеціалізованого програмного забезпечення дало змогу створити замкнений цикл виробництва – від планування польоту до видачі готового картографічного продукту (Шипулін, 2015; Pix4D, 2026).

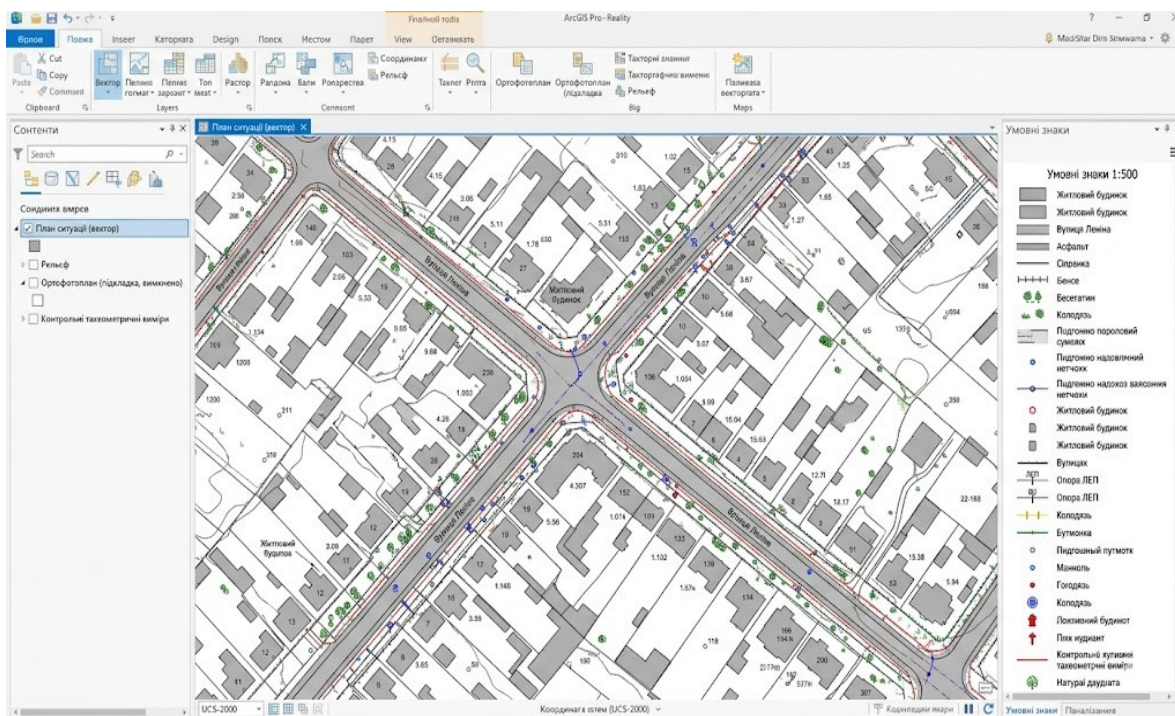


Рис. 4. Результати камерального дешифрування малорозмірних об'єктів і фінальний оновлений цифровий топографічний план масштабу 1 : 500, (Esri, 2026c)

### Дискусія і висновки

Проведене комплексне дослідження технологічного циклу оновлення великомасштабних планів місцевості дає змогу стверджувати, що використання топографічних польових аерознімальних комплексів є найбільш ефективним інструментом актуалізації геопросторових даних у сучасних умовах. Отримані результати підтверджують, що інтеграція апаратних рішень на базі DJI Inspire 2 та P316 із програмним середовищем ArcGIS Pro забезпечує не лише нормативну точність, а й принципово новий рівень деталізації топографічної основи (Esri, 2026с). У ході дискусійного аналізу встановлено, що ключовим фактором успіху є правильний вибір методу позиціонування центрів проєкції (Глотов, & Чижевський, 2015). Хоча режим Real Time Kinematic забезпечує високу оперативність безпосередньо в полі, для завдань масштабу 1 : 500 перевагу слід віддавати методу Post-Processed Kinematic, оскільки він гарантує цілісність траєкторії польоту навіть у зонах зі складним рельєфом або за наявності радіоперешкод, що часто зустрічається в умовах міської забудови чи промислових об'єктів (DJI, 2026).

На окрему увагу заслуговує порівняння камеральних етапів оброблення. Використання Pix4Dmatic як інструменту для первинної генерації щільних хмар точок дало змогу подолати проблему тривалих обчислень, характерну для застарілих фотограмметричних систем (Pix4D, 2026). Водночас інтеграція з ArcGIS Pro забезпечила можливість перетворити фотограмметричні геодані на структурований векторний топографічний план із нормативною атрибутикою (Esri, 2026а). Це дає змогу фахівцю виконувати векторизацію об'єктів із субсантиметровою точністю, ідентифікуючи навіть малорозмірні елементи ситуації (люки, решітки зливостоків, межі різних типів покриття), що раніше було доступно лише за наземного тахеометричного знімання (Литвиненко, & Кольцов, 2023). Доведено, що використання таких комплексних рішень дає змогу скоротити загальні витрати часу на оновлення планів у 3–4 рази, що є критично важливим для оперативного відновлення картографічної інформації територій (Пампуха, 2022).

Підсумовуючи результати роботи, можна зробити висновок, що запропонована методика використання польових аерознімальних комплексів повністю відповідає вимогам чинних нормативних документів, зокрема ГКНТА-2.04-02-2002 (Головне управління геодезії, картографії та кадастру, 1999). Оптимальними параметрами для отримання планів масштабу 1 : 500 визначено просторову роздільну здатність Ground Sample Distance на рівні 2,0 см/пікс, висоту польоту в межах 85–110 м і перекриття знімків не менше 80 % за поздовжньою віссю (Дорожинський, & Тукай, 2008). Інтеграція і взаємодія програмних комплексів Pix4Dmatic та ArcGIS Pro в різних технологічних процесах підприємств дає змогу формувати високоточні векторні топографічні плани з нормативною геометрією, що є суттєво ефективнішим порівняно з класичними методами наземного знімання (Шипулін, 2015). Наукова новизна дослідження полягає у розробленні й апробації замкненого технологічного ланцюжка, який мінімізує вплив людського фактору на етапі збирання даних і максимально автоматизує процес створення картографічної продукції (Кубявка, 2021). Перспективи подальшого розвитку зазначеного напрямку вбачаються у глибшій інтеграції алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого розпізнавання об'єктів інфраструктури безпосередньо з реалістичних меш-моделей, що

дасть змогу ще більше підвищити актуальність і достовірність топографічних планів великих масштабів (Лященко, & Кінь, 2019).

**Внесок авторів:** Денис Биковець – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Руслан Кольцов – методологія, написання (оригінальна чернетка).

**Джерела фінансування.** Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

### Список використаних джерел

- Бурштинська, Х. В., & Станкевич, С. А. (2013). *Аерознімання*. Львівська політехніка.
- Генеральний штаб ЗСУ. (2023). *Доктрина ОП 3-0(46) "Застосування безпілотних систем у Силах оборони України"*. ГШ ЗСУ.
- Глотов, В. М., & Чижевський, В. В. (2015). *Малорозмірні безпілотні літальні апарати та їх застосування в цифровій фотограмметрії*. Львівська політехніка.
- Головне управління геодезії, картографії та кадастру. (1999). *Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500* (ГКНТА-2.04-02-98). ГУГКК.
- Держстандарт України. (1994). *Картографія. Терміни та визначення* (ДСТУ 2757-94).
- Дорожинський, О. П., & Тукай, Р. Ю. (2008). *Фотограмметрія*. Львівська політехніка.
- Железняк, О. О. (2018). *Основи військової топографії*. ВІКНУ.
- Верховна Рада України. (1998). *Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність*. Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14>
- Кубявка, М. М. (2021). Аналіз точності побудови цифрових моделей рельєфу за даними безпілотних авіаційних систем. *Військово-технічний збірник*, 24, 33–39.
- Литвиненко, Н. І., & Кольцов, Р. О. (2023). Перспективи використання безпілотних авіаційних систем для картографічного забезпечення військ. *Збірник наукових праць ВІКНУ*, 2, 45–52.
- Лященко, А. А., & Кінь, Д. О. (2019). ГІС-технології в задачах моніторингу та оновлення топографічних карт. *Інженерна геодезія*, 121, 14–22.
- Пампуха, І. В. (2022). Напрями розвитку технічних засобів геодезичного забезпечення сил оборони. *Наука і оборона*, 1, 28–34.
- Третьяк, К. С., & Глотов, В. М. (2018). Особливості використання БПЛА для створення топографічних планів великих масштабів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 35(1), 112–118.
- Шипулін, В. Д. (2015). *Основні принципи геоінформаційних систем*. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
- DJI. (2026). *DJI Inspire 2 User Manual*. DJI Support. <https://www.dji.com/inspire-2/info#downloads>
- Esri. (2026a). *ArcGIS Pro: Photogrammetric processing of drone imagery*. <https://doc.arcgis.com/en/imagery/workflows/reality/>
- Esri. (2026b). *ArcGIS Reality: Overview and Capabilities*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-reality/overview>
- Esri. (2026c). *Introduction to Ortho Mapping in ArcGIS Pro*. Esri Documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/ortho-mapping/what-is-ortho-mapping.htm>
- Pix4D. (2026). *Pix4Dmapper Research Paper: Accuracy of automatic photogrammetric processing*. <https://www.pix4d.com/white-papers>

### References

- Burshytynska, Kh. V., & Stankevych, S. A. (2013). *Aerial Surveying*. Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
- DJI. (2026). *DJI Inspire 2 User Manual*. DJI Support. <https://www.dji.com/inspire-2/info#downloads>
- Dorozhynskiy, O. L., & Tukai, R. Yu. (2008). *Photogrammetry*. Lviv Polytechnic [in Ukrainian].
- Esri. (2026a). *ArcGIS Pro: Photogrammetric processing of drone imagery*. <https://doc.arcgis.com/en/imagery/workflows/reality/>
- Esri. (2026b). *ArcGIS Reality: Overview and Capabilities*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-reality/overview>
- Esri. (2026c). *Introduction to Ortho Mapping in ArcGIS Pro*. Esri Documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/ortho-mapping/what-is-ortho-mapping.htm>
- General Staff of the Armed Forces of Ukraine. (2023). *Doctrine OP 3-0(46) "Application of Unmanned Systems in the Defense Forces of Ukraine"*. General Staff of the Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- Glotov, V. M., & Chyzhevsky, V. V. (2015). *Small-sized unmanned aerial vehicles and their application in digital photogrammetry*. Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
- Kubyavka, M. M. (2021). Analysis of the accuracy of building digital terrain models based on data from unmanned aircraft systems. *Military Technical Collection*, 24, 33–39 [in Ukrainian].
- Litvinenko, N. I., & Koltsov, R. O. (2023). Prospects for the use of unmanned aerial systems for cartographic support of troops. *Collection of*

scientific works of the Ukrainian Institute of Geodesy and Geodesy, 2, 45–52 [in Ukrainian].

Lyashchenko, A. A., & Kin, D. O. (2019). GIS technologies in the tasks of monitoring and updating topographic maps. *Engineering Geodesy*, (121), 14–22 [in Ukrainian].

Main Department of Geodesy, Cartography and Cadastre. (1999). *Instructions for Topographic Surveying at Scales 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500* (GKNTA-2.04-02-98). GUGKK [in Ukrainian].

Pampukha, I. V. (2022). Directions for the development of technical means of geodetic support of defense forces. *Science and Defense*, 1, 28–34 [in Ukrainian].

Pix4D. (2026). *Pix4Dmapper Research Paper: Accuracy of automatic photogrammetric processing*. <https://www.pix4d.com/white-papers> Shipulin, V. D. (2015). *Basic principles of geoinformation systems*. KhNUMG named after O. M. Beketov [in Ukrainian]. State Standard of Ukraine. (1994). *Cartography. Terms and definitions* (DSTU 2757-94) [in Ukrainian].

Denys BYKOVETS, Master's Student

ORCID ID: 0009-0005-4236-9388

e-mail: d.bikovets2004@gmail.com

Taras Shevchenko Kyiv National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Ruslan KOLTISOV, PhD, Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-8441-9575

e-mail: koltsov.ruslan@knu.ua

Taras Shevchenko Kyiv National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Tretyak, K. S., & Glotov, V. M. (2018). Features of the use of UAVs for creating large-scale topographic plans. *Modern achievements of geodetic science and production*, 35(1), 112–118 [in Ukrainian].

Verkhovna Rada of Ukraine. (1998). *On topographic, geodetic and cartographic activities*. Law of Ukraine dated 23.12.1998 No. 353-XIV [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14>

Zheleznyak, O. O. (2018). *Fundamentals of military topography*. VIKNU [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 01.05.26

Прорецензовано / Revised: 12.05.26

Схвалено до друку / Accepted: 16.07.26

Опубліковано / Published: 21.09.26

## RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF TOPOGRAPHIC FIELD AERIAL SURVEY SYSTEMS FOR UPDATING LARGE-SCALE TOPOGRAPHIC PLANS

**Background.** The article examines the current problem of rapid updating of topographic plans at a scale of 1 : 500 in conditions of an urgent need for rapid updating of geospatial data for the needs of engineering and cadastre. The use of traditional methods of ground surveying often turns out to be ineffective due to high labor intensity. The integration of modern unmanned systems into the workflow ensures the generation of detailed orthophoto maps with ultra-high resolution. The purpose of the study is to substantiate and develop practical recommendations for the use of modern topographic field aerial survey complexes for updating large-scale terrain plans.

**Methods.** Modern topographic complexes DJI Inspire 2 and specialized P316 systems were used to conduct the study. The research methodology is based on a complex combination of advanced photogrammetric processing of image data in the Pix4Dmatic environment and subsequent vectorization of objects in ArcGIS Pro. Special attention is paid to the use of high-precision positioning technologies Real Time Kinematic and Post-Processed Kinematic for determining coordinates of the ground control points (GCPs). This approach makes it possible to ensure strict adherence to geometric parameters when building digital terrain models and to automate the process of creating a topographic database.

**Results.** During the study, optimal technical parameters of aerial photography and digital data processing algorithms were established, allowing to stably achieve the root mean square error of the position of objects within 0.05 m. The study demonstrates the significant advantages of modern specialized software in substantially increasing the overall productivity of surveying professionals. It is experimentally proven that the use of the Pix4Dmatic and ArcGIS Pro combination allows to significantly reduce the time for office-based processing, while ensuring a high level of detail and accuracy required for 1 : 500 scale plans.

**Conclusions.** A comprehensive technological scheme for updating plans has been proposed and tested, which ensures high accuracy of the results obtained and significantly reduces the time for performing office work due to a high degree of automation of the main processes. The implementation of the methodology based on modern topographic field aerial survey systems allows minimizing the impact of the human factor and optimizing resource requirements when creating large-scale cartographic products. The practical application of the developed recommendations confirmed their effectiveness for operational territory monitoring, which is critically important for updating geospatial databases in modern conditions.

**Keywords:** topographic field aerial survey system, aerial photography, topographic plan, UAV, Pix4Dmatic, ArcGIS Pro, Real Time Kinematic, Post-Processed Kinematic, large-scale mapping, digital terrain model, geospatial data, photogrammetric processing, orthomosaic, fieldwork automation, design centers, geodetic monitoring.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.