Використання безпілотних літальних апаратів у геодезичних дослідженнях

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) революціонізували сучасну геодезію в Україні, пропонуючи безпрецедентну ефективність та точність. Професійні геодезичні дрони, такі як DJI Phantom 4 RTK та Trimble UX5, оснащені RTK/PPK GNSS системами з точністю позиціонування до 1-2 см, мультиспектральними камерами з роздільною здатністю 20+ мегапікселів та LiDAR-сканерами здатні покривати до 100 гектарів за один політ. У 2021-2022 роках українські компанії "Інжгеодезія" та "УкрДорПроект" застосували технології БПЛА для картографування понад 12,000 гектарів сільськогосподарських угідь та 450 км транспортної інфраструктури з точністю, що раніше вимагала тижнів традиційних наземних спостережень.

Сучасні геодезичні дослідження з використанням БПЛА створюють ортофотоплани з роздільною здатністю до 2 см/піксель, цифрові моделі рельєфу з точністю висот ±5 см та високодеталізовані 3D-моделі об'єктів. Програмні комплекси, такі як Pix4D Mapper та Agisoft Metashape, автоматизують обробку даних, зменшуючи час від польоту до готового результату з кількох тижнів до 1-2 днів. При обстеженні Запорізької ГЕС у 2022 році використання БПЛА дозволило скоротити термін виконання робіт на 73% та знизити кошторис на 65% порівняно з традиційними методами, при цьому забезпечивши безпеку персоналу в умовах складного рельєфу.

Впровадження технологій БПЛА кардинально змінило роботу українських геодезистів, особливо після прийняття у 2020 році оновлених державних будівельних норм ДБН А.2.1-1, що офіційно визнають аерофотознімання з дронів як стандартизований метод інженерно-геодезичних вишукувань. Лідери галузі, включаючи "Київгеоінформатику" та "ГеоСистемс", інтегрували у свої робочі процеси дрони з подвійними частотами GPS/GLONASS/Galileo, тепловізійними камерами та гіперспектральними сенсорами для виявлення підземних комунікацій, моніторингу ерозійних процесів та контролю будівництва з міліметровою точністю. Технології постійно вдосконалюються — нові моделі дронів з часом польоту до 90 хвилин та радіусом дії до 7 км скоро з'являться на українському ринку, що ще більше розширить можливості геодезичних досліджень.

Історія розвитку аерофотознімання

Історія аерофотознімання починається з піонерських експериментів Гаспара Фелікса Турнашона, який 23 жовтня 1858 року зробив перше аерофотознімання Парижа з повітряної кулі на висоті 80 метрів. У 1903 році німецький аптекар Юліус Нойброннер розробив камери для голубів, які автоматично робили знімки кожні 30 секунд. Під час Першої світової війни (1914–1918) аерофотознімання стало невід'ємним елементом військової розвідки – французька армія щоденно виготовляла понад 10 000 аерофотознімків для картографування позицій противника. У 1920-х роках з'явилися перші стереоскопічні методи обробки знімків, які дозволили створювати топографічні карти з точністю до 1–2 метрів.

Революційним етапом став розвиток аналітичної фотограмметрії у 1950-х роках, коли Хельмут Шмід розробив математичні моделі для точного визначення координат об'єктів на знімках. У 1970-х роках компанія Zeiss представила перший цифровий фотограмметричний стереоплоттер, що дозволив автоматизувати створення топографічних карт. З 1980-х років почалося активне впровадження ГІС-технологій для інтеграції аерофотознімків з іншими геопросторовими даними. Важливою віхою став запуск у 1986 році французького супутника SPOT, який забезпечив регулярне отримання знімків з роздільною здатністю 10 метрів для цивільних потреб.

У 2000-х роках відбувся стрибок у розвитку БПЛА для геодезії. У 2009 році швейцарська компанія senseFly представила перший спеціалізований геодезичний дрон eBee, здатний створювати ортофотоплани з точністю до 3 см. З 2013 року в Україні почалося активне впровадження БПЛА для кадастрових робіт, зокрема при проведенні земельної реформи. Сучасні БПЛА, оснащені RTK/PPK-системами, забезпечують субсантиметрову точність геоприв'язки знімків, що перевищує традиційні методи наземної зйомки за ефективністю в 5–10 разів. За даними Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру, станом на 2022 рік понад 60% топографічних зйомок в Україні виконується з використанням БПЛА.

Типи БПЛА для геодезичних досліджень

Існує два основних типи БПЛА, які використовуються в геодезичних дослідженнях: мультироторні та літакового типу. Мультироторні БПЛА, такі як квадрокоптери (DJI Phantom 4 RTK, Yuneec H520 RTK), гексакоптери (DJI Matrice 300 RTK) та октокоптери (Freefly Alta X), мають кілька роторів, що забезпечують вертикальний зліт і посадку, а також можливість зависання в повітрі. Вони досягають точності позиціонування до 1–2 см, здатні працювати при вітрі до 10 м/с і мають час польоту від 25 до 55 хвилин залежно від моделі. Ці дрони ідеально підходять для знімання невеликих площ (до 50–100 га) з високою роздільною здатністю (до 1 см/піксель), а також для моніторингу об'єктів інфраструктури, таких як мости, високовольтні лінії та промислові об'єкти.

БПЛА літакового типу, такі як senseFly eBee X, WingtraOne та Quantum Trinity F90+, мають крила, як у звичайних літаків, і потребують злітно-посадкової смуги або катапульти для зльоту та посадки. Ці моделі мають значно довший час польоту (до 90–120 хвилин) і здатні покривати більші площі за один політ (до 500–1000 га), що робить їх придатними для картографування великих територій, таких як лісові масиви, сільськогосподарські угіддя та території будівництва лінійних об'єктів. Вони летять зі швидкістю 40–110 км/год і можуть працювати при вітрі до 12–14 м/с, забезпечуючи точність вимірювань до 3–5 см.

Окрім типу конструкції, БПЛА також розрізняються за вантажопідйомністю (від 0.5 до 15 кг), наявністю додаткових сенсорів (мультиспектральні, теплові, лідари) та інтеграцією з системами RTK/PPK для підвищення точності геоприв'язки. Сучасні геодезичні дрони обладнані спеціалізованими камерами з роздільною здатністю 20–60 МП, що дозволяє отримувати детальні ортофотоплани та створювати 3D-моделі місцевості з високою точністю. При виборі БПЛА важливо враховувати не лише технічні характеристики, але й вартість, доступність програмного забезпечення для обробки даних та відповідність нормативним вимогам країни.

- Мультироторні БПЛА (квадрокоптери, гексакоптери, октокоптери)
- БПЛА літакового типу (з фіксованим крилом)

Переваги використання дронів у геодезії

Використання дронів у геодезії має численні переваги порівняно з традиційними методами знімання. По-перше, дрони дозволяють скоротити час знімання на 70-80% порівняно з наземними методами, особливо при картографуванні територій площею понад 50 гектарів або в гірських районах із складним рельєфом. По-друге, сучасні дрони, оснащені RTK GPS модулями, забезпечують точність вимірювань до 2-3 см у плані та 3-5 см по висоті, що дозволяє створювати високоточні цифрові моделі рельєфу з роздільною здатністю до 2 см/піксель. По-третє, економічна ефективність дронів проявляється у зниженні вартості робіт на 30-50%, оскільки вони потребують лише 1-2 операторів замість бригади з 5-7 геодезистів.

Крім того, дрони незамінні при зніманні промислових об'єктів з підвищеною небезпекою, таких як кар'єри глибиною понад 200 метрів, хімічні підприємства, або зони радіоактивного забруднення. Після повеней, землетрусів або лісових пожеж дрони дозволяють за 1-2 дні створити актуальні 3D-моделі постраждалих територій площею до 1000 гектарів, що критично важливо для планування рятувальних операцій та оцінки збитків. У 2022-2023 роках після стихійних лих в Україні дрони використовувалися для моніторингу близько 75% постраждалих територій.

Мультиспектральне та теплове знімання за допомогою спеціалізованих дронів відкриває нові можливості аналізу. Наприклад, у сільському господарстві використання дронів з NIR-камерами дозволяє обчислювати індекс NDVI з точністю до окремих рослин, виявляти зони стресу рослин за 5-7 днів до появи видимих ознак, а також оптимізувати внесення добрив на 15-25%. У лісовому господарстві дрони з LiDAR датчиками здатні визначати висоту дерев з точністю до 10 см та виявляти осередки шкідників на ранніх стадіях зараження, що дозволяє зберігати до 2000 гектарів лісу щороку.

- Економія часу (до 80%) та коштів (до 50%)
- Висока точність даних (2-5 см у плані та по висоті)
- Можливість знімання у важкодоступних та небезпечних місцях (кар'єри, промзони, зони стихійних лих)
- Отримання даних у різних спектральних діапазонах (RGB, NIR, термальний, мультиспектральний)

Підготовка до аерофотознімання

Підготовка до аерофотознімання є критичним етапом, який безпосередньо визначає якість та точність результатів геодезичних робіт. Спочатку необхідно чітко сформулювати цілі знімання — створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР), ортофотоплану з роздільною здатністю не менше 5 см/піксель, або 3D-моделі місцевості. Площа об'єкта дослідження має бути точно визначена за допомогою попереднього аналізу карт та супутникових знімків, з відміткою меж буферної зони не менше 50 метрів навколо основної території.

Наступним кроком є отримання всіх необхідних дозволів від Державної авіаційної служби України для польотів на висоті понад 120 метрів або в населених пунктах. При роботі поблизу стратегічних об'єктів додатково потрібно отримати погодження від відповідних служб безпеки. Важливо враховувати, що оптимальними погодними умовами для знімання є безхмарна погода з освітленістю не менше 10000 люкс та швидкістю вітру до 8 м/с. Технічна підготовка включає калібрування камери, перевірку пропелерів та двигунів БПЛА на предмет пошкоджень, а також зарядку не менше трьох комплектів акумуляторів LiPo ємністю 5200 мА·год для забезпечення 45–60 хвилин безперервного польоту.

Маршрут польоту розраховується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Pix4D Capture або DJI GS Pro з налаштуванням поздовжнього перекриття знімків у 80% та поперечного у 60%. Висота польоту встановлюється на рівні 100–150 метрів залежно від необхідної роздільної здатності. Для підвищення точності геоприв'язки необхідно розмістити мінімум 5 опорних точок на кожні 10 гектарів площі знімання, використовуючи GPS-приймач з точністю не гірше 2 см. При плануванні обов'язково слід врахувати наявні перешкоди: лінії електропередач напругою від 10 кВ, висотні будівлі, вежі зв'язку та заліснені ділянки з висотою дерев понад 15 метрів.

1. Визначення цілей та завдань знімання (ЦМР з точністю 5–10 см, ортофотоплан 5 см/піксель)
2. Отримання дозволів від Державіаслужби та погоджень від місцевих органів влади
3. Перевірка технічного стану БПЛА (DJI Phantom 4 RTK або аналог), калібрування камери та гіроскопів
4. Планування маршруту польоту з перекриттям 80%/60% та розміщенням опорних точок

Планування польоту БПЛА

Планування польоту БПЛА є критично важливим для забезпечення ефективного та безпечного знімання. Спеціалізоване програмне забезпечення, таке як Pix4D Capture, DroneDeploy або Mission Planner, дозволяє автоматизувати цей процес з урахуванням конкретних параметрів. При плануванні необхідно встановити точні значення висоти польоту (зазвичай 80–120 метрів для детальних знімків), поздовжнього перекриття знімків (70–80%) та поперечного перекриття (50–60%) відповідно до технічних характеристик DJI Phantom 4 Pro або Mavic 2 Pro.

При плануванні польоту критично важливо врахувати перешкоди в зоні знімання: дерева висотою понад 25 метрів, лінії електропередач напругою 10 кВ і вище, багатоповерхові будівлі та радіовежі. Погодні умови також суттєво впливають на якість – швидкість вітру не повинна перевищувати 10 м/с, видимість має бути не менше 2 км, а вологість повітря не вище 80%. Рекомендується проводити пробний політ на висоті 50 метрів по периметру ділянки за 1–2 години до основного знімання для калібрування обладнання та виявлення нерівномірностей місцевості.

Під час польоту оператор повинен постійно моніторити телеметричні дані: рівень заряду акумулятора (критична межа 30%), якість GPS-сигналу (не менше 12 супутників), стабільність передачі відеопотоку (затримка не більше 300 мс) та швидкість БПЛА (оптимально 5–8 м/с для якісних знімків). У випадку падіння рівня заряду нижче 25%, втрати GPS-сигналу або зростання швидкості вітру понад 12 м/с необхідно активувати процедуру автоматичного повернення та належно задокументувати причину переривання місії.

> "Правильне планування польоту – запорука успішного аерофотознімання. Кожен додатковий час, витрачений на підготовку, економить годину при обробці даних."

Технічні аспекти аерофотознімання

Аерофотознімання з використанням БПЛА вимагає врахування багатьох технічних аспектів, які впливають на якість та точність отриманих даних. Ключовим фактором є вибір оптимальної висоти польоту, яка визначає просторову роздільну здатність знімків (GSD). Наприклад, при використанні камери з фокусною відстанню 35 мм та матрицею 24 МП, політ на висоті 120 м забезпечує GSD близько 3 см/піксель, тоді як при висоті 80 м – близько 2 см/піксель.

Критично важливим аспектом є забезпечення достатнього перекриття між знімками. При картографуванні рівнинної місцевості рекомендоване поздовжнє перекриття становить 60–70%, а поперечне – 30–40%. Однак при зніманні місцевості зі складним рельєфом (пагорби, яри) або високими об'єктами (будівлі, споруди) слід збільшити поздовжнє перекриття до 80%, а поперечне до 60% для уникнення "сліпих зон" та забезпечення якісної фотограмметричної обробки.

Для оптимальної якості зображень необхідно правильно налаштувати експозиційні параметри камери. При сонячній погоді рекомендується використовувати ISO 100–200, витримку 1/800–1/1000 с та діафрагму f/4.0–f/5.6. У хмарну погоду доцільно збільшити ISO до 400 та зменшити витримку до 1/400–1/500 с. Режим зйомки RAW+JPEG забезпечує максимальну гнучкість при подальшій обробці даних. Також рекомендується використовувати ND-фільтри при яскравому сонячному світлі для запобігання перетримці.

Параметр	Рекомендоване значення
Поздовжнє перекриття	60–80% (70% оптимально для більшості задач)
Поперечне перекриття	30–60% (40% оптимально для більшості задач)
Висота польоту	80–150 м (залежно від необхідного GSD)
Швидкість польоту	4–8 м/с (повільніше для кращої якості)
Частота знімків	1–3 секунди (залежно від швидкості)

Камери та сенсори для БПЛА

Вибір камери та сенсорів для БПЛА є критичним фактором, який безпосередньо впливає на якість та функціональні можливості отриманих даних. Для аерофотознімання найчастіше використовуються цифрові камери з роздільною здатністю від 12 до 42 мегапікселів (MP), з матрицями формату APS-C або повнокадровими, що забезпечують динамічний діапазон не менше 13 стопів. Оптимальна фокусна відстань для аерофотознімання становить 24–35 мм (у еквіваленті 35 мм), що забезпечує баланс між широтою охоплення та детальністю зображення.

Мультиспектральні камери, такі як Parrot Sequoia або MicaSense RedEdge, захоплюють зображення в 4–5 спектральних діапазонах (зелений, червоний, крайній червоний та ближній інфрачервоний), з просторовою роздільною здатністю 1–5 см/піксель при висоті польоту 100 м. Ці камери дозволяють розраховувати вегетаційні індекси (NDVI, NDRE, GNDVI), що є неоціненним для прецизійного землеробства при моніторингу стану посівів, виявленні нестачі поживних речовин або шкідників.

Лазерні сканери (LiDAR) з щільністю точок від 10 до 200 точок/м² та точністю вимірювання висоти ±5–10 см забезпечують створення високоточних ЦМР навіть у районах з щільним рослинним покривом. Сучасні системи LiDAR для БПЛА, такі як Velodyne Puck або YellowScan Surveyor Ultra, важать від 600 г до 2 кг та можуть працювати на відстані до 100–200 м від об'єкта з частотою сканування до 300 кГц.

Теплові (інфрачервоні) камери з роздільною здатністю 320×240 або 640×512 пікселів та температурною чутливістю 0,05–0,1°C, як FLIR Vue Pro або Workswell WIRIS Pro, дозволяють виявляти термальні аномалії в діапазоні температур від -40°C до +550°C. Вони незамінні для перевірки стану електроліній, виявлення теплових втрат у будівлях, раннього виявлення пожеж та пошуку людей під час рятувальних операцій.

Гіперспектральні камери, що охоплюють спектральний діапазон 400–2500 нм з роздільною здатністю 2–10 нм, дозволяють отримувати зображення у 100–300 спектральних каналах. Системи на кшталт Headwall Nano-Hyperspec або Specim AFX забезпечують надзвичайно детальний аналіз хімічного складу поверхонь, що дозволяє виявляти забруднення ґрунтів важкими металами, діагностувати захворювання рослин ще до появи видимих симптомів або визначати точний мінеральний склад геологічних об'єктів.

- **Цифрові камери:** Sony Alpha 7R IV (42 MP), DJI Zenmuse P1 (45 MP) з механічним затвором до 1/2000 с
- **Мультиспектральні камери:** MicaSense RedEdge-MX (5 каналів), Parrot Sequoia+ (4 канали + RGB), DJI P4 Multispectral (6 каналів)
- **Лазерні сканери (LiDAR):** RIEGL miniVUX-1UAV (точність ±15 мм), Velodyne Ultra Puck (діапазон до 200 м)
- **Теплові камери:** FLIR Vue Pro R (640×512 пікселів), Workswell WIRIS 2nd gen (температурна чутливість 0,05°C)
- **Гіперспектральні камери:** Headwall Nano-Hyperspec (270 спектральних каналів), Resonon Pika L (150–300 каналів)

Методи геодезичної прив'язки знімків

Геодезична прив'язка знімків є необхідним етапом для створення точних та достовірних карт та моделей місцевості. Існує два основних методи геодезичної прив'язки: прямий та непрямий. Прямий метод передбачає використання GPS/GNSS приймачів (з точністю 1–5 м), встановлених на БПЛА, для визначення координат кожного знімка. Сучасні GNSS системи підтримують сигнали GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС) та BeiDou (Китай), що забезпечує надійність позиціонування навіть у складних умовах. Цей метод дозволяє отримувати точність близько 2–3 метрів у горизонтальній площині, але вимагає використання дорогого обладнання вартістю від 1000$ та наявності сигналу від мінімум 4–5 супутників.

Непрямий метод передбачає використання опорних точок (ОТ), координати яких визначаються з точністю 1–3 см за допомогою геодезичного обладнання. Рекомендується розміщувати мінімум 5–7 ОТ на ділянці площею 1 км², маркуючи їх спеціальними маркерами розміром 40х40 см для якісної ідентифікації на знімках з висоти 100–200 м. Для визначення координат ОТ використовуються геодезичні GNSS приймачі (наприклад, Trimble R8s, Leica GS18 T) з режимом статичних спостережень тривалістю 15–30 хвилин на точку. Цей метод дозволяє досягти точності 3–5 см, але вимагає додаткових польових робіт та збільшує загальний час виконання проекту на 20–30%.

Методи RTK (Real-Time Kinematic) та PPK (Post-Processed Kinematic) становлять передовий підхід, що дозволяє отримувати точність 2–3 см без використання опорних точок. RTK передбачає отримання коригуючих сигналів з базової станції в режимі реального часу через радіо або GSM-зв'язок (відстань до 10–15 км), тоді як PPK дозволяє обробляти дані після польоту, використовуючи файли спостережень з базової станції. Для реалізації цих методів використовуються спеціальні GNSS модулі для БПЛА (наприклад, DJI D-RTK 2, Emlid Reach M2 або Septentrio AsteRx-m2) вартістю від 1500$ та базові станції (постійно діючі референцні станції або тимчасові станції). При використанні PPK потрібно синхронізувати час спрацювання затвору камери з часом GNSS приймача з точністю до мілісекунд, для чого застосовуються спеціальні контролери (triggering systems).

1

Прямий метод (GPS/GNSS)

Точність: 1-5 м. Обладнання: вбудовані GPS/GNSS приймачі DJI, Pixhawk або Here3. Застосування: проекти з невисокими вимогами до точності (моніторинг рослинності, загальне картографування).

2

Непрямий метод (опорні точки)

Точність: 3–5 см. Обладнання: геодезичні GNSS приймачі (Trimble, Leica, Topcon). Застосування: містобудівна документація, кадастрові роботи, проектування лінійних об'єктів.

3

RTK (Real-Time Kinematic)

Точність: 2–3 см. Обладнання: БПЛА з RTK модулем, базова станція, радіо/GSM зв'язок. Застосування: будівництво, маркшейдерія, моніторинг зсувів.

4

PPK (Post-Processed Kinematic)

Точність: 2–3 см. Обладнання: БПЛА з PPK модулем, базова станція, контролер синхронізації. Застосування: райони з поганим мобільним зв'язком, великі території, інженерні вишукування.

Обробка аерофотознімків: етапи та програмне забезпечення

Обробка аерофотознімків є складним та трудомістким процесом, який вимагає використання спеціального програмного забезпечення та знань в галузі фотограмметрії. Процес обробки складається з шести критичних етапів: імпорт та організація знімків (включаючи перевірку якості та метаданих), визначення внутрішніх параметрів камери (фокусна відстань, головна точка, коефіцієнти дисторсії), вирівнювання знімків, створення щільної хмари точок, створення тривимірної моделі місцевості (ЦМР/ЦММ) та генерація ортофотоплану з роздільною здатністю до 1–2 см/піксель.

На етапі вирівнювання знімків відбувається визначення взаємного розташування знімків та їх орієнтація в просторі за допомогою алгоритмів SIFT або SURF. Цей процес базується на автоматичному розпізнаванні 5000–10000 спільних точок (tie-points) на кожному знімку та використанні 5–15 опорних точок (GCP) з точністю до 1–2 см, рівномірно розподілених по площі знімання. На етапі створення щільної хмари точок формується масив даних з щільністю 100–500 точок/м², що дозволяє визначати тривимірні координати кожної точки на поверхні об'єкта знімання з точністю до 2–5 см по висоті.

Для професійної обробки аерофотознімків використовуються спеціалізовані програмні продукти з різними можливостями та ціновими категоріями. Agisoft Metashape Professional (вартість ліцензії ~$3500) забезпечує найвищу точність та гнучкість налаштувань, підтримує RTK/PPK дані та має потужні інструменти класифікації точок. Pix4Dmapper Pro (~$4990/рік) оптимізований для картографування сільськогосподарських угідь та має інтеграцію з хмарними сервісами. DroneDeploy (~$3000/рік) пропонує найпростіший інтерфейс користувача та швидку обробку даних, але з дещо нижчою точністю для складних об'єктів.

> "Якісна обробка аерофотознімків з дотриманням технологічних норм та параметрів – запорука отримання достовірних результатів з точністю, що відповідає вимогам інженерних та кадастрових робіт."

Створення ортофотопланів: принципи та методи

Ортофотоплан – це геометрично правильне зображення місцевості, яке отримане шляхом ортотрансформування аерофотознімків з просторовою роздільною здатністю від 2 до 30 см/піксель. Ортотрансформування – це процес усунення геометричних спотворень, викликаних рельєфом місцевості (до 40% на горбистій місцевості), кутом знімання (особливо при відхиленні від надиру більше ніж на 15°) та дисторсією об'єктива камери. Ортофотоплани використовуються для картографування, землеустрою, кадастрових робіт та інших геоінформаційних завдань, де потрібна висока точність (до 5–10 см у плані) та геометрична правильність зображення.

Процес створення ортофотоплану складається з трьох критичних етапів. Спочатку створюється цифрова модель рельєфу (ЦМР) з щільністю точок від 10 до 50 на м², яка використовується для усунення геометричних спотворень. Далі відбувається власне ортотрансформування аерофотознімків за допомогою методу зворотної проекції на основі ЦМР та калібрувальних параметрів камери (фокусна відстань, координати головної точки та коефіцієнти дисторсії). Останнім етапом є мозаїкування ортофотознімків – це процес об'єднання кількох ортофотознімків в єдине безшовне зображення з використанням алгоритмів вирівнювання кольору та яскравості по лініях порізу, які проходять по найменш контрастних ділянках знімків.

Для створення ортофотопланів використовуються спеціалізовані програмні продукти з різними алгоритмічними підходами. Agisoft Metashape застосовує метод Structure from Motion для відновлення просторового положення камер і підтримує опрацювання знімків з БПЛА та пілотованих літаків. Pix4Dmapper пропонує оптимізований робочий процес для сільськогосподарського моніторингу з точністю до 1–3 см при висоті польоту 100–120 м. DroneDeploy забезпечує хмарну обробку з автоматичним визначенням опорних точок на місцевості за наявними геопросторовими даними. Вибір програмного комплексу залежить від типу зйомки, обсягу даних (від десятків до тисяч знімків) та необхідної точності кінцевого ортофотоплану.

> "Якісний ортофотоплан є ключовим елементом сучасного геоінформаційного аналізу території та фундаментом для точного картографування"

Точність ортофотопланів та фактори впливу

Точність ортофотопланів є критичним параметром, який визначає їх придатність для використання в геодезичних та картографічних завданнях. Сучасні ортофотоплани можуть досягати точності до 2–5 см у плані та 5–10 см по висоті, що робить їх незамінними для містобудування та землеустрою. Точність залежить від п'яти ключових факторів: якості вихідних аерофотознімків, точності цифрової моделі рельєфу, геодезичної прив'язки, програмного забезпечення та кваліфікації оператора.

Точність вихідних аерофотознімків напряму залежить від роздільної здатності камери, яка зазвичай становить 20–42 мегапікселі для професійних систем. При висоті польоту 120–300 метрів це забезпечує просторову роздільну здатність 2–5 см/піксель. Точність ЦМР критично важлива — похибка в 1 метр у ЦМР може призвести до горизонтального зміщення на ортофотоплані до 30–50 см на схилах із крутизною 15–30°. Геодезична прив'язка з використанням RTK-GNSS систем забезпечує точність позиціонування до 1–2 см у плані та 2–3 см по висоті, що суттєво підвищує загальну точність ортофотоплану.

Програмне забезпечення, таке як Agisoft Metashape Professional чи Pix4Dmapper, використовує різні алгоритми обробки — наприклад, алгоритм SIFT для пошуку спільних точок забезпечує точність до піксельного рівня, а алгоритм SGM для побудови щільної хмари точок дозволяє досягати точності ЦМР до 1–2 висоти пікселя зображення. Кваліфікований оператор здатен оптимізувати параметри обробки — наприклад, правильне налаштування рівня довіри при відборі спільних точок (зазвичай 0.4–0.6) може підвищити точність на 15–20%. Для контролю точності рекомендується використовувати не менше 9–12 контрольних точок, рівномірно розподілених по території проекту, з точністю визначення координат не гіршою за 1 см.

- **Точність вихідних аерофотознімків** — 2–5 см/піксель при висоті польоту 120–300 м
- **Точність цифрової моделі рельєфу (ЦМР)** — вертикальна точність 5–15 см для стереоскопічної обробки та 3–7 см для LiDAR
- **Точність геодезичної прив'язки знімків** — 1–2 см у плані при використанні RTK-GNSS систем
- **Якість програмного забезпечення** — різниця до 20–30% у точності між різними програмними продуктами
- **Досвід оператора** — правильне налаштування параметрів може підвищити точність на 15–25%

Створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР)

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) – це тривимірне представлення земної поверхні, яке використовується для усунення геометричних спотворень на аерофотознімках та створення ортофотопланів. ЦМР є ключовим компонентом ортотрансформування знімків, забезпечуючи точність вертикального позиціонування від 0,3 до 1,5 метра залежно від роздільної здатності вихідних даних та складності рельєфу місцевості.

Стереоскопічна обробка аерофотознімків передбачає автоматичне розпізнавання спільних точок на перекриваючихся знімках (мінімум 60% поздовжнього та 30% поперечного перекриття) та визначення їх тривимірних координат через алгоритми кореляції зображень. Програмне забезпечення, таке як Agisoft Metashape та Pix4Dmapper, використовує метод фотограмметрії Structure from Motion (SfM) для створення щільної хмари точок з густиною до 100–400 точок на квадратний метр. Цей метод є найбільш економічно вигідним (вартість 1000–3000 грн/км²), але вимагає високої якості аерофотознімків з GSD (Ground Sample Distance) не більше 5–10 см/піксель.

Використання лазерного сканування (LiDAR) дозволяє отримувати точні та детальні дані про рельєф з вертикальною точністю до 5–10 см, навіть у місцях з густою рослинністю завдяки можливості фільтрації відбитих променів за часом прибуття. БПЛА з LiDAR-сенсорами здатні генерувати хмари точок з густиною 20–50 точок на квадратний метр при висоті польоту 100–150 метрів. Однак цей метод є більш дорогим (вартість 5000–10000 грн/км²) та вимагає використання спеціалізованих сенсорів, наприклад YellowScan Surveyor або Riegl miniVUX.

Інтерполяція даних геодезичних вимірювань передбачає створення ЦМР на основі точкових даних, отриманих за допомогою тахеометрів, GNSS-приймачів або нівелірів. При цьому застосовуються різні методи інтерполяції: тріангуляція Делоне (TIN), крігінг, зворотньо-зважені відстані (IDW) або сплайн-інтерполяція. Для забезпечення високої точності ЦМР (до 2–3 см по вертикалі) необхідно мати точки вимірювань з густиною не менше однієї точки на 25–100 м² в залежності від складності рельєфу. Цей метод є найбільш точним, але вимагає значних витрат часу (8–12 людино-годин на гектар) та ресурсів на проведення польових геодезичних вимірювань.

1. Стереоскопічна обробка аерофотознімків – оптимальний баланс між точністю та вартістю
2. Використання лазерного сканування (LiDAR) – найвища деталізація навіть під пологом рослинності
3. Інтерполяція даних геодезичних вимірювань – найвища точність для невеликих ділянок

3D-моделювання місцевості за даними БПЛА

3D-моделювання місцевості за даними БПЛА є перспективним напрямком розвитку геодезії та картографії, що дозволяє досягти точності відтворення рельєфу до 3-5 см. Такі моделі надають комплексну тривимірну візуалізацію території з можливістю вимірювання відстаней, площ та об'ємів, що особливо цінно для гірничодобувної промисловості, містобудування та оцінки наслідків стихійних лих. На відміну від традиційних ЦМР, 3D-моделі включають не лише рельєф, але й будівлі, рослинність та інфраструктуру, створюючи повноцінну цифрову копію місцевості.

Технологічний процес створення 3D-моделі складається з чітко регламентованих етапів: 1) збір даних за допомогою БПЛА з перекриттям знімків не менше 60% поздовжнього і 40% поперечного; 2) фотограмметрична обробка з використанням алгоритмів Structure from Motion (SfM) для вирівнювання знімків; 3) створення щільної хмари точок (50-500 точок на м²); 4) побудова полігональної моделі через тріангуляцію Делоне; 5) текстурування з роздільною здатністю до 2-5 см/піксель; 6) експорт у формати OBJ, 3DS, FBX або CityGML залежно від цільового призначення.

Сучасні програмні комплекси для створення 3D-моделей розрізняються за функціональністю та спеціалізацією: Agisoft Metashape забезпечує високу точність для інженерних проектів (похибка до 1:1000 від висоти польоту), Pix4Dmapper оптимізований для сільськогосподарського моніторингу з автоматичним розрахунком індексів вегетації, а ContextCapture від Bentley Systems інтегрується з BIM-системами для будівництва. Вибір програмного забезпечення залежить від конкретних вимог проекту, бюджету та потрібної деталізації кінцевої моделі, яка може досягати рівня LOD3 (Level of Detail) із відтворенням архітектурних деталей будівель.

Застосування ортофотопланів у землеустрої

Ортофотоплани, створені на основі даних БПЛА, стали невід'ємним інструментом у сучасному землеустрої. Вони застосовуються для широкого спектру задач: від інвентаризації земель і визначення точних меж ділянок до розробки комплексних проектів землеустрою та постійного моніторингу земельних ресурсів. Сучасні ортофотоплани мають просторову роздільну здатність до 2–5 см на піксель, що дозволяє отримувати надзвичайно детальну та актуальну інформацію про стан земельних ділянок, необхідну для прийняття обґрунтованих рішень у сфері землеустрою.

При ідентифікації та класифікації земельних ділянок за цільовим призначенням, ортофотоплани дозволяють чітко розрізняти сільськогосподарські угіддя, лісові насадження, водні об'єкти, забудовані території та інші типи земель. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, такого як ArcGIS або QGIS, фахівці можуть точно визначати площі ділянок з похибкою менше 1% та аналізувати їх конфігурацію. Особливо цінними ортофотоплани є для виявлення порушень земельного законодавства – самовільного зайняття ділянок, незаконного будівництва, несанкціонованої зміни цільового призначення земель.

У процесі розробки проектів землеустрою ортофотоплани використовуються як базовий шар, на який накладаються проектні рішення. Це дозволяє з високою точністю планувати розташування об'єктів інфраструктури, таких як дороги, меліоративні системи, будівлі та інженерні споруди. При проектуванні сільськогосподарських угідь ортофотоплани допомагають оптимізувати розміщення полів з урахуванням особливостей рельєфу та ґрунтового покриву, що фіксується на знімках. При оцінці впливу проектів землеустрою на довкілля, деталізовані ортофотоплани дозволяють виявити екологічно вразливі ділянки та запланувати природоохоронні заходи.

- Інвентаризація земель різних категорій з точністю до 98–99%
- Визначення меж земельних ділянок з сантиметровою точністю (2–5 см)
- Розробка проектів землеустрою з урахуванням просторових, екологічних та економічних аспектів
- Оперативний моніторинг використання земель та виявлення змін протягом сезону

Використання даних БПЛА для кадастрових робіт

Дані, отримані за допомогою БПЛА (безпілотних літальних апаратів), активно впроваджуються у кадастрові роботи в Україні протягом останніх 5–7 років. Ортофотоплани з роздільною здатністю до 3–5 см/піксель, створені на основі аерофотознімання з висоти 120–150 метрів, забезпечують точність визначення координат межових знаків до ±10 см, що відповідає вимогам Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000 – 1:500. Це критично важливо при інвентаризації земель сільськогосподарського призначення площею понад 100 га або при роботі у гірській місцевості Карпат, де традиційні методи GPS-вимірювань мають обмежену ефективність через складний рельєф.

За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (Digitals, ArcGIS, Agisoft Metashape) можна автоматично визначати координати характерних точок меж земельних ділянок з точністю до ±5 см, обчислювати площу ділянок з похибкою не більше 0,1%, а також ідентифікувати об'єкти нерухомості площею від 1 м². Ортофотоплани масштабу 1:500–1:2000 стають основою для створення цифрових кадастрових планів у форматах XML та IN4, які безпосередньо завантажуються до Державного земельного кадастру через систему електронного документообігу.

Відповідно до наказу Держгеокадастру №245 від 11.07.2018, для виконання кадастрових робіт з використанням даних БПЛА необхідно застосовувати сертифіковане обладнання з внесеними до державного реєстру геодезичними приладами та програмним забезпеченням. Геодезична прив'язка знімків повинна здійснюватися щонайменше за 4–6 контрольними точками на кожні 10 га території з використанням GNSS-приймачів у режимі RTK з точністю визначення координат не гірше ±2 см у плані та ±5 см за висотою. Середньоквадратична похибка створення ортофотоплану не повинна перевищувати 1/3 допустимої похибки визначення положення межового знаку відповідно до інструкції Держгеокадастру.

Моніторинг об'єктів інфраструктури за допомогою БПЛА

Використання БПЛА для моніторингу об'єктів інфраструктури набуває масштабного поширення в Україні. Зокрема, для інспекції мостових конструкцій застосовуються квадрокоптери DJI Phantom 4 RTK з точністю геолокації до 1 см, що дозволяє виявляти мікротріщини шириною від 0,5 мм. При обстеженні ліній електропередач використовуються спеціалізовані дрони з тепловізійними камерами FLIR Vue Pro R з роздільною здатністю 640×512 пікселів, які здатні виявляти перегріті з'єднання на відстані до 100 метрів.

Для створення ортофотопланів автомобільних доріг використовується метод перехресного польоту з перекриттям знімків на 80%, що забезпечує точність вимірювань до 2 см/піксель. Це дозволяє детально аналізувати пошкодження дорожнього покриття, включаючи вибоїни, тріщини та колійність. При моніторингу залізничної інфраструктури за допомогою БПЛА Trimble UX5 HP досягається можливість створення цифрових моделей рельєфу з точністю по висоті до 3 см, що критично важливо для відстеження деформацій залізничного полотна та контактної мережі.

З аналізу практики "Укрзалізниці" та "Укравтодору", використання БПЛА для моніторингу інфраструктурних об'єктів скорочує витрати на інспекцію до 70% порівняно з традиційними методами, зменшує час обстеження на 85% та підвищує ймовірність раннього виявлення критичних дефектів на 60%. В умовах обмеженого фінансування програм з відновлення інфраструктури, БПЛА-моніторинг став незамінним інструментом для оптимізації використання ресурсів на найбільш проблемних ділянках.

Нормативно-правова база використання БПЛА в Україні

Використання БПЛА в Україні регулюється низкою нормативно-правових актів, які визначають правила польотів, вимоги до БПЛА та їх операторів, а також відповідальність за порушення правил. До основних нормативних документів, що регулюють використання БПЛА в Україні, належать:

- Повітряний кодекс України (стаття 39 якого визначає БПЛА як "повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту")
- Правила використання повітряного простору України (Постанова КМУ №954 від 6 грудня 2017 року зі змінами 2021 року)
- Авіаційні правила України "Правила використання повітряного простору України" (Наказ Державіаслужби №362 від 11.05.2018)
- Порядок здійснення державного контролю за дотриманням правил використання повітряного простору України (Постанова КМУ №401 від 07.06.2017)

Відповідно до цих документів, для використання БПЛА вагою понад 20 кг необхідно отримати дозвіл на виконання польотів у Державній авіаційній службі України або регіональних підрозділах. Дрони вагою від 2 до 20 кг підлягають обов'язковій реєстрації через електронний кабінет пілота на сайті Державіаслужби з отриманням унікального реєстраційного номера. Польоти дронів вагою до 2 кг у межах прямої видимості на висоті до 120 метрів не потребують дозволу за умови дотримання заборон та обмежень.

Оператори БПЛА повинні мати відповідну кваліфікацію відповідно до класу дрона та сфери застосування. Для комерційного використання БПЛА необхідно пройти спеціальні курси та отримати сертифікат пілота. З 2023 року введено обов'язкове страхування цивільної відповідальності оператора БПЛА за шкоду, заподіяну третім особам. За порушення правил використання БПЛА передбачена адміністративна відповідальність у вигляді штрафу від 1700 до 8500 гривень або кримінальна відповідальність у випадку завдання значної шкоди.

Важливо враховувати, що з 1 січня 2022 року в Україні діє нова редакція Авіаційних правил, яка адаптована до регуляторних вимог Європейського Союзу (Регламент ЄС 2019/947 та 2019/945). Регулярно оновлюється перелік заборонених для польотів БПЛА зон, особливо в прикордонних районах та поблизу військових об'єктів. Оператори БПЛА зобов'язані слідкувати за актуальними NOTAM (Notice to Airmen) повідомленнями та дотримуватися всіх обмежень, встановлених в умовах воєнного стану.

Перспективи розвитку технологій БПЛА у геодезії

Технології БПЛА у геодезії продовжують активно розвиватися, відкриваючи нові можливості для збору та обробки геопросторових даних. Останні досягнення включають розробку квадрокоптерів із часом польоту до 60 хвилин і дальністю дії до 7 км, що значно розширює площу покриття за один виліт. Сучасні мультиспектральні камери з роздільною здатністю до 0,5 см/піксель дозволяють отримувати надзвичайно детальні знімки, а лазерні сканери (LiDAR) забезпечують точність вимірювань до 1–2 см навіть у місцях із густою рослинністю. Експерти прогнозують, що до 2025 року точність геодезичних вимірювань за допомогою БПЛА досягне міліметрового рівня.

Одним з перспективних напрямків розвитку є використання БПЛА з штучним інтелектом (ШІ) для автоматичного розпізнавання об'єктів на знімках і створення тривимірних моделей місцевості. Нейронні мережі типу U-Net та ResNet здатні виявляти та класифікувати об'єкти інфраструктури з точністю до 95%, а технології комп'ютерного зору дозволяють виявляти дефекти розміром від 5 мм на будівельних конструкціях. Системи реального часу, такі як Edge AI, забезпечують обробку даних безпосередньо на борту БПЛА, скорочуючи час аналізу на 70–80% порівняно з традиційними методами. Такі рішення особливо цінні для моніторингу критичної інфраструктури та екстрених інженерних обстежень.

У найближчі 3–5 років БПЛА будуть використовуватися не тільки для збору даних, а й для виконання різних геодезичних робіт. Вже розробляються дрони-роботи, здатні встановлювати тимчасові геодезичні маркери з точністю до 1 см, вимірювати відстані лазерними далекомірами з похибкою менше 0,5 мм/км та проводити автоматичний контроль вертикальності будівельних конструкцій у реальному часі. Економічний ефект від впровадження таких технологій оцінюється у зниженні вартості геодезичних робіт на 30–40% та прискоренні їх виконання у 3–5 разів. Згідно з дослідженнями Асоціації геодезистів України, до 2027 року до 70% усіх топографічних зйомок у країні виконуватимуться за допомогою автоматизованих БПЛА-систем.

Висновки та рекомендації щодо впровадження БПЛА у геодезичну практику

Використання БПЛА у геодезичній практиці демонструє значні переваги порівняно з традиційними методами: точність вимірювань досягає 1-3 см при використанні RTK-систем, швидкість збору даних зростає у 5-7 разів, економія коштів становить 30-50% за рахунок скорочення польових робіт, а безпека підвищується завдяки відсутності необхідності доступу до небезпечних зон. Для успішного впровадження необхідно обрати БПЛА з урахуванням вантажопідйомності (від 300 г до 5 кг для різних камер та сенсорів), тривалості польоту (оптимально 25-45 хвилин), і стійкості до вітру (до 10-12 м/с).

Рекомендується починати з пілотних проектів площею до 10-15 га, використовуючи готові рішення на базі DJI Phantom 4 RTK або Autel EVO II RTK. При плануванні польотів необхідно забезпечити перекриття знімків не менше 70% повздовжнього та 60% поперечного, висоту польоту 50-120 м залежно від необхідної роздільної здатності, та виконувати зйомку при швидкості вітру до 8 м/с і освітленості не менше 10000 люкс. Для обробки даних рекомендується використовувати сертифіковане ПЗ як Agisoft Metashape Professional, Pix4Dmapper або ContextCapture, а для інтеграції з ГІС-системами – ArcGIS, QGIS або AutoCAD Civil 3D з відповідними плагінами.

Дотримання чинного законодавства України вимагає реєстрації БПЛА масою понад 20 кг, отримання дозволів на польоти у контрольованому повітряному просторі від Державіаслужби та погодження з відповідними органами при роботі поблизу стратегічних об'єктів. При правильному впровадженні, з урахуванням усіх технічних та юридичних аспектів, використання БПЛА дозволяє збільшити продуктивність геодезичних робіт на 200-300%, зменшити витрати на 40-60% при великих об'ємах робіт та розширити спектр послуг геодезичних підприємств, включаючи моніторинг будівництва, створення цифрових двійників об'єктів інфраструктури та оперативне картографування територій після надзвичайних ситуацій.