

Д.С. Поліщук, аспірант  
А.В. Панасюк, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Вибір оптимального методу геоприв'язки БПЛА для забезпечення високоточної фотограмметричної обробки

*Останнім часом спостерігається все більший інтерес до фотограмметричних матеріалів, а саме зйомки поверхні, які виконані за допомогою БПЛА. Особливо розвинене це питання для гірничодобувних підприємств, які мають великі розміри за площею. У зв'язку з постійним розвитком гірничодобувної промисловості та ускладненням технологічних процесів, значення дистанційних методів збору просторових даних, зокрема за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), невпинно зростає. Використання БПЛА в маркшейдерських роботах стає все більш поширеним завдяки простоті застосування та здатності швидко отримувати точні дані. У таких умовах особливої актуальності набуває питання вибору оптимального підходу до геоприв'язки та планування польотів БПЛА з метою забезпечення високої якості знімального матеріалу. На сьогодні відсутнє чітке порівняння різних способів прив'язки БПЛА для визначення точних координат місцевості. У зв'язку з цим актуальним є дослідження, спрямоване на визначення найефективнішої методики прив'язки БПЛА для подальшої обробки фотограмметричних матеріалів у програмному забезпеченні Agisoft Metashape. В межах експерименту проаналізовано, як варіанти прив'язки впливають на точність визначення координат місцевості, що є ключовим при геопросторових вимірюваннях.*

*Результати дослідження мають практичну цінність для створення топооснов, оскільки дозволяють підвищити точність геоприв'язки та зменшити похибки під час виконання зйомки. Раціональне планування маршрутів сприяє оптимізації витрат, зменшенню людського впливу на якість даних, покращенню результатів 3D-моделювання та розширенню можливостей застосування БПЛА в гірничій справі.*

*З огляду на зазначене вище, доцільним є проведення дослідження щодо вибору найефективнішого підходу до геоприв'язки БПЛА під час виконання робіт з побудови топопланів.*

**Ключові слова:** геоприв'язка; фотограмметрія; безпілотні літальні апарати; Agisoft Metashape; оптимізація маршрутів; аерофотознімання; 3D-моделювання.

**Актуальність теми.** У сучасних реаліях, коли точність просторових вимірювань відіграє ключову роль у прийнятті управлінських, технічних та економічних рішень, дедалі більшої уваги набуває застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у геодезичній, маркшейдерській та кадастровій практиці. Зокрема, технології аерофотознімання з БПЛА стали ефективним інструментом для оперативного збору просторових даних великої точності з мінімальними витратами часу та ресурсів.

Фотограмметрична обробка даних, отриманих за допомогою БПЛА, безпосередньо залежить від якості геоприв'язки знімків, яка забезпечує коректне позиціонування кожного кадру в просторовій системі координат. Від обраного методу геоприв'язки залежить точність побудови цифрових моделей місцевості, ортофотопланів, об'ємних обчислень та інших похідних результатів. У гірничодобувній галузі, де мова йде про розрахунок обсягів видобутку, планування розкривних робіт або контроль деформацій, точність є критично важливою, оскільки навіть мінімальні помилки можуть призвести до матеріальних збитків чи порушень техніки безпеки [2].

Існує кілька підходів до геоприв'язки в БПЛА-зйомці: використання наземних опорних точок (GCP), технологій реального позиціонування RTK (Real-Time Kinematic), постобробки координат знімків методом РРК (Post-Processing Kinematic) або комбінацій цих способів. Кожен із методів має свої переваги й обмеження щодо точності, вартості, часу підготовки, а також потреби у додатковому обладнанні. Проте на практиці часто виникає проблема вибору оптимального підходу для конкретних умов зйомки. Більше того, відсутність стандартизованих методик порівняння точності та ефективності різних способів геоприв'язки ускладнює прийняття рішень при плануванні місій БПЛА.

У контексті широкого використання фотограмметричного програмного забезпечення, зокрема Agisoft Metashape, яке вимагає точних координат для побудови надійних 3D-моделей, актуальним стає дослідження впливу різних методів геоприв'язки на кінцеву якість результатів. Недостатня точність геоприв'язки може призвести до геометричних спотворень, помилок у масштабі та зсувів моделей, що негативно впливає на прийняття рішень у сфері геомоніторингу, проєктування та контролю видобувних процесів [4].

Дане дослідження проводилося на родовищі з видобування торфу в Дубенському районі Рівненської області, в процесі якого було виконано зйомку поверхні родовища за допомогою квадрокоптера DJI Matrice 300. Було виконано 3 заміри за допомогою БПЛА. Після проведення польових робіт було виконано обробку даних за допомогою AgiSoft Metashape. Та виконано замір контрольних точок за допомогою GNSS-приймача SOKKIA GRX5. Після чого виконано порівняння відхилень та проведено аналіз отриманих результатів.

Таким чином, визначення оптимального методу геоприв'язки для конкретного типу об'єкта зйомки та умов місцевості є важливим науково-прикладним завданням. Воно дозволяє підвищити ефективність використання БПЛА, покращити точність фотограмметричних продуктів і знизити витрати на підготовку польових робіт. Результати такого дослідження мають значну цінність для фахівців у галузі маркшейдерії, геодезії, землеустрою, а також для промислових підприємств, що впроваджують цифрові методи управління територіями.

**Метою статті** є дослідження з визначення оптимального методу геоприв'язки БПЛА для забезпечення високоточної фотограмметричної обробки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Виконання робіт зі зйомки поверхні родовища займають дуже багато часу, тому використання БПЛА для проведення цих робіт є дуже актуальним. Одним з основних критеріїв, що впливають на точність зйомки, є орієнтування БПЛА.

Сунджей Лі та Йосун Чой розглянули у своїй роботі основні тенденції розвитку БПЛА в гірничодобувній технології, основним напрямом їхньої роботи було виявлення варіантів застосування БПЛА в гірничодобувній промисловості [3].

Дже Джин Ю та Дон Ву Кім провели дослідження з визначення оптимальної кількості наземних опорних точок для отримання оптимальних даних зйомки поверхні за допомогою БПЛА. За результатами якого зробили висновок, що оптимальна кількість точок повинна визначатися відповідно до місцевості зйомки [11].

Ейлід Стотт та Річард Д. Вільямс провели дослідження з розподілу опорних точок для проведення зйомки за допомогою БПЛА. Та отримали такі результати: величина похибки залишалася сталою незважаючи на кількість та конфігурацію опорних точок [10].

**Методи дослідження.** У процесі дослідження було застосовано комплекс методів, що поєднує польові геодезичні вимірювання, аерофотознімання з використанням безпілотного літального апарата та подальшу фотограмметричну обробку даних у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Для забезпечення точності результатів на місцевості були закладені контрольні наземні опорні точки, виготовлені у вигляді пластикових мішеней розміром 60x60 см. Координати контрольних точок визначалися з використанням геодезичного GNSS-приймача SOKKIA GRX5 у диференційному режимі з високою точністю.

Порівняння результатів проводилося за чотирма варіантами орієнтування БПЛА під час обробки даних у програмі Agisoft Metashape:

Отримані аерофотознімки були оброблені у Agisoft Metashape з побудовою хмар точок і ортофотопланів для кожного варіанта. Для оцінювання точності виконано зіставлення координат, отриманих фотограмметричним методом, із координатами контрольних точок, визначених GNSS-приймачем. На основі різниць координат проведено аналіз відхилень для кожного сценарію геоприв'язки, що дало змогу порівняти їхню точність та ефективність у реальних умовах зйомки.

**Викладення основного матеріалу.** Топографічні зйомки динамічних елементів рельєфу кар'єрів, що застосовуються для геомоніторингу, аналізу деформацій бортів, моделювання водовідведення та контролю гірничих робіт, зазвичай охоплюють ділянки до кількох км<sup>2</sup>. У таких умовах характерна складна топографія, висока динаміка змін обумовлена вибухами, розкривними роботами та переміщенням техніки. Це вимагає високоточних, оперативних і гнучких методів знімання [6].

Застосування безпілотних літальних апаратів з цифровими фотокамерами у поєднанні з наземними опорними точками, закріпленими за допомогою геодезичних приймачів GNSS, та подальшою обробкою зображень методом Structure from Motion (SfM) дозволяє отримати щільні хмари точок і ортофотоплани з детальністю, достатньою для технічного аналізу.

Основні обмеження методу – це потреба у доступності майданчиків для розміщення наземних опорних точок, залежність якості даних від погодних умов, тривалості польоту БПЛА та геометрії знімання [12].

Використання технології прямого геоприв'язування з високоточними GNSS-антенами, встановленими на БПЛА, дає змогу відмовитися від наземних опорних точок, що суттєво знижує трудові витрати на полігонні роботи. Обробка GNSS-даних у режимі PPK або RTK дозволяє визначити положення центра знімання кожного кадру з точністю до 2–3 см, що робить метод ефективним для регулярного моніторингу стану кар'єру.

У цьому дослідженні виконано порівняння чотирьох варіантів орієнтування БПЛА при проведенні зйомки. Для виконання порівняння було проведено замір площі родовища та визначення координат

контрольних точок, які виконані у вигляді пластикових щитів розміром 60х60 см. Дослідження виконувалося за такими параметрами орієнтування БПЛА в просторі:

1 варіант – DJI Matrice 300 з вбудованими GNSS-модулями та обробкою в AgiSoft Metashape без використання опорних точок при обробці зйомки та створенні хмари точок;

2 варіант – DJI Matrice 300 з вбудованими GNSS-модулями та обробкою в AgiSoft Metashape з використання опорних точок при обробці зйомки та створенні хмари точок;

3 варіант – DJI Matrice 300 за допомогою RTK-модуля та обробкою в AgiSoft Metashape з використання опорних точок при обробці зйомки та створенні хмари точок;

4 варіант – DJI Matrice 300 за допомогою RTK-методу з використанням базової GNSS-станції та обробкою в AgiSoft Metashape.

Після виконання робіт за допомогою БПЛА було виконано замір контрольних точок за допомогою GNSS-приймача SOKKIA GRX5.

За результатами проведених зазначених вище робіт було виконано порівняння даних варіантів та варіанта з виконанням замірів контрольних точок за допомогою GNSS-приймача SOKKIA GRX5 (рис. 1), результати проведення замірів внесено до таблиці 1.

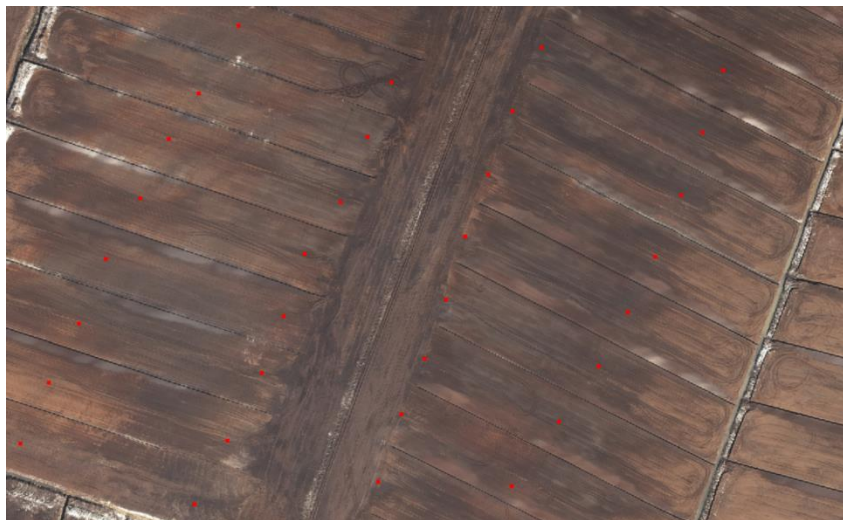


Рис. 1. Розташування контрольних точок на місцевості, за якими проводилися заміри

Таблиця 1

Каталог координат точок, отриманих за допомогою різних методів

Координата / № точки	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3		Варіант 4		Контрольний замір	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	5560829, 324	2269200, 442	5560829, 303	2269200, 481	5560829, 291	2269200, 484	5560829, 271	2269200, 511	5560829, 273	2269200, 512
2	5560905, 701	2269256, 045	5560905, 739	2269256, 011	5560905, 766	2269255, 954	5560905, 781	2269255, 973	5560905, 782	2269255, 978
3	5560870, 447	2269230, 57	5560870, 417	2269230, 608	5560870, 402	2269230, 61	5560870, 391	2269230, 633	5560870, 395	2269230, 636
4	5560940, 174	2269274, 707	5560940, 284	2269274, 658	5560940, 278	2269274, 641	5560940, 256	2269274, 622	5560940, 253	2269274, 626
5	5560975, 659	2269291, 906	5560975, 619	2269291, 873	5560975, 573	2269291, 812	5560975, 593	2269291, 837	5560975, 590	2269291, 834
6	5561014, 801	2269308, 495	5561014, 816	2269308, 537	5561014, 829	2269308, 559	5561014, 855	2269308, 577	5561014, 853	2269308, 572
7	5561055, 028	2269321, 876	5561054, 996	2269321, 934	5561054, 978	2269321, 947	5561054, 961	2269321, 965	5561054, 963	2269321, 963
8	5561094, 695	2269335, 28	5561094, 698	2269335, 386	5561094, 682	2269335, 373	5561094, 657	2269335, 359	5561094, 655	2269335, 353

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	5561122, 908	2269026, 414	5561122, 823	2269026, 5	5561122, 851	2269026, 483	5561122, 862	2269026, 468	5561122, 865	2269026, 467
10	5561079, 752	2269001, 053	5561079, 859	2269001, 157	5561079, 842	2269001, 14	5561079, 829	2269001, 123	5561079, 827	2269001, 128
11	5561050, 722	2268982, 063	5561050, 632	2268982, 038	5561050, 649	2268982, 014	5561050, 661	2268981, 991	5561050, 666	2268981, 999
12	5561012, 951	2268963, 888	5561012, 853	2268963, 861	5561012, 87	2268963, 841	5561012, 888	2268963, 827	5561012, 882	2268963, 822
13	5560974, 061	2268941, 76	5560974, 182	2268941, 799	5560974, 166	2268941, 818	5560974, 157	2268941, 836	5560974, 153	2268941, 831
14	5560933, 074	2268924, 68	5560933, 065	2268924, 651	5560933, 054	2268924, 629	5560933, 041	2268924, 619	5560933, 038	2268924, 611
15	5560895, 19	2268905, 533	5560895, 242	2268905, 524	5560895, 258	2268905, 509	5560895, 267	2268905, 497	5560895, 269	2268905, 493
16	5560856, 454	2268887, 397	5560856, 507	2268887, 291	5560856, 523	2268887, 306	5560856, 537	2268887, 327	5560856, 532	2268887, 323
17	5560817, 733	2268998, 196	5560817, 848	2268998, 29	5560817, 832	2268998, 27	5560817, 819	2268998, 257	5560817, 812	2268998, 254
18	5560858, 394	2269019, 346	5560858, 47	2269019, 327	5560858, 459	2269019, 313	5560858, 448	2269019, 299	5560858, 441	2269019, 296
19	5560901, 526	2269041, 223	5560901, 451	2269041, 251	5560901, 465	2269041, 266	5560901, 478	2269041, 286	5560901, 474	2269041, 281
20	5560937, 745	2269055, 071	5560937, 795	2269055, 186	5560937, 808	2269055, 176	5560937, 823	2269055, 163	5560937, 818	2269055, 156
21	5560977, 6	2269068, 471	5560977, 526	2269068, 506	5560977, 542	2269068, 522	5560977, 557	2269068, 541	5560977, 553	2269068, 548
22	5561010, 542	2269091, 546	5561010, 465	2269091, 529	5561010, 478	2269091, 515	5561010, 497	2269091, 498	5561010, 493	2269091, 497
23	5561052, 157	2269108, 659	5561052, 066	2269108, 758	5561052, 079	2269108, 745	5561052, 093	2269108, 728	5561052, 096	2269108, 724
24	5561087, 182	2269124, 308	5561087, 221	2269124, 2	5561087, 235	2269124, 219	5561087, 249	2269124, 237	5561087, 246	2269124, 234
25	5561108, 936	2269219, 569	5561109, 034	2269219, 659	5561109, 017	2269219, 647	5561108, 998	2269219, 633	5561108, 993	2269219, 636
26	5561068, 42	2269201, 047	5561068, 39	2269200, 952	5561068, 375	2269200, 969	5561068, 356	2269200, 985	5561068, 354	2269200, 988
27	5561028, 103	2269185, 622	5561028, 153	2269185, 712	5561028, 166	2269185, 697	5561028, 187	2269185, 683	5561028, 188	2269185, 686
28	5560988, 583	2269170, 936	5560988, 554	2269170, 9	5560988, 538	2269170, 887	5560988, 527	2269170, 867	5560988, 521	2269170, 864
29	5560948, 4	2269158, 382	5560948, 367	2269158, 408	5560948, 353	2269158, 424	5560948, 337	2269158, 439	5560948, 333	2269158, 434
30	5560910, 635	2269144, 961	5560910, 596	2269145, 073	5560910, 581	2269145, 059	5560910, 569	2269145, 049	5560910, 566	2269145, 042
31	5560875, 136	2269130, 293	5560875, 213	2269130, 194	5560875, 198	2269130, 214	5560875, 183	2269130, 229	5560875, 187	2269130, 223
32	5560832, 208	2269115, 524	5560832, 179	2269115, 389	5560832, 164	2269115, 403	5560832, 149	2269115, 423	5560832, 148	2269115, 424

Для подальшого розрахунку потрібно знайти відхилення кожного з варіантів та зйомки за допомогою GNSS-приймача (табл. 2).

Таблиця 2

Абсолютне відхилення для кожної точки від зйомки за допомогою GNSS-приймача

Координата / № точки	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3		Варіант 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-0,051	0,070	-0,030	0,031	-0,018	0,028	0,002	0,001
2	0,081	-0,067	0,043	-0,033	0,016	0,024	0,001	0,005
3	-0,052	0,066	-0,022	0,028	-0,007	0,026	0,004	0,003
4	0,079	-0,081	-0,031	-0,032	-0,025	-0,015	-0,003	0,004
5	-0,069	-0,072	-0,029	-0,039	0,017	0,022	-0,003	-0,003

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	0,052	0,077	0,037	0,035	0,024	0,013	-0,002	-0,005
7	-0,065	0,087	-0,033	0,029	-0,015	0,016	0,002	-0,002
8	-0,040	0,073	-0,043	-0,033	-0,027	-0,020	-0,002	-0,006
9	-0,043	0,053	0,042	-0,033	0,014	-0,016	0,003	-0,001
10	0,075	0,075	-0,032	-0,029	-0,015	-0,012	-0,002	0,005
11	-0,056	-0,064	0,034	-0,039	0,017	-0,015	0,005	0,008
12	-0,069	-0,066	0,029	-0,039	0,012	-0,019	-0,006	-0,005
13	0,092	0,071	-0,029	0,032	-0,013	0,013	-0,004	-0,005
14	-0,036	-0,069	-0,027	-0,040	-0,016	-0,018	-0,003	-0,008
15	0,079	-0,040	0,027	-0,031	0,011	-0,016	0,002	-0,004
16	0,078	-0,074	0,025	0,032	0,009	0,017	-0,005	-0,004
17	0,079	0,058	-0,036	-0,036	-0,020	-0,016	-0,007	-0,003
18	0,047	-0,050	-0,029	-0,031	-0,018	-0,017	-0,007	-0,003
19	-0,052	0,058	0,023	0,030	0,009	0,015	-0,004	-0,005
20	0,073	0,085	0,023	-0,030	0,010	-0,020	-0,005	-0,007
21	-0,047	0,077	0,027	0,042	0,011	0,026	-0,004	0,007
22	-0,049	-0,049	0,028	-0,032	0,015	-0,018	-0,004	-0,001
23	-0,061	0,065	0,030	-0,034	0,017	-0,021	0,003	-0,004
24	0,064	-0,074	0,025	0,034	0,011	0,015	-0,003	-0,003
25	0,057	0,067	-0,041	-0,023	-0,024	-0,011	-0,005	0,003
26	-0,066	-0,059	-0,036	0,036	-0,021	0,019	-0,002	0,003
27	0,085	0,064	0,035	-0,026	0,022	-0,011	0,001	0,003
28	-0,062	-0,072	-0,033	-0,036	-0,017	-0,023	-0,006	-0,003
29	-0,067	0,052	-0,034	0,026	-0,020	0,010	-0,004	-0,005
30	-0,069	0,081	-0,030	-0,031	-0,015	-0,017	-0,003	-0,007
31	0,051	-0,070	-0,026	0,029	-0,011	0,009	0,004	-0,006
32	-0,060	-0,100	-0,031	0,035	-0,016	0,021	-0,001	0,001

Для проведення подальших розрахунків було знайдено середнє арифметичне відхилення для кожного варіанта за координатами X та Y, результати якого наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Середнє арифметичне відхилення кожного з варіантів за координатами X та Y від зйомки за допомогою GNSS-приймача

Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3		Варіант 4	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,063	0,068	0,031	0,033	0,016	0,017	0,004	0,004

Виходячи з даних таблиці 3, можемо зробити висновок, що варіанти 2, 3 та 4 можливі для проведення маркшейдерської зйомки. Оскільки найбільша похибка становить 0,033 м, що є допустимим значенням, максимальна становить 0,05 м, а варіант 1 є непридатним для використання при проведенні маркшейдерської зйомки, який має середнє арифметичне відхилення більше за максимально допустиме.

За даними таблиці 3 виконано порівняння похибок за варіантами та координатами X та Y, які зображені на рисунку 2.

За даними рисунка 2 можемо зробити висновок, що найменша похибка буде при виконанні зйомки за допомогою DJI Matrice 300 з додатковою функцією RTK-методу з використанням базової GNSS-станції та обробкою в AgiSoft Metashape. Беручи до уваги зазначене вище, можемо рекомендувати проведення маркшейдерської зйомки з зазначеним методом орієнтування БПЛА.

За отриманими результатами було проведено розрахунок середніх значень для кожного з варіантів та розрахунок діапазону відхилень для кожного з варіантів, які наведено в таблицях 4–5 відповідно.

За даними таблиць 4–5 було побудовано графіки, які зображено на рисунках 3–4.

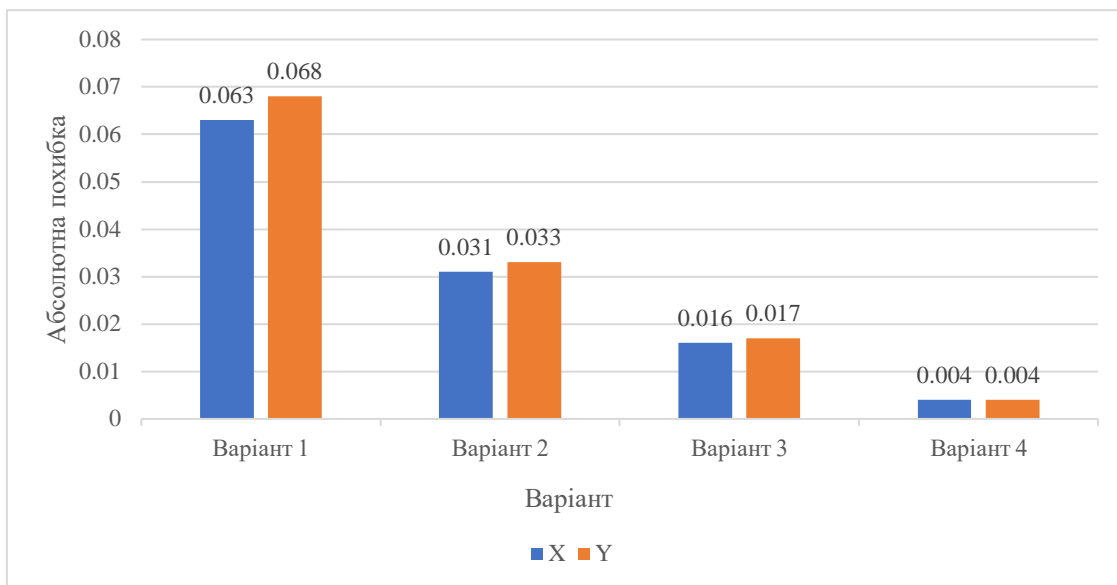


Рис. 2. Порівняння похибок

Таблиця 4  
Середнє арифметичне відхилення кожного з варіантів від зйомки за допомогою GNSS-приймача

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Відхилення	0,066	0,032	0,017	0,004

Таблиця 5

Діапазон відхилень похибок для різних варіантів

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Відхилення	0,058	0,02	0,02	0,07

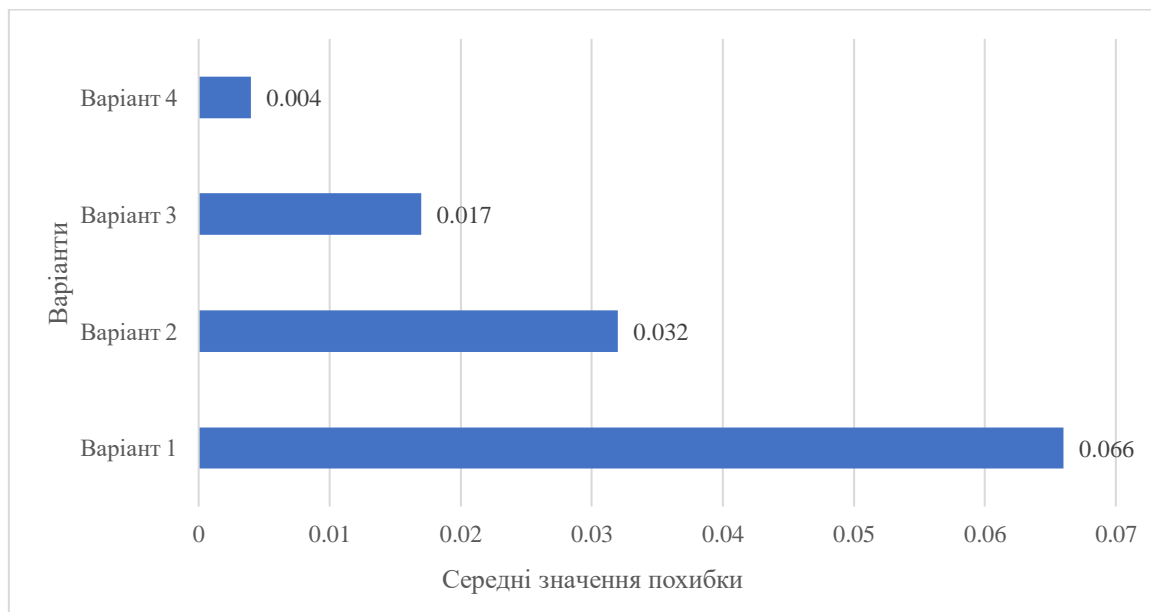


Рис. 3. Середні значення похибок для різних варіантів обчислень

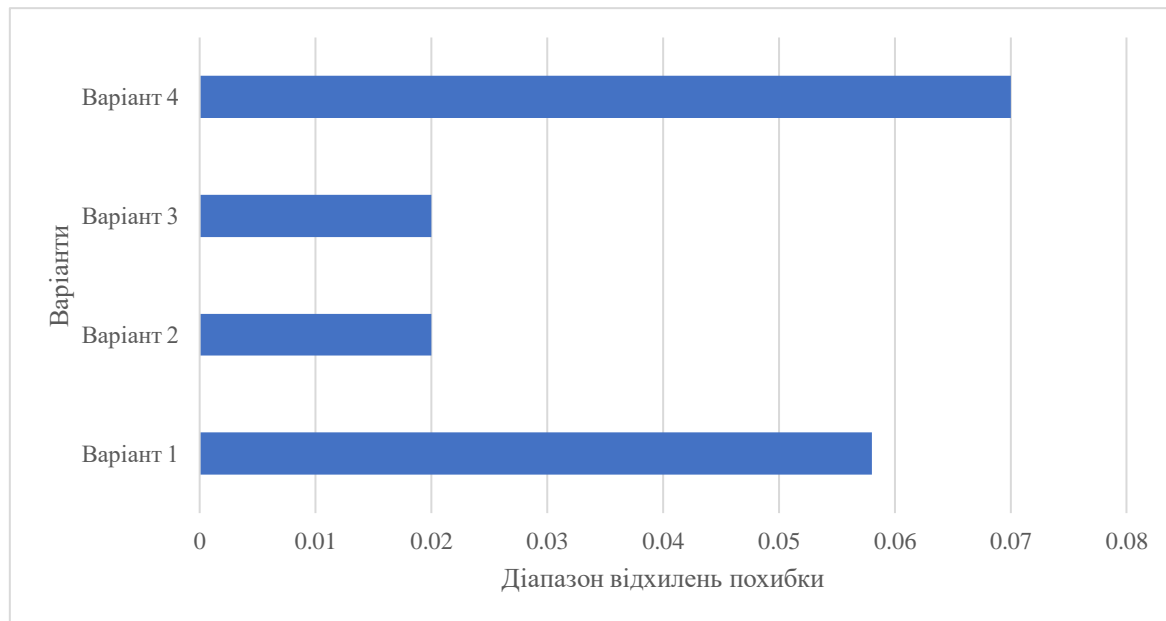


Рис. 4. Діапазон відхилень похибок для різних варіантів обрахунків

За даними рисунків можемо зробити висновок, що, хоча найменша середня похибка для варіанта 4, найменший діапазон відхилень для варіантів 2 та 3, тобто розбіжність між значеннями замірів буде менша.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У проведеному дослідженні порівняно чотири варіанти орієнтування БПЛА DJI Matrice 300 під час топографічної зйомки кар'єру з використанням різних методів геоприв'язування та обробки даних у Agisoft Metashape. Було виконано детальний аналіз відхилень координат контрольних точок від даних високоточного GNSS-приймача (SOKKIA GRX5).

Результати показали, що найбільші відхилення спостерігалися у варіанті 1 (без використання наземних опорних точок, із тільки вбудованими GNSS-модулями без RTK/PPK), що підтверджує обмеження такого підходу для високоточного моніторингу кар'єрних рельєфів. Варіант 2 (з використанням наземних опорних точок) показав суттєве зменшення відхилень. Варіанти 3 і 4, у яких застосовано RTK-метод (зокрема у 4 варіанті із власною базовою GNSS-станцією), забезпечили найкращі результати – мінімальні середні відхилення і найбільшу відповідність координатам контрольних точок. Це доводить ефективність технології прямого геоприв'язування із RTK/PPK для оперативного, високоточного моніторингу стану кар'єру без необхідності трудомісткої підготовки наземних опорних точок. Але звертаючи увагу на діапазон відхилень можемо прийти до висновку, що постійне корегування позиціонування за допомогою GNSS-станції призводить до зміни похибки для різних точок.

Таким чином, використання БПЛА з RTK-модулями є доцільним і перспективним підходом для регулярного геомоніторингу кар'єрів, аналізу деформацій бортів, планування водовідведення та контролю гірничих робіт, особливо в умовах великої площі та складної топографії.

#### Список використаної літератури:

1. Atik M.E. Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production / M.E. Atik, M.Arkali // Drones. – 2025. – Vol. 9, № 15.
2. Jarahizadeh S. A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra / S.Jarahizadeh, B.Salehi // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 286.
3. Lee S. Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry / S.Lee, Y.Choi // Geosyst. Eng. – 2016. – Vol. 19. – P. 197–204.
4. Liao X. Enable UAVs safely flight in low-altitude: A Preliminary research of the public air route network of UAVs / X.Liao, Ch.Xu, H.Yue // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – 2019. – P. 110–117. DOI: 10.1109/icuas.2019.8798083.
5. Hassanalian M. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review / M.Hassanalian, A.Abdelkefi // Progress in Aerospace Sciences. – 2017. – Vol. 91. – P. 99–131.
6. Pomortseva O. PROCESSING OF GEODESIC DATA OBTAINED WITH THE HELP OF UAVS / O.Pomortseva, S.Kobzan, P.Steshenko // Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ». – Boston, USA, 2022. – P. 162–165.
7. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives / H.Ren, Y.Zhao, W.Xiao and other // Int J Coal Sci Technol. – 2019. – Vol. 6. – P. 320–333.

8. Optimized Autonomous Drone Navigation Using Double Deep Q-Learning for Enhanced Real-Time 3D Image Capture / *J. Sánchez-Soriano, M.Á. Rojo-Gala, G. Pérez-Pérez and other* // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, № 725.
9. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry / *J. Shahmoradi, E. Talebi, P. Roghanchi, M. Hassanalain* // *Drones*. – 2020. – Vol. 4, № 34.
10. Stott E. Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry / *E. Stott, R.D. Williams, T.B. Hoey* // *Drones*. – 2020. – Vol. 4, № 55. DOI: 10.3390/drones4030055
11. Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models / *J.J. Yu, D.W. Kim, E.J. Lee, S.W. Son* // *Drones*. – 2020. – Vol. 4, № 49. DOI: 10.3390/drones4030049.
12. Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion / *I. Zapico, J.B. Laronne, L. Sánchez Castillo, J.F. Martín Duque* // *Remote Sens.* – 2021. – Vol. 13.
13. Барановський А.Ю. Використання коптерів на гірничих підприємствах / *А.Ю. Барановський, Р.В. Соболевський* // Тези Всеукраїнської науково-практичної он-лайн конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 10–12 травня 2017 року. – Житомир : Житомирська політехніка, 2020. – С. 199–200.
14. Куніцька М.С. Використання аерофотозйомки в гірничій галузі / *М.С. Куніцька, А.О. Криворучко* // Тези VII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 16–17 квітня 2020 року. – Житомир : Житомирська політехніка, 2020. – С. 23–25.
15. Панасюк А.В. Обґрунтування вибору оптимального приладу БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки / *А.В. Панасюк, Д.С. Поліщук* // *Технічна інженерія*. – 2024. – № 1 (93). – С. 420–427.

#### References:

1. Atik, M.E. and Arkali, M. (2025), «Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production», *Drones*, Vol. 9, No. 15.
2. Jarahizadeh, S. and Salehi, B. (2024), «A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using Agisoft Photoscan, PIX4Mmapper, and DJI Terra», *Sensors*, Vol. 24, No. 286.
3. Lee, S. and Choi, Y. (2016), «Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry», *Geosyst. Eng.*, Vol. 19, pp. 197–204.
4. Liao, X., Xu, Ch. and Yue, H. (2019), «Enable UAVs safely flight in low-altitude: A Preliminary research of the public air route network of UAVs», *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 110–117, doi: 10.1109/icuas.2019.8798083.
5. Hassanalain, M. and Abdelkefi, A. (2017), «Classifications, applications, and design challenges of drones: A review», *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 91, pp. 99–131.
6. Pomortseva, O., Kobzan, S. and Steshenko, P. (2022), «PROCESSING OF GEODESIC DATA OBTAINED WITH THE HELP OF UAVS», *Collection of scientific papers «ΛΟΗΟΣ»*, Boston, USA, pp. 162–165.
7. Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W. et al. (2019), «A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives», *Int J Coal Sci Technol.*, Vol. 6, pp. 320–333.
8. Sánchez-Soriano, J., Rojo-Gala, M.Á., Pérez-Pérez, G. et al. (2024), «Optimized Autonomous Drone Navigation Using Double Deep Q-Learning for Enhanced Real-Time 3D Image Capture», *Drones*, Vol. 8, No. 725.
9. Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P. and Hassanalain, M. (2020), «A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry», *Drones*, Vol. 4, No. 34.
10. Stott, E., Williams, R.D., Hoey, T.B. (2020), «Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry», *Drones*, Vol. 4, No. 55, doi: 10.3390/drones4030055
11. Yu, J.J., Kim, D.W., Lee, E.J. and Son, S.W. (2020), «Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models», *Drones*, Vol. 4, No. 49, doi: 10.3390/drones4030049.
12. Zapico, I., Laronne, J.B., Sánchez Castillo, L. and Martín Duque, J.F. (2021), «Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion», *Remote Sens*, Vol. 13.
13. Baranovskiy, A.Yu. and Cobolevskiy, R.V. (2020), «Vykorystannia kopteriv na hirnychkykh pidpriemstvakh», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii aspirantiv, molodykh uchennykh ta studentiv, prysviachenoi Dniu nauky*, 10–12 travnia 2017 roku, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 199–200.
14. Kunytska, M.S. and Kryvoruchko, A.O. (2020), «Vykorystannia aerofotoziomky v hirnychii haluzi», *Tezy VII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh*, 16–17 kvitnia 2020 roku, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 23–25.
15. Panasiuk, A.V. and Polishchuk, D.S. (2024), «Obgruntuvannia vyboru optymalnogo pryladu BPLA dlia provedennia marksheiderskoi ziomky», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 420–427.

**Поліщук** Дмитро Сергійович – здобувач освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0007-4257-8037>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі.

**Панасюк** Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- оцінка ресурсів.

**Polischuk D.S., Panasiuk A.V.**

**Selection of the optimal UAV georeferencing method to ensure high-precision photogrammetric processing**

In recent years, there has been growing interest in photogrammetric data, specifically surface imaging performed using UAVs. This topic is particularly relevant for mining enterprises that cover large areas. Due to the continuous development of the mining industry and the increasing complexity of technological processes, the importance of remote methods for collecting spatial data – particularly with unmanned aerial vehicles (UAVs) – is steadily increasing.

The use of UAVs in mine surveying is becoming increasingly widespread thanks to their ease of use and ability to deliver accurate data quickly. Under such conditions, selecting an optimal georeferencing approach and planning UAV flight to ensure high-quality imaging becomes especially relevant. Currently, there is no clear comparison of different UAV georeferencing methods for determining precise ground coordinates.

Therefore, research aimed at identifying the most effective georeferencing technique for further photogrammetric processing in Agisoft Metashape is highly relevant. The experiment analyzed how different georeferencing options affect the accuracy of ground coordinate determination, which is critical for geospatial measurements.

The results of this research have practical value for creating topographic bases, as they improve georeferencing accuracy and reduce surveying errors. Rational flight route planning helps optimize costs, reduce human impact on data quality, improve 3D modeling results, and expand the possibilities of UAV application in mining.

Given the above, conducting research to select the most effective approach to UAV georeferencing for topographic mapping work is advisable.

**Keywords:** georeferencing; photogrammetry; unmanned aerial vehicles; Agisoft Metashape; route optimization; aerial photography; 3D modeling.

Стаття надійшла до редакції 07.01.2026.