

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

Державний університет «Житомирська політехніка»

Обґрунтування вибору оптимального приладу БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки

Проведення віддаленої зйомки стає дедалі поширенішим для видобувної галузі, тому вивчення вибору приладу БПЛА є дуже актуальним питанням, що сприятиме підвищенню продуктивності роботи маркшейдерської служби. Метою дослідження є вивчення видів БПЛА, порівняння та вибір оптимального за результатами дослідження. З огляду на зазначене постає питання з вибору типу БПЛА для проведення зйомки у видобувній галузі. На сьогоднішній день немає чіткого порівняння та опису переважаючих видів БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки. Вибір певного типу БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки викликає низку питань, що пов'язані з видом робіт які виконуються, погодними умовами, місцевістю проведення зйомки. Основними методами дослідження є аналіз літератури, метод факторного аналізу, аналіз видів БПЛА для виконання маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА. Зазначене вище допомогло обґрунтувати вибір найкращих приладів для проведення маркшейдерської зйомки. Проведені роботи дозволили визначити оптимальний прилад БПЛА для проведення таких робіт.

Ключові слова: маркшейдерська зйомка; БПЛА; автоматизація.

Актуальність теми. Способи проведення маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА характеризуються дальністю та конфігурацією маршруту польоту, які визначаються метою та особливостями завдання, які стоять перед маркшейдерською службою. Маркшейдерська зйомка може проводитися як для виконання певного завдання, так і для поповнення планової документації.

Безпілотні технології як інструмент виконання інженерних завдань у галузі геодезії щільно зайняли своє місце. Підйом розвитку конструктивних новинок, зменшення розмірів та форм, комплектації які також зазнавали змін, призвело до виникнення класифікації БПЛА, появи різних методик проведення вимірювань залежно від виду виконання необхідного завдання. Процес еволюції використання БПЛА торкнувся майже всіх сфер інженерної справи: від виміру лінійних об'єктів до дендрологічних досліджень лісових масивів. Таким чином, широке розповсюдження безпілотної технології, зокрема в геодезії, не могло оминути маркшейдерську справу.

Під час проведення відкритих гірничих робіт потрібно вирішувати різні маркшейдерські завдання: моніторинг робіт, картування, а також оцінку обсягів гірничих виробок та відвалів. Безпілотні технології незамінні для зйомки копалень, розрізів та кар'єрів, з їх допомогою маркшейдерські роботи виконуються з мінімальними затратами на польові роботи, але необхідні специфічні навички та знання для виконання камеральної процедури обробки отриманих даних.

В організаційному плані проведення маркшейдерських зйомок за допомогою БПЛА вимагає відповідних умінь та навичок маркшейдерської служби. Зокрема, поряд з досконалими знаннями роботи БПЛА та навичками управління ними вимагається володіння методикою оцінки технічних характеристик БПЛА щодо можливостей його застосування для виконання поставленого завдання та володіння методикою розробки маршруту і програми маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА з обчисленням необхідних затрат часу та енергетичних ресурсів. Умови виконання завдання можуть бути ускладнені природно-кліматичними факторами – опади, вітер, низька температура. Під час підготовки та проведення маркшейдерської зйомки основна проблема полягає у виборі БПЛА, технічні можливості якого задовольняють вимогам завдання. Оптико-електронна система БПЛА при заданій висоті польоту має забезпечувати достатню роздільну здатність фото- та відеоматеріалів.

Використання безпілотних літальних апаратів для вирішення геодезичних завдань дозволить виконувати більший спектр завдань у стислі терміни та з меншим ризиком для виконавців. Сьогодні існує велика кількість геодезичних робіт, які є терміновими, але займають надто багато часу. Це може бути пов'язано як з обсягом робіт, так і з важкодоступністю об'єкта, використання безпілотних літальних апаратів під час польових топографо-геодезичних досліджень значно скорочує час та вартість робіт [3].

Зважаючи на вказане вище, можемо зробити висновок, що застосування БПЛА збільшать продуктивність проведення маркшейдерських зйомок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Останнім часом гірничодобувна промисловість виявила підвищений інтерес до використання безпілотних літальних апаратів для рутинних робіт на різноманітних гірничодобувних підприємствах [2].

Запіко та Ларонн заявляли, що проведення топографічних зйомок на діючих підприємствах є складним завданням через поточні роботи та небезпеки, які піддаються постійним та активним переміщенням мас [6].

За результатами робіт Шахмораді та Роганчі, Расела та Падро можемо скласти перелік характеристик, які безпосередньо впливають на проведення маркшейдерських робіт, що наведено на рисунку 1.

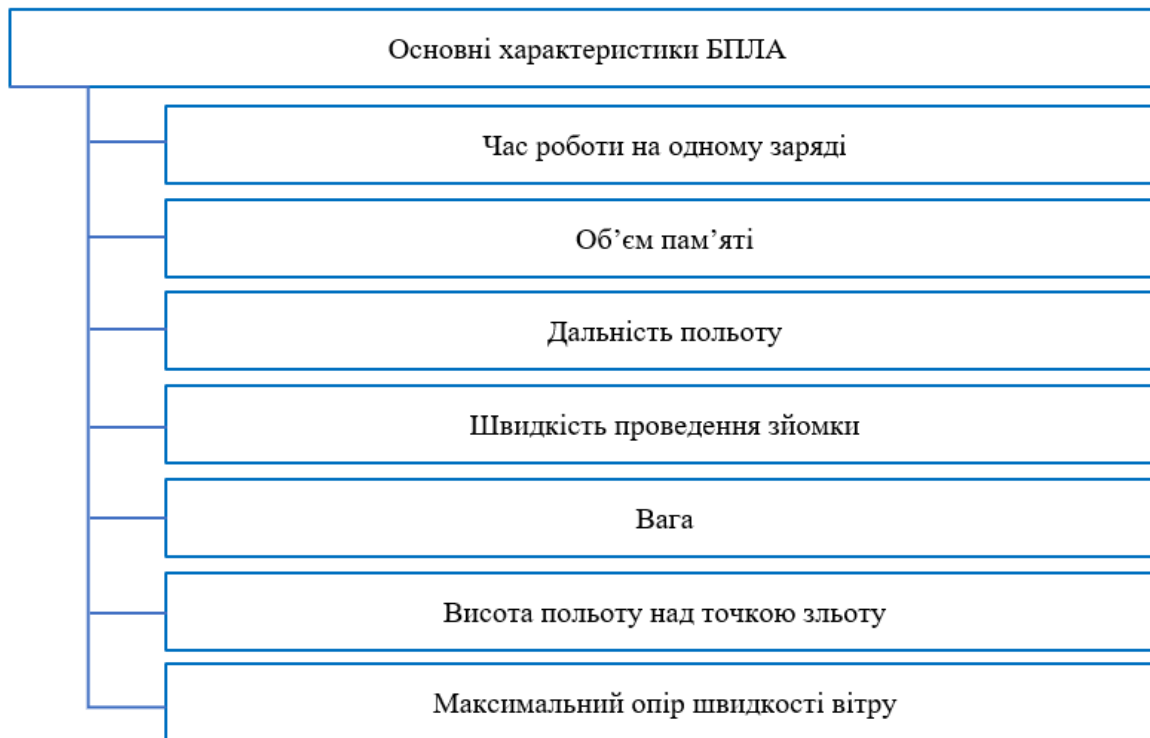


Рис. 1. Перелік основних характеристик БПЛА

Шахмораді та Роганчі провели низку досліджень з можливості застосування БПЛА у гірничодобувній промисловості, за результатами досліджень сформувавши перелік пунктів застосування БПЛА залежно від напрямів (табл. 1) [4].

Таблиця 1

Застосування БПЛА в гірничій справі залежно від напрямку виконуваних робіт [4]

Напрямок використання 1	Цілі 2
Безпека та управління ризиками	<ul style="list-style-type: none"> • Прогноз падіння, моніторинг стабільності. • Виявлення ерозії. • Розташування об'єкта. • Оцінка збитків. • Моніторинг інцидентів
Розпорядок дня та контроль	<ul style="list-style-type: none"> • Регулярне обстеження безпеки на місці. • Планування управління. • Безпека та захист об'єкта
Щомісячні процедури	<ul style="list-style-type: none"> • Картографування важкодоступних територій. • Управління межами
Стратегічне планування	<ul style="list-style-type: none"> • Конструкція кар'єру та майданчика для обслуговування. • Проектування доріг. • Оцінка схилу. • Розвідка корисних копалин

1	2
Фінансовий	<ul style="list-style-type: none"> Об'ємний розрахунок запасів Розрахунок мобільних і статичних ресурсів
Юридичний	<ul style="list-style-type: none"> Дані про межі. Збір даних про інцидент
Екологічний	<ul style="list-style-type: none"> Виявлення витoku води. Заростання рослинності. Управління та оцінка хвостосховищ
Інфраструктура	<ul style="list-style-type: none"> Умова колії та доступу. Водозбір, дренаж, гідрологія. Перевірка трубопроводу. Конструкція майданчика для обслуговування, зміни та ерозія

Сучасні технології проведення маркшейдерських зйомок базуються саме на застосуванні матеріалів цифрового аерознімання, однак собівартість застосування літаків та гелікоптерів для локального великомасштабного знімання є високою. Тому альтернативним рішенням є використання для вказаних вище цілей БПЛА, які є однією з найбільш інтенсивно розвинутих областей авіаційної техніки. Застосування БПЛА дасть змогу без проблем знімати важкодоступні території, отримуючи високу точність визначення просторових координат точок об'єктів. При цьому будуть незначні витрати, а застосовуючи цифровий метод, реально оперативно скласти великомасштабні топографічні плани в камеральних умовах.

Зважаючи на зазначене вище, буде доцільно провести дослідження з визначення певного виду та моделі такого виду БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки.

Метою статті є дослідження з визначення оптимального приладу БПЛА для проведення маркшейдерських зйомок.

Викладення основного матеріалу. Аерофотознімання є одним з найбільш ефективних та продуктивних методів збору просторової інформації з поверхні Землі. Отримані за допомогою БПЛА цифрові дані стають основою для створення топографічних планів і карт, містобудівної документації, а також цифрових моделей місцевості та рельєфу. Аерофотознімання за допомогою БПЛА дозволяє охоплювати значні площі й отримувати знімки високої точності та якості для створення на їх основі деталізованих ортофотопланів земної поверхні.

На сьогоднішній день є дуже багато засобів проведення дистанційних вимірювань. У цій роботі було розглянуто засоби дистанційного вимірювання такі як БПЛА, а саме виконано порівняння основних видів БПЛА:

- БПЛА літакового типу;
- квадрокоптер.

За результатами теоретичних досліджень було визначено головних представників цих груп БПЛА:

- БПЛА літакового типу – Trimble UX-5, eBee-X;
- квадрокоптер – DJI Phantom 4 Pro, md4-3000.

Для проведення дослідження було розглянуто декілька БПЛА для зйомки поверхні та їх загальні характеристики (табл. 2).

Таблиця 2

Загальні характеристики БПЛА, що порівнюються

Тип БПЛА	Модель	Компанія	Розмах крил (мм)	Вага (г)	Витривалість (хв)	Швидкість руху (м/с)
БПЛА літакового типу	eBee-X	Sensefly	1160	1400	90	11
БПЛА літакового типу	Trimble UX5	Trimble	1000	2500	50	22
Квадрокоптер	md4-3000	Microdrones	2052	6000	45	12
Квадрокоптер	DJI Phantom 4 Pro	Propeller Aero, 3D Robotics	350	1388	30	20

За даними з таблиці 3 можемо зробити висновок, що кожен з вказаних БПЛА має функціональні відмінності. Тому при виборі конкретного БПЛА потрібно провести порівняння основних показників БПЛА, а саме головних характеристик, які зазначені на рисунку 1. Таке порівняння наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Основні показники порівнювальних БПЛА (відповідно до рис. 1)

Модель БПЛА	Час роботи на одному заряді (хв)	Об'єм підтримуваної пам'яті (ГБ)	Дальність польоту (м)	Швидкість проведення зйомки (км/год)	Вага (г)	Висота польоту над точкою зльоту (м)	Максимальний опір швидкості вітру (м/с)
eBee-X [8]	90	192	8000	40	1400	1000	12
Trimble UX5 [10]	50	128	5000	79	2500	750	18
md4-3000 [9]	45	128	2500	43	6000	200	5
DJI Phantom 4 Pro [11]	30	160	5000	72	1388	500	10

За даними таблиці 3 проведемо порівняння кожної з характеристик для запропонованих моделей БПЛА, які зображено на рисунках 3–9.

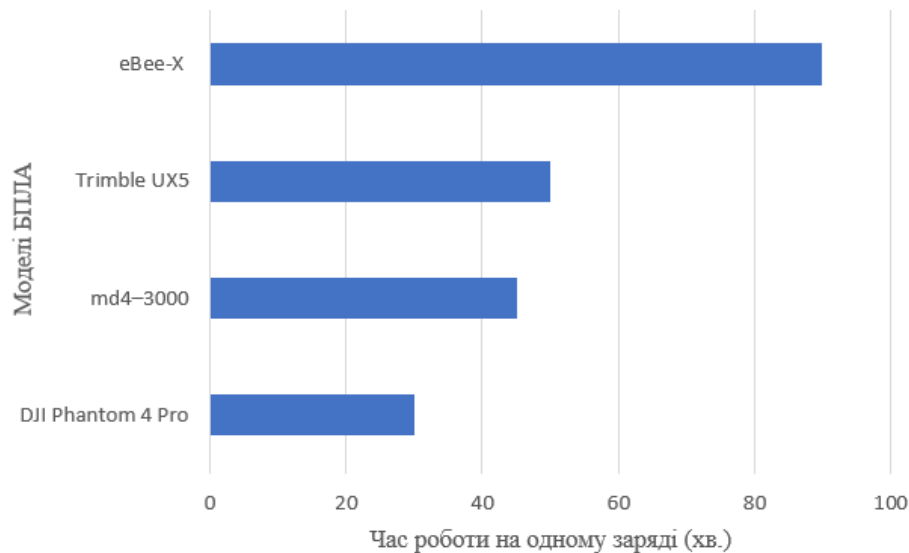


Рис. 3. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за часом роботи на одному заряді

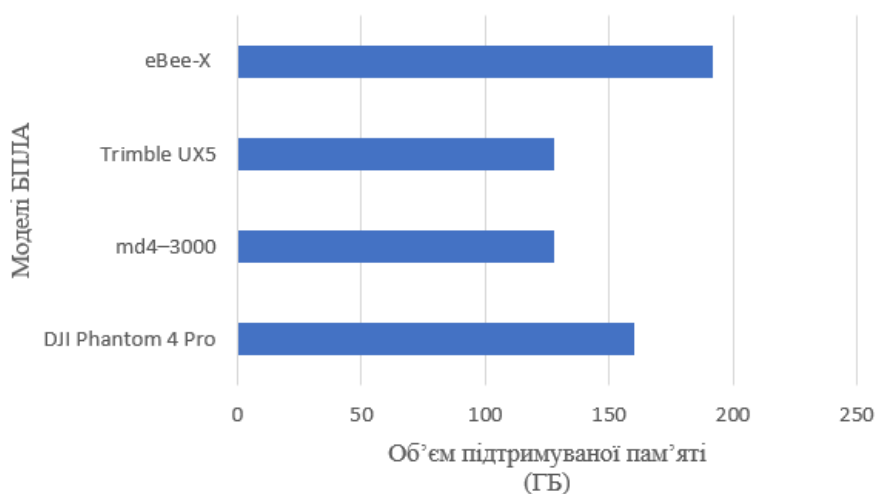


Рис. 4. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за дальністю польоту

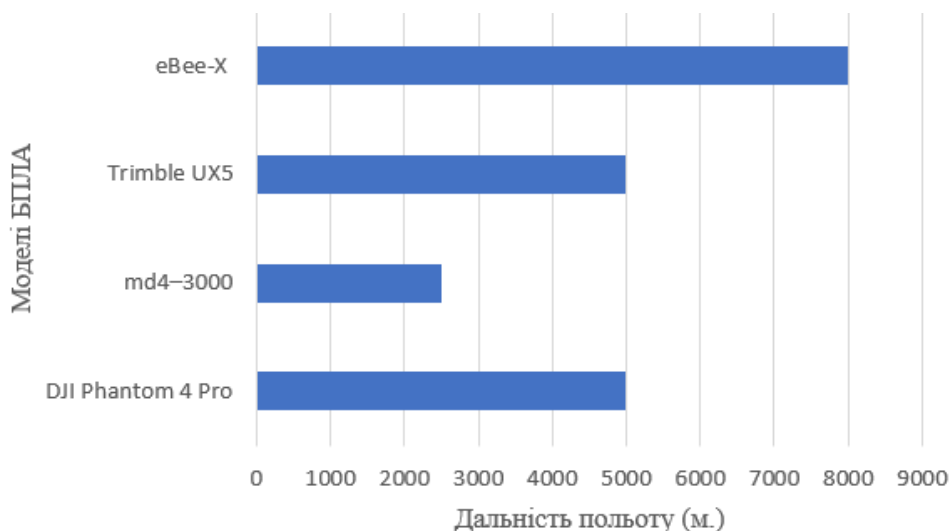


Рис. 5. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за дальністю польоту

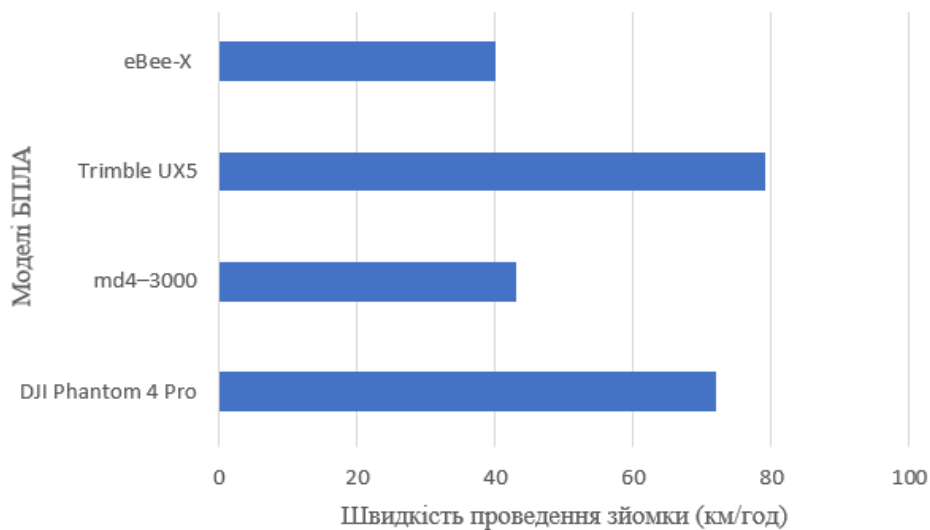


Рис. 6. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за швидкістю проведення зйомки

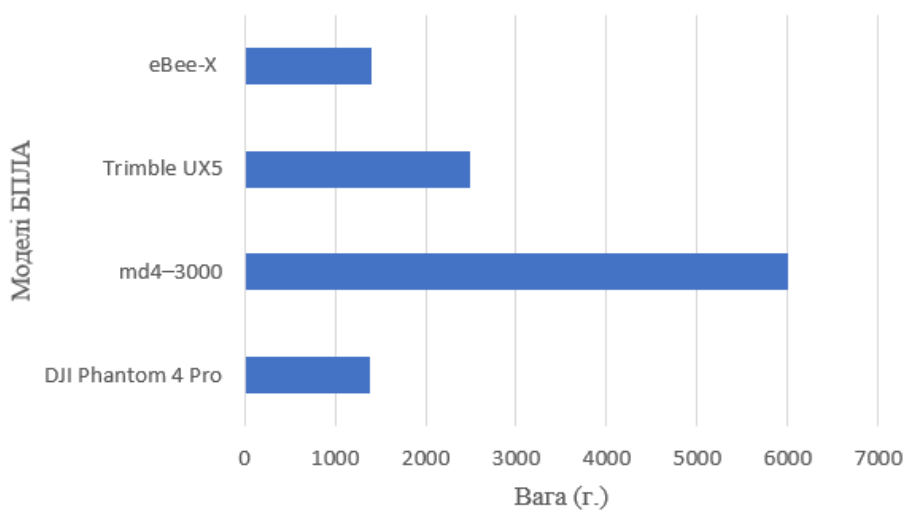


Рис. 7. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за вагою

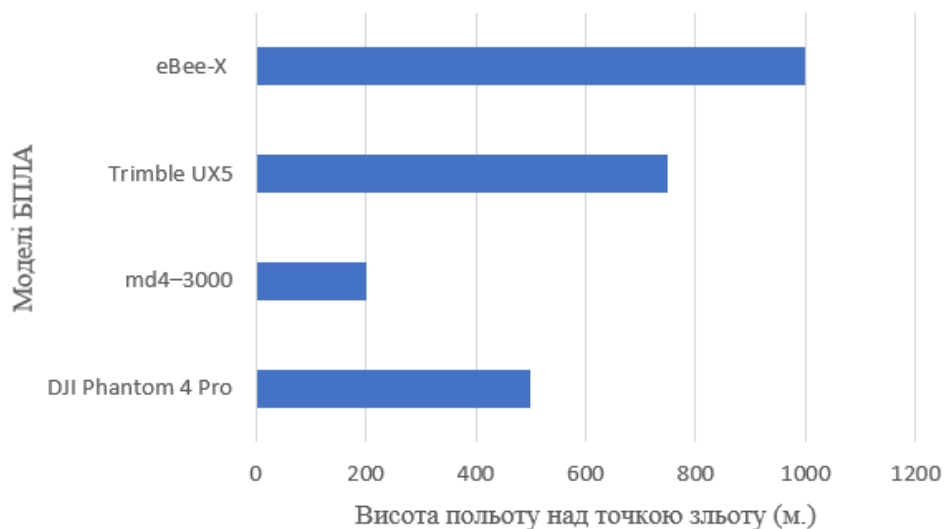


Рис. 8. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за висотою польоту над точкою зльоту

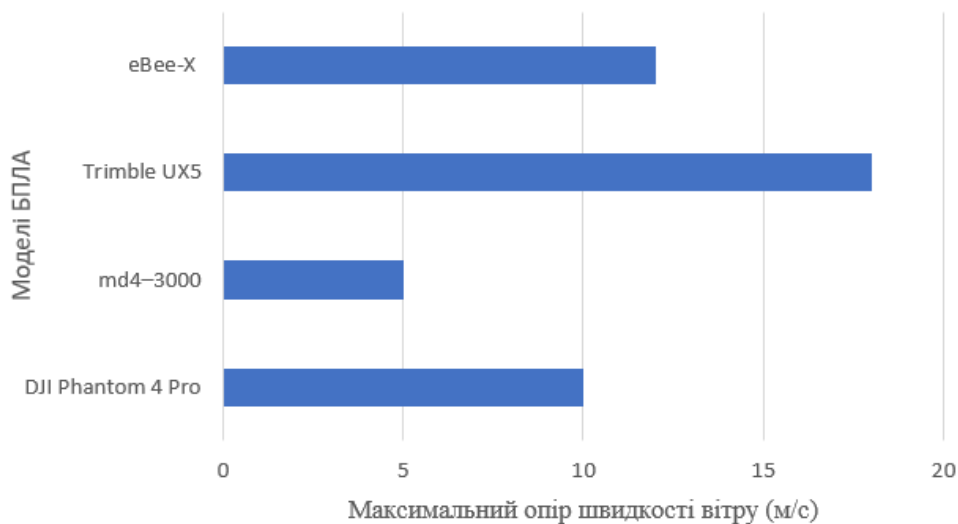


Рис. 9. Порівняння запропонованих моделей БПЛА за максимальним опором вітру

За результатами проведеного порівняння можемо зробити висновок, що для чотирьох з семи порівнюваних показників перше місце займає eBee-X, наступне місце займає Trimble UX5, який посідає першу позицію в двох з семи порівнюваних показників. У результаті чого можемо зробити висновок, що для певних поставлених завдань можемо вибрати певну модель БПЛА. Для проведення комплексної оцінки кожної моделі БПЛА виразимо значення таблиці 3 у відсотках, для цього для кожного досліджуваного показника вибираємо еталонне значення (найкраще для проведення маркшейдерської зйомки), а інші виражаємо відносно цієї величини та знаходимо середні за відсотками, що зазначено в таблиці 4.

Таблиця 4

Основні показники порівнювальних БПЛА, виражені у відсотках

Модель БПЛА	Час роботи на одному заряді (хв)	Об'єм підтримуваної пам'яті (ГБ)	Дальність польоту (м)	Швидкість проведення зйомки (км/год)	Вага (г)	Висота польоту над точкою зльоту (м)	Максимальний опір швидкості вітру (м/с)	Середні показники розрахованих відсотків
eBee-X	100	100	100	50,63	99,14	100	66,67	87
Trimble UX5	55,56	66,67	62,50	100,00	55,52	75,00	100	74
md4-3000	50,00	66,67	31,25	54,43	23,13	20,00	27,78	39
DJI Phantom 4 Pro	33,33	83,33	62,50	91,14	100,00	50,00	55,56	70

За даними таблиці 4 виконаємо порівняння основних показників, які зображено на рисунку 10.

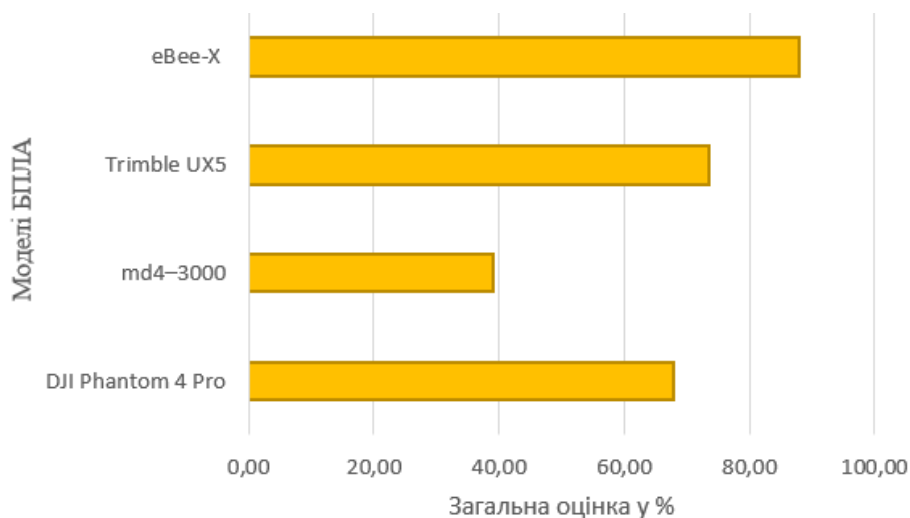


Рис. 10. Порівняння середніх значень основних показників

За результатами рисунків можемо зробити висновок, що найкращим БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки є eBee-X, наступним буде Trimble UX5. З огляду на те, що даний вид БПЛА належить до літакового типу, для його запуску додатково потрібна катапульта. Зважаючи на зазначене вище, для проведення маркшейдерської зйомки на обмежених територіях може бути рекомендованим до застосування DJI Phantom 4 Pro.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами дослідження було проведено порівняння чотирьох видів безпілотних літальних апаратів для маркшейдерської зйомки: два з яких літакового типу, а інші два – квадрокоптери. У процесі порівняння характеристик БПЛА було використано відсоткові показники, де еталонне значення було вибрано для проведення зйомок, а інші характеристики виражені відносно нього. В результаті порівняння було знайдено середні показники для кожного виду досліджуваних БПЛА. Згідно з результатами дослідження, всі варіанти БПЛА доцільно використовувати для проведення маркшейдерської зйомки. Проте для підвищення ефективності зйомок рекомендується використовувати такі БПЛА залежно від умов місцевості, а саме: eBee-X – для місцевості, де є можливість встановити катапульта для запуску БПЛА, оскільки цей апарат належить до літакового типу і має відповідні характеристики для ефективної зйомки на великих площах; DJI Phantom 4 Pro – для місцевості, де встановлення катапульти неможливе. Цей квадрокоптер забезпечує високу маневреність і зручність використання в обмежених умовах, що робить його оптимальним вибором для таких ситуацій. Таким чином, залежно від умов місцевості та можливостей запуску можна вибрати найбільш ефективний тип БПЛА для маркшейдерської зйомки, що забезпечить високу якість та точність отриманих даних.

Подальші дослідження у сфері використання БПЛА для проведення маркшейдерської зйомки є досить широкими, однак посилену увагу треба звернути на такі напрями: включення у дослідження інших моделей БПЛА, як літакового типу, так і мультикоптерів, для більш повного порівняння та аналізу їх характеристик, дослідження нових моделей, що з'являються на ринку, з урахуванням останніх технологічних досягнень, покращення програмного забезпечення та алгоритмів обробки даних, розробка методик для підвищення точності геодезичних вимірювань, враховуючи покращення систем навігації та стабілізації БПЛА, впровадження гібридних моделей БПЛА, які можуть поєднувати переваги літакового типу та мультикоптерів.

Список використаної літератури:

1. *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. – P. 286.
2. *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.
3. *Pomortseva O.* Processing of geodesic data obtained with the help of UAVS / *O.Pomortseva, S.Kobzan, P.Steshenko* // *Collection of scientific papers «ЛОГОС»*. – Boston, USA, 2022. – September 16. – P. 162–165.
4. *A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry* / *J.Shahmoradi, E.Talebi, P.Roghanchi, M.Hassanalian* // *Drones*. – 2020. – Vol. 4. – P. 34.

5. Староверов В. Визначення параметрів леп за допомогою БПЛА з технологією лідарного сканування / В. Староверов, Д. Гаїкін // Містобудування та територіальне планування. – 2020. – Vol. 72. – P. 242–251.
6. 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. – № 13. – P. 3353. DOI: 10.3390/rs13173353.
7. Андреев С.М. Методика застосування бібліотек комп'ютерного зору для побудови картографічних моделей / С.М. Андреев, В.А. Жилін, А.С. Топчий // Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. – Полтава : Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, 2018. – Вип. 1 (47). – С. 3–7.
8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ageagle.com/drones/ebee-x/>.
9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://avia.pro/blog/ritu-md4-3000-tehnicheskie-harakteristiki-foto>.
10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://trimble.org.ua/trimble-ux5-/-ux5-hp.html>.
11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>.

References:

1. Jarahizadeh, S. and Salehi, B. (2024), «A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using Agisoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra», *Sensors*, Vol. 24, p. 286.
2. 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.
3. Pomortseva, O., Kobzan, S. and Steshenko, P. (2022), «Processing of geodesic data obtained with the help of UAVs», *Collection of scientific papers «АГОС»*, September 16, Boston, USA, pp. 162–165.
4. Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P. and Hassanalian, M. (2020), «A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry», *Drones*, Vol. 4, p. 34.
5. Staroverov, V. and Naikin, D. (2020), «Vyznachennia parametriv LEP za dopomohoiu BPLA z tekhnolohiieiu lidarnoho skanuvannia», *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, Vol. 72, pp. 242–251.
6. 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, p. 3353, doi: 10.3390/rs13173353.
7. Andriiev, S.M., Zhilin, V.A. and Topchyi, A.S. (2018), «Metodyka zastosuvannia bibliotek kompiuternoho zoru dlia pobudovy kartohrafichnykh modelei», *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, zbirnyk naukovykh prats, Poltavskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet im. Yurii Kondratiuka, Poltava, Vol. 1 (47), P. 3–7.
8. [Online], available at: <https://ageagle.com/drones/ebee-x/>
9. [Online], available at: <https://avia.pro/blog/ritu-md4-3000-tehnicheskie-harakteristiki-foto>
10. [Online], available at: <https://trimble.org.ua/trimble-ux5-/-ux5-hp.html>
11. [Online], available at: <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>

Полищук 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.

Justification for choosing the optimal UAV device for surveying

Remote survey is becoming increasingly common for the mining industry, so studying the choice of a UAV device is a very relevant issue, which will help increase the productivity of the survey service. The aim of the study is to study UAV species, compare species, and choose the optimal one based on the results of the study. Considering the above-mentioned, there is a question of choosing the type of UAV to conduct surveys in the mining industry. To date, there is no clear comparison and description of the predominant types of UAVs for surveying. The choice of a certain type of UAV for surveying raises a number of questions related to the type of work performed, weather conditions, and the terrain of the survey. The main research methods are literature analysis, factor analysis method, analysis of UAV types for performing survey using UAVs. The above helped to justify the best devices for conducting surveying. The work carried out made it possible to determine the optimal UAV device for carrying out these works.

Keywords: surveying; UAVs; automation.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2024.