УДК 528.8:629.735.015:004.932

Т. М. Кравець

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА МАТЕРІАЛАМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З БпЛА

Анотація. *Розглянуто методичні засади оцінювання позиційної точності координат наземних об'єктів, отриманих за матеріалами знімання з безпілотних літальних апаратів. Визначено основні джерела невизначеності, порядок незалежної перевірки та показники подання результатів. Робота має методичний характер і не містить результатів власних польових вимірювань.*

Ключові слова: *БпЛА, координати, позиційна точність, фотограмметрія, контрольні точки.*

Abstract. *The paper addresses methodological principles for assessing the positional accuracy of ground-object coordinates derived from unmanned aerial vehicle imagery. Major uncertainty sources, independent validation procedures, and accuracy-reporting metrics are considered. The study is methodological and does not present original field measurements.*

Keywords: *UAV, coordinates, positional accuracy, photogrammetry, checkpoints.*

Постановка проблеми.

Матеріали спостереження з БпЛА широко застосовують для створення ортофотопланів, цифрових моделей поверхні та визначення просторового положення наземних об'єктів. Висока роздільна здатність зображення, однак, не є безпосереднім підтвердженням високої координатної точності. Геометричні спотворення, параметри орієнтування знімків, характеристики рельєфу та похибки опорної геодезичної інформації можуть формувати систематичні й випадкові відхилення. Тому якість координат потребує окремої кількісної перевірки [1-3].

Мета роботи – систематизувати джерела похибок визначення координат наземних об'єктів за матеріалами знімання з БпЛА та запропонувати послідовність їх незалежного оцінювання відповідно до сучасних підходів контролю геопросторових даних.

Основний матеріал.

Позиційну точність слід розглядати як ступінь відповідності отриманих координат незалежним еталонним значенням у визначеній системі координат. На результат впливають точність геоприв'язки знімків, калібрування камери, якість фотограмметричного узгодження, геометрія знімання, рельєф і коректність ідентифікації об'єкта. Окремого контролю потребують система відліку, проєкція координат і висотна основа: помилки їх узгодження можуть маскуватися під похибки вимірювань.

Необхідно розрізняти опорні точки, які використовують для побудови або коригування моделі, і незалежні контрольні точки, які не беруть участі в її налаштуванні. Оцінювання за тими самими точками, що використовувалися для геоприв'язки, не забезпечує незалежної характеристики точності кінцевого продукту. Контрольні точки доцільно розміщувати в різних частинах території та на ділянках з відмінними характеристиками поверхні; їхні координати мають визначатися способом, точність якого відповідає меті перевірки [1, 2].

Для кожної контрольної точки і обчислюють різниці координат $\Delta E_i = E_i - E_i^{\text{o}}$ та $\Delta N_i = N_i - N_i^{\text{o}}$, де E_i, N_i – координати за матеріалами БпЛА, а E_i^{o}, N_i^{o} – незалежні еталонні координати. Середньоквадратичні відхилення за осями визначають як $RMSE_E = \sqrt{[\Sigma(\Delta E_i)^2/n]}$ та $RMSE_N = \sqrt{[\Sigma(\Delta N_i)^2/n]}$. Горизонтальний показник $RMSE_H = \sqrt{(RMSE_E^2 + RMSE_N^2)}$ характеризує сукупну величину планових відхилень. Якщо визначають висоти, додатково розраховують RMSE_Z за різницями висотних координат.

Окрім RMSE, доцільно повідомляти середні знакові відхилення за осями, найбільші абсолютні відхилення, чисельність контрольної вибірки та характер просторового розподілу помилок. Середні знакові відхилення допомагають виявляти можливе систематичне зміщення, тоді як RMSE відображає загальний рівень відхилень і чутливий до великих помилок. Змішувати планові та висотні показники в одне значення без пояснення методики не слід.

Методичні вимоги до перевірки. Запропоновано послідовність оцінювання: (1) зафіксувати систему координат, проєкцію та висотну основу; (2) документувати джерела знімків, геоприв'язку й спосіб отримання координат; (3) сформувати незалежну вибірку чітко

ідентифікованих контрольних точок; (4) обчислити різниці координат і показники RMSE за складовими; (5) перевірити просторові закономірності та систематичні зміщення; (6) подати кількість точок, їх розподіл, точність еталонних вимірювань і обмеження застосовності результатів. Важливо враховувати невизначеність самих контрольних координат. Стандарт ASPRS 2024 передбачає врахування похибок контрольних вимірювань у підсумковому оцінюванні позиційної точності геопросторового продукту та встановлює вимоги до незалежних контрольних точок [1]. Це унеможливлює некритичне трактування розбіжностей як похибок виключно фотограмметричної моделі.

Обговорення.

Результати досліджень із застосуванням RTK/PPK підтверджують, що точність геоприв'язки залежить від способу обробки й конфігурації опорних даних [3, 4]. Водночас наведені в літературі числові показники не можна автоматично переносити на іншу територію, апаратуру чи тип наземних об'єктів. Визначення координат окремого об'єкта за зображенням потребує також оцінювання неоднозначності вибору його характерної точки, що не тотожне точності ортофотоплану загалом. Для підвищення інформативності підсумкового звіту пропонується відокремлювати оцінювання точності геопросторового продукту від оцінювання координат конкретних об'єктів. У першому випадку контрольні точки характеризують якість ортофотоплану або моделі поверхні на всій території. У другому до похибок геоприв'язки додається невизначеність розпізнавання контуру й вибору репрезентативної точки об'єкта. Для об'єктів із нечіткими межами доцільно описувати правило визначення координат, щоб інші дослідники могли повторити вимірювання. Під час порівняння різних способів обробки необхідно використовувати однакові незалежні контрольні дані й однакову систему координат. Такий підхід дає змогу відокремити вплив методики обробки від впливу умов вимірювання та уникнути некоректних порівнянь. Якщо кількість контрольних точок обмежена, це слід прямо зазначити як обмеження статистичної надійності оцінки, а не компенсувати необґрунтованими узагальненнями.

Висновки. Обґрунтовано необхідність незалежного оцінювання точності координат наземних об'єктів, визначених за матеріалами спостереження з БпЛА. Запропоновано методичну послідовність, що поєднує перевірку систем координат, використання незалежних контрольних точок, обчислення планових і висотних RMSE та аналіз систематичних зміщень. Підкреслено, що просторова роздільна здатність зображень і внутрішні залишкові похибки фотограмметричної обробки не замінюють незалежної перевірки. Подальші дослідження мають передбачати польове випробування запропонованого підходу на документованій вибірці контрольних точок.

Список використаних джерел:

1. ASPRS. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Edition 2, Version 2. 2024. URL: https://www.asprs.org/Main/Main/Standards/Positional-Accuracy-Standards.aspx.
2. U.S. Geological Survey. Guidelines for calibration of uncrewed aircraft systems imagery. Open-File Report 2023–1033. 2023. URL: https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20231033/full.
3. Niu Z., Xia H., Tao P., Ke T. Accuracy Assessment of UAV Photogrammetry System with RTK Measurements for Direct Georeferencing. ISPRS Annals. 2024. Vol. X-1-2024. P. 169–176. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-1-2024-169-2024.
4. Türk T., Tunalioglu N., Erdogan B., Ocalan T., Gurturk M. Accuracy assessment of UAV-post-processing kinematic (PPK) and UAV-traditional (with ground control points) georeferencing methods. Environmental Monitoring and Assessment. 2022. Vol. 194. Art. 476. DOI: 10.1007/s10661-022-10170-0.

Кравець Тарас Мирославович *– кандидат географічних наук, доцент кафедри артилерійської розвідки, Національна академія сухопутних військ, м. Львів, Україна. E-mail: taras-kravets@ukr.net. ORCID: 0000-0001-5398-7441.*

Taras M. Kravets *– PhD in Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Artillery Reconnaissance, National Army Academy, Lviv, Ukraine. E-mail: taras-kravets@ukr.net. ORCID: 0000-0001-5398-7441.*