

КАРТОГРАФІЯ І АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

УДК 528.92

Б. В. ЧЕТВЕРІКОВ, Л. В. БАБІЙ, М. Т. ПРОЦИК, Т. Я. ІЛЬКІВ

Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Інститут геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(063)1671585, ел. пошта: chetverikov@email.ua

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.065>

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ЦМР ОРТОТРАНСФОРМУВАННЯ АЕРОЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ БПЛА НА ГІРСЬКУ ЛОКАЛЬНУ ЧАСТИНИ СМТ. СХІДНИЦЯ

Запропоновано методику визначення реальної величини висотної похибки ортотрансформування аерознімків, отриманих з БПЛА на гірську місцевість. Створено локальний тестовий майданчик на горі в смт. Східниця розміром приблизно 70х60 метрів, що входить у створене загальне аерознімання. Тут виконано додаткове ГНСС-знімання і створено мережу точок з координатами через кожен метр. Отриманий ортотрансформований знімок з картою висот за даними аерознімання всієї Східниці і результатами ГНСС-знімання через кожні 50 метрів відкрито в програмному забезпеченні ArcGIS. На аерознімок нанесено шар точок локальної ділянки і порівняно з координатами тих самих точок, отриманих з карти висот. Порівнюючи висотні показники 87 точок на схилі гори в смт. Східниця, отримані за допомогою ГНСС-знімання, з висотними показниками тих самих точок, взятих з карти висот, створеної за даними аерознімання з безпілотного літального апарата, визначено, що висотні показники точок не дуже відрізняються. Середня квадратична похибка становить 0,39 м. Запропоновано методику порівняння висотних показників точок місцевості, отриманих різними методами для визначення величини похибки ортотрансформування аерознімків, отриманих з БПЛА на гірську локальну ділянку смт. Східниця.

Ключові слова: ортотрансформування, ортофотоплан, аерознімання, БПЛА, ГНСС-знімання, визначення величини похибки.

Вступ

У сучасному світі все частіше для вирішення цивільних завдань моніторингу території з повітря, в картографії й аерофотозніманні для створення топографічних карт застосовують надлегкі безпілотні літальні апарати (БПЛА), різні за типом, розміром і встановленим обладнанням. Безпілотні апарати дають змогу фахівцям створити в найкоротші терміни ортофотоплани, матриці висот місцевості та окремих об'єктів. Картографія потребує максимально точних даних і високоякісних знімків, які отримують БПЛА завдяки вдосконаленому цільовому навантаженню на електромагнітному підвісі із забезпеченим стабілізованим встановленням камер незалежно від поривів вітру та інших чинників. Але наскільки відрізняється реальна точність просторових координат певної локальної ділянки гірської території, що входить в створений загальний

ортофотоплан? На скільки відрізняється реальна локальна ЦМР, побудована за допомогою ГНСС-знімання від ЦМР, що створена за допомогою матриці висот з матеріалів аерознімання? Як відомо, масштаб ортофотоплану, що створюється, залежить від фокусної відстані та висоти польоту БПЛА. Теоретично, за показниками нашого знімання можна побудувати ортофотоплан масштабу 1:2000. Але як саме впливають на ортотрансформування великі перепади висот в гірській місцевості за порівняно невеликої висоти знімання (500 м)? На ці питання і спробуємо знайти відповіді.

Цю тематику досліджувала велика кількість вчених і в Україні, і за кордоном. В Україні відомо праці з оцінювання точності ортофотопланів з БПЛА таких вчених, як В. М. Глотова, А. Л. Церклевича, В. Б. Колесніченка, О. В. Прохарчука, В. Галецького та інших [Vovk, та ін., 2015; Galetsky, 2012]. Подібну до

нашої методу в своїх працях описують закордонні вчені Р. Barry, R. Coakley, J. Goncalves, R. Henrikues, Chris Cryderman, S. Bill Mah, Aaron Shufletoski та ін. [Cryderman, et al., 2014; Barba, 2019; Agüera-Vega, et al., 2017; James, et al., 2017; Goncalves, & Henrikues, 2015; Barry, & Coakley, 2013].

Запропонована методика відрізняється від праць перелічених вище вчених тим, що наша дослідна ділянка не містить жодної опорної точки, яка б брала участь у загальному трансформуванні ортофотоплану. Зв'язок дослідної території з фрагментом з ортофотоплану встановлено, використовуючи можливості геоінформаційного аналізу.

Східниця (українська: Східниця, польська: Schodnica) – селище міського типу у Львівській області, Західна Україна. Населення: 2255 осіб (оцінка 2016 року)

Східниця розташована на висоті 600–900 м над рівнем моря. Гори навколо міста досягають висоти 823 м.

Відстань до обласного центру Львова становить 102 км, до Борислава – 14 км, а до Дрогобича – 25 км.



Рис. 1. Територія досліджень на карті

Поселення Східниця вперше згадано у документах XV століття (<http://www.shidnitca.com>).

Селище міського типу відоме своїми родовищами мінеральних вод. Сьогодні існує 38 джерел та 17 свердловин із різним хімічним складом мінеральної води (рис. 1).



Рис. 2. Локальний полігон досліджень

Дослідна ділянка знаходиться на горі в західній частині Східниці. Ділянка є “відкритою” (незалісненою) і має площу 0,9 га. У верхній частині ділянки розташовані дві вежі мобільного зв'язку. Перепад висот ділянки становить 25 м (рис. 2).

Мета

Мета роботи – оцінити величину висотної похибки ортотрансформування аерознімків, отриманих із беспілотного літального апарата на гірську ділянку смт. Східниця за допомогою додаткової мережі точок ГНСС-знімання.

Завдання роботи – проаналізувати різниці висот точок, отриманих за допомогою карти висот із БПЛА і даних ГНСС-знімання та оцінити розходження реальних координат опорних точок із їхніми координатами на ортофотоплані.

Методологія

Для реалізації поставленого завдання запропоновано технологічну схему, яку покроково реалізовано (рис. 5).

Аерознімання виконав у 2018 році проф. В. М. Глотов разом із спеціалістами української фірми Abri DG під час студентської практики з безпілотного літального апарата Agrow, з висоти польоту 500 м (Hlotov, et al., 2017). Внаслідок аерознімання отримано 400 знімків, опрацьованих в ПП Agisoft PhotoScan та прив'язаних за 94 опорними точками, отриманими за допомогою GPS (рис. 3). Кінцевим результатом отримано ортофотоплан території та карту висот. Потрібно наголосити, що 94 опорні точки використовували для створення ортофотоплану всієї Східниці, а не тільки нашої дослідної ділянки, детальніше про яку описано нижче.

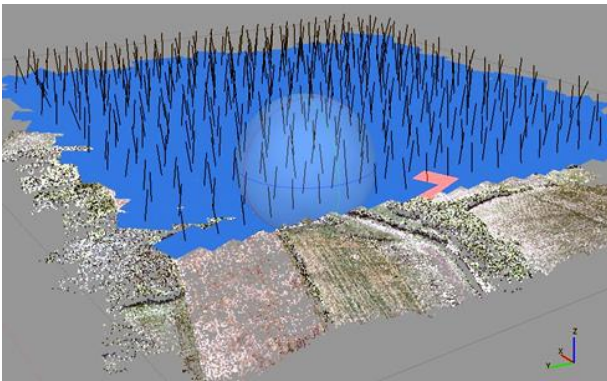


Рис. 3. Процес створення ортофотоплану в програмному забезпеченні Agisoft PhotoScan

Під час ГНСС-знімання координування точок відбувалося у режимі реального часу (RTK) двочастотними ГНСС-приймачами Trimble R7, Leica GX1230GG та South S82-2013. Знімання виконували від мережі референцних станцій (CORS) GeoTerrace, що належить Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка” (рис. 4). Найближчими до об'єкта знімання були референцні станції SKOL, SAMB та STRY, розташовані на відстанях 25 км, 34 км та 36 км відповідно. Точність визначення планових координат опорних точок становила 5 см, а висотного положення – 7 см.

Вхідні дані для виконання дослідження – матриця висот рельєфу, сформована під час створення ортофотоплану (Cryderman, et al., 2014; Barba, 2019; Agüera-Vega, et al., 2017; James, et al., 2017; Goncalves, & Henrikues, 2015;

Barry, & Coakley, 2013) та каталог координат контрольних точок на дослідницький полігон (рис. 6, 7).

Контрольні точки, яких було 87, що отримані за допомогою ГНСС-знімання, тільки на дослідній ділянці є цілком незалежними і не використовувалися в ортотрансформуванні аерознімків і створенні карти висот.

На рис. 8 подано нанесені контрольні точки, отримані ГНСС-методом, на фрагмент ортофотоплану полігону досліджень.

Оскільки ділянка досліджень повністю вкрита рослинністю і не містить якихось чітких контурів, щоб можна було ідентифікувати точки, отримані за допомогою ГНСС-знімання, виникла проблема можливого зміщення в їх планових координатах (Zhang, et al., 2017).

Для того, щоб усунути ці зміщення, вирішено скористатись методикою, запропонованою І. З. Колбом у статті (Kolb, et al., 2013). Суть полягає в тому, щоб побудувати для ЦМР (у нашому випадку за допомогою ArcGIS) отримані за двома методами карти ліній течій і за спільними точками розгалужень переприв'язати дані (рис. 9, 10). Ці карти необхідні, щоб зв'язати цифрову модель рельєфу, побудовану за даними аерознімання із цифровою моделлю рельєфу, побудованою за додатковими точками ГНСС-знімання для дослідної ділянки, оскільки, як зазначалося раніше, під час аерознімання на цій ділянці не було опорних точок.



Рис. 4. Процес отримання координат контрольних точок ГНСС-методом



Рис. 5. Технологічна схема визначення висотної похибки ортотрансформування аерознімків

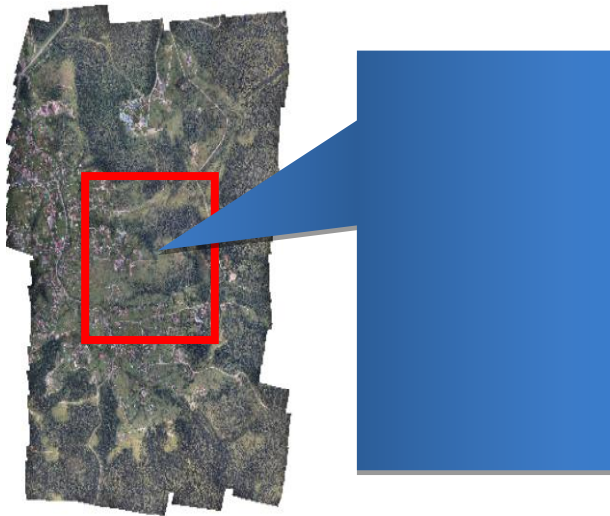


Рис. 6. Ортофотоплан гірської частини смт. Східниця, створений у 2018 році безпілотним літальним апаратом Arrow виробництва української фірми Abris DG із висоти польоту 500 м

Усунувши зміщення планових координат тих самих точок полігону досліджень, ми переносимо контрольні точки, отримані ГНСС-методом, на ЦМП, створену за результатами аерознімання (рис. 11). Початково оцінено різниці у висотних показниках контрольних точок (Barazzetti, et al., 2010; Tarolli, 2014; Chen, et al., 2014).

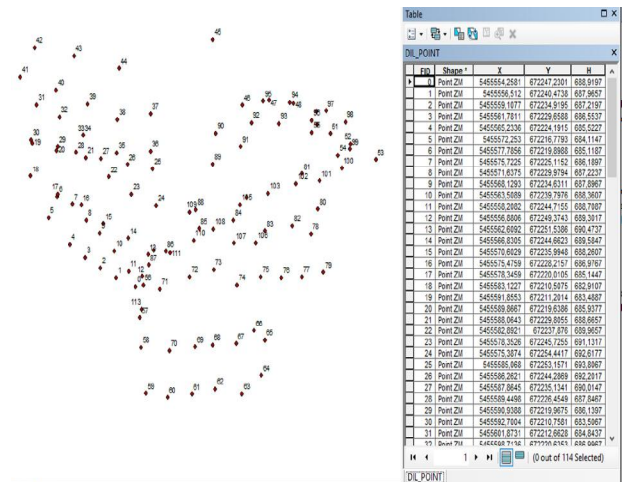


Рис. 7. Мережа точок тестової ділянки з таблицею просторових координат, отриманих за допомогою ГНСС-знімання

За побудованою цифровою моделлю поверхні визначено, що висоти точок тестової ділянки, отримані за ГНСС-зніманням, відрізняються від 0,11 м до 1,28 м. Це пояснюється висотою трав'яного покриву та чагарниками в районі досліджень (рис. 12).

На рисунку зображено плоскі координати точок – X, Y; висоти цих точок, отримані під

час знімання ГНСС та з карти висот поверхні, побудованої за допомогою аерофотознімків; Δ , m – різниця висот точок, отримана під час знімання ГНСС і з карти висот поверхні в метрах; $\Delta \Delta$ – значення Δ , m у квадраті.



Рис. 8. Ортофотоплан гірської частини смт. Східниця, отриманий у 2018 році з нанесеною мережею точок, отриманих за допомогою ГНСС (всі дані приведені до системи координат WGS84 та Балтійської системи висот)



Рис. 9. Карта ліній течій дослідної ділянки, побудована за даними аерознімання



Рис. 10. Карта ліній течій дослідної ділянки, побудована за даними ГНСС-знімання

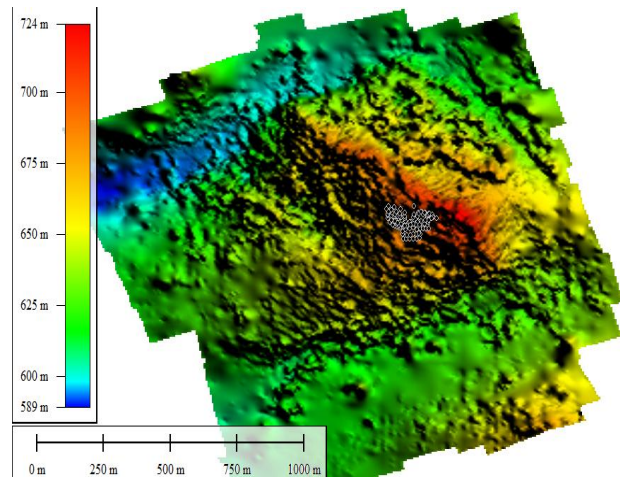


Рис. 11. Побудована карта висот поверхні за результатами аерознімання, на яку нанесено точки ГНСС-знімання території району досліджень

	A	B	C	D	E	F
1	X,m	Y,m	H_GNSS,m	H_Aero,m	Δ ,m	$\Delta\Delta$
2	5455554,258	672247,2301	688,9197	689,82	-0,9003	0,81054
3	5455556,512	672240,4738	687,9657	688,83	-0,8643	0,747014
4	5455559,108	672234,9195	687,2197	688,24	-1,0203	1,041012
5	5455561,781	672229,6588	686,5537	687,4	-0,8463	0,716224
6	5455565,234	672224,1915	685,5227	686,14	-0,6173	0,381059
7	5455572,253	672216,7793	684,1147	685,14	-1,0253	1,05124
8	5455577,786	672219,8988	685,1187	686,14	-1,0213	1,043054
9	5455575,723	672225,1152	686,1897	687,14	-0,9503	0,90307
10	5455571,638	672229,9794	687,2237	688,14	-0,9163	0,839606
11	5455568,129	672234,6311	687,8967	688,41	-0,5133	0,263477
12	5455563,509	672239,7976	688,3607	688,24	0,1207	0,014568
13	5455558,208	672244,7155	688,7087	689,83	-1,1213	1,257314

Рис. 12. Зведена таблиця просторових координат 87 точок району досліджень із даних аерознімання та ГНСС із пороханими різницями висот (для ЦМП)

Результати

Усунувши за допомогою фільтрів у програмному пакеті Agisoft PhotoScan, рослинність полігону досліджень, отримано цифрову модель рельєфу.

Точність і густина вузлів ЦМР повинна забезпечувати визначення висот елементарних ділянок цифрового трансформованого знімка з похибкою не більше ніж 0,4 мм у масштабі плану (Парфенова, 2006). Оскільки ортофотоплан створений у масштабі 1:2000, то:

$$m = 0,4 \text{ mm} \times M = 0,04 \times 2000 = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}.$$

За формулою Гауса порохано середню квадратичну похибку розходження висот точок:

$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n}} = \sqrt{\frac{13,16}{87}} = 0,39 \text{ м.}$$

Отже, середньоквадратична похибка висоти ЦМР за 87 контрольними точками локальної тестової ділянки становить 0,39 м, що задовільняє умові 0,8 м (рис. 13).

	A	B	C	D	E	F
1	X,m	Y,m	H_GNSS,m	H_Aero,m	Δ,m	ΔΔ
80	5455597,387	672320,3407	707,2405	707,45	-0,2095	0,04389
81	5455590,307	672321,8906	706,8465	707,45	-0,6035	0,364212
82	5455585,315	672319,0276	705,5405	705,45	0,0905	0,00819
83	5455581,84	672311,3237	703,6075	703,46	0,1475	0,021756
84	5455581,141	672303,0902	702,1625	702,46	-0,2975	0,088506
85	5455578,61	672293,324	700,3715	700,46	-0,0885	0,007832
86	5455565,537	672281,5223	696,6295	696,81	-0,1805	0,03258
87	5455569,295	672274,2425	695,8205	696,46	-0,6395	0,40896
88	5455573,653	672265,9199	694,7725	694,82	-0,0475	0,002256
89	5455566,257	672267,4731	694,0435	694,82	-0,7765	0,602952
90	5455563,109	672259,1166	692,3185	692,82	-0,5015	0,251502
91	5455563,767	672253,5236	690,9075	690,82	0,0875	0,007656
92	5455548,346	672249,3065	688,5895	688,82	-0,2305	0,05313
93					-0,7765	13,16375
94						0,151307
95						0,388983

Рис. 13. Зведена таблиця просторових координат 87 точок району досліджень із даних аерознімання та ГНСС із порашованими різницями висот (для ЦМР)

Як бачимо з рис. 13, навіть після застосування фільтрів і відбракування рослинності з карти висот, все одно в різницях показників висот доволі багато хоч і невеликих, але негативних значень. Можливо це свідчить про те, що фільтри, запрограмовані в програмному забезпеченні, все ж таки пропускають частину рослинності на ЦМР. Але, зважаючи на невеликі значення цих різниць, сильно впливати на результуючі показники це мати не буде.

Враховуючи порашовані дані СКП розходження висот, згідно з нормативними документами можна будувати ортофотоплан масштабу 1:2000 із перерізом горизонталей через 2 м.

На рис. 14–16 подано побудовані цифрові моделі рельєфу дослідної ділянки за даними двох методів та варіограми висотних показників цих ЦМР для порівняння. За допомогою варіограм (рис. 15–16) можна наочно побачити відхилення тих самих контрольних точок одна

від одної, отриманих за двома вищеописаними методами.

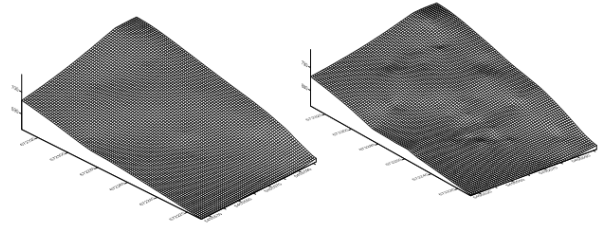


Рис. 14. Побудовані ЦМР за даними ГНСС-знімання і аерознімання

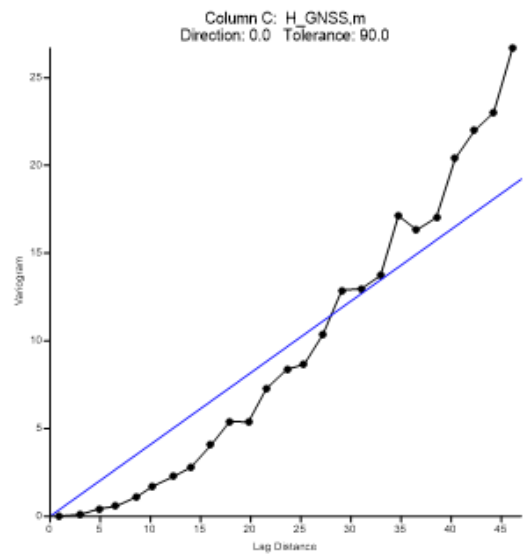


Рис. 15. Варіограма висотних позначок точок ГНСС-знімання

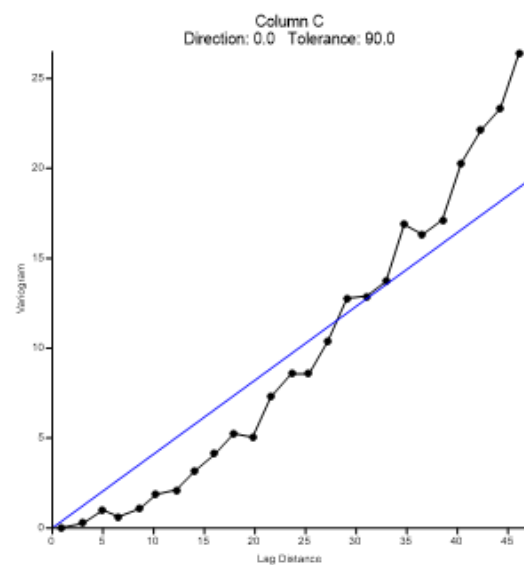


Рис. 16. Варіограма висотних позначок точок аерознімання

Наукова новизна і практична значущість

Запропоновано методику порівняння висотних показників точок місцевості, отриманих за різними методами для визначення величини похибки ортотрансформування аерознімків, отриманих із БПЛА на гірську локальну ділянку смт. Східниця.

Одержані результати величини похибки ортотрансформування аерознімків із безпілотних літальних апаратів на окрему гірську частину смт. Східниця вказують на те, що ортотрансформування аерознімків окремих гірських територій із БПЛА в зоні допуску.

Публікацію фінансує Польське національне агентство з питань академічного обміну за програмою Міжнародних академічних партнерств з проекту “Організація 9 Міжнародної науково-технічної конференції “Інженерія довідкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку”.

Висновки

Порівнюючи висотні показники 87 точок на схилі гори в смт. Східниця, отримані за допомогою ГНСС-знімання, з висотними показниками тих самих точок, отриманих з карти висот поверхні, створеної за даними аерознімання з безпілотного літального апарата, визначено, що висотні показники точок дуже відрізняються від 0,11 м до 1,28 м. Це пов'язано із наявністю на тестовій ділянці травяного покриву і чагарників. Середня квадратична похибка відхилень становить 0,74 м.

Після фільтрації карти висот поверхні отримано ЦМР, середня квадратична похибка розходження висот становила 0,39 м, що задовільняє умові не більше ніж 0,8 м. Враховуючи отримані дані, можна зробити висновок, що створена ЦМР підходить для усунення похибки за рельєф під час трансформування знімків і створення орто-

фотоплану масштабу 1:2000 із перерізом рельєфу через 2 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- Barazzetti, L., Scaioni, M., & Remondino, F. (2010). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132), 356-381.
- Barba, S., Barbarella, M., Di Benedetto, A., Fiani, M., Gujski, L., & Limongiello, M. (2019). Accuracy Assessment of 3D Photogrammetric Models from an Unmanned Aerial Vehicle. *Drones*, 3(4), 79.
- Barry, P., & Coakley, R. (2013). Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens*, 2, 2731.
- Chen, Z., Zhang, B., Han, Y., Zuo, Z., & Zhang, X. (2014). Modeling accumulated volume of landslides using remote sensing and DTM data. *Remote Sensing*, 6(2), 1514-1537.
- Cryderman, C., Mah, S. B., & Shufletoski, A. (2014). Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations. *Geomatica*, 68(4), 309-317.
- Galetsy, V., Glotov, V., Kolesnichenko, V., Prohorchuk, O., Tserklevich, A. (2012). Analysis of experimental works with creating large-scale rural plans settlements when using UAVs. *Geodesy, cartography and aerial photography*. 76, 85-93 (in Ukrainian).
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101-111.
- Hlotov, V., Hunina, A., & Siejka, Z. (2017). Accuracy investigation of creating orthophotomaps based on images obtained by applying Trimble-UX5 UAV. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 103(1), 106-118.
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-

- motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51-66.
- Kolb, I., Lutczynsyn, M., & Panek, M. (2013). The study of methods for correcting global Digital Terrain Models using remote sensing data. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*. Krakow, 3, 59-66, <http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2013.3.59>
- Parfenova, G. S. (2006). Evaluation of the accuracy of digital orthophotoplanes. *Interexpo GeoSibir*, 3(1).
- Rau, J., Chen, N. Y., & Chen, L. C. (2002). True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(6), 581-588.
- Saadatseresht, M., Hashempour, A. H., & Hasanlou, M. (2015). UAV photogrammetry: a practical solution for challenging mapping projects. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 619.
- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312.
- Turner, D., Lucieer, A., Malenovský, Z., King, D., & Robinson, S. (2014). Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds. *Remote Sensing*, 6(5), 4003-4024.
- Vovk, A. I., V. M. Hlotov, A. V. Hunina, A. Y. Malitskyi, K. R. Tretyak, A. L. Tserklevych (2015). Analysis of the results of the use UAV Trimble UX-5 for creation of orthophoto-maps and digital model of relief. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 81, 90-103. Doi: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2015.01.090>
- Zeitler, W., Doerstel, C., & Jacobsen, K. (2002). Geometric calibration of the DMC: Method and Results. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(1), 324-332.
- Zhang, Y., Li, J. Z., Jiang, P. P., Du, Y. L., & Gong, S. F. (2015). Using image registration method to register UAV. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 716, pp. 1675-1679). Trans Tech Publications.

B. CHETVERIKOV, L. BABIY, M. PROTSYK, T. ILKIV

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Institute of Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(063)1671585, e-mail: chetverikov@email.ua

ERROR ESTIMATION OF DEM OF ORTHOTRANSFORMATION OF AERIAL IMAGES OBTAINED FROM UAVS ON THE MOUNTAINOUS LOCAL SITE IN THE VILLAGE SHIDNYTSYA

The aim of the work is to estimate the error of the ortho rectification of aerial images obtained by unmanned aerial vehicle for a mountain site in the village Shidnytsya with the help of additional grid of points obtained by GNSS-survey. The task is to analyse the difference between the heights of the points obtained using two methods: using the map of heights from the UAV survey and using data of GNSS-survey and then to estimate the difference between the real coordinates of the ground control points with their coordinates on the orthophoto plan. **The method.** It is proposed to use the method of ortho rectification of aerial images obtained by UAV on mountainous terrain for determination of the real value of height error. A local test site with size approximately 70x60 meters was created on the hill in the village Shidnytsya, The site is part of terrain covered by a general aerial survey of the village. On this site an additional GNSS-survey was implemented and a grid of points with measured coordinates was generated with step one meter. Processing of the obtained ortho image height map based on the data of the aerial survey of the entire Shidnytsya and the results of GNSS-survey was realized in the software of ArcGIS. Layer of points of the local test site was overlaid on the aerial image and then this data were compared with the coordinates of the same points obtained from the map of heights. **Results.** Comparing the height values of 87 points on the test site to the height

values of the same points obtained from the map of heights created on the basis of aerial survey implemented by unmanned aerial vehicle, it was determined that the height values of the points are not very different. The root mean square error is 0.39 m. **Scientific novelty.** The method of comparing the values of terrain point heights obtained using different technologies for determination of the value of the error of ortho rectification of aerial images obtained by UAV on mountainous local site near the village Shidnytsya is proposed. **Practical significance.** The obtained results of error values of aerial images ortho rectification show that ortho rectification of aerial images of some mountainous areas obtained using the UAV is in the zone of tolerance.

Key words: ortho rectification, orthophoto plan, aerial survey, UAV, GNSS survey, determination of error value.

Надійшла 26.09.2019 р.