

Валидация БПЛА в решении маркшейдерских задач на руднике «Дукат»

В.В. Курбатова✉, А.М. Волин, Н.Е. Ломакина, И.Ю. Гарифулина, М.А. Кузьменков

Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, г. Магадан, Российская Федерация
✉vvnika@mail.ru

Резюме: Статья посвящена исследованию существующего опыта выполнения маркшейдерских работ с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА Phantom 4 Pro с режимом RTK) на руднике «Дукат». Исходя из проведенных исследований аналогово-геометрического сравнения эмпирического распределения построенных моделей определено, что использование Phantom 4 Pro с режимом RTK является приоритетным и расхождение с тахеометрической съемкой находится в пределах установленного допуска. На точность определения объемов по фотограмметрическим данным влияет множество факторов – погрешность инструмента, точность определения координат сгущения съёмочного обоснования, геометрическая корректность объекта, исходя из этого были выполнены аппроксимация измерений и сравнительный анализ данных, полученных геодезическим и фотограмметрическим методами. Результаты исследований могут быть полезными в практической деятельности маркшейдерской службы на предприятии.

Благодарности: Особая благодарность Шпагину Марку Викторовичу, помощнику маркшейдера рудника «Дукат», за оказанную консультативную помощь.

Ключевые слова: БПЛА, квадрокоптер, дрон, съемка, средняя квадратическая ошибка, объем, GPS, фотограмметрические методы

Для цитирования: Курбатова В.В., Волин А.М., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю., Кузьменков М.А. Валидация БПЛА в решении маркшейдерских задач на руднике «Дукат». *Горная промышленность*. 2023;(1):47–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-47-50>

Validation of UAV application to solve surveying tasks at the Dukat mine

V.V. Kurbatova✉, A.M. Volin, N.E. Lomakina, I.Yu. Garifulina, M.A. Kuzmenkov

North-Eastern State University, Polytechnic Institute, Magadan, Russian Federation
✉vvnika@mail.ru

Abstract: The article is dedicated to the study of the existing experience of performing surveying operations using an unmanned aerial vehicle (Phantom 4 Pro UAV with RTK mode) at the Dukat mine. Based on the performed analogue and geometric comparison of the empirical distribution of the built models, it has been determined that the use of Phantom 4 Pro with the RTK mode is a key priority and that the discrepancy with the total station measurements is within the specified tolerance. In particular, it was determined that the accuracy of determining volumes based on the photogrammetric data is influenced by many factors, e.g. the error of the instrument, positional accuracy of the surveyor's pickup refinement, the geometric correctness of the object, and on this basis, the approximation of measurements and comparative analysis of data obtained by geodetic and photogrammetric methods were performed. The results of the research can be useful in the practical activities of the surveying service at the enterprise.

Acknowledgments: Special thanks to Mark Viktorovich Shpagin, assistant surveyor of the Dukat mine, for the advisory assistance provided.

Keywords: UAV, quadcopter, drone, shooting, mean square error, volume, GPS, photogrammetric methods

For citation: Kurbatova V.V., Volin A.M., Lomakina N.E., Garifulina I.Yu., Kuzmenkov M.A. Validation of UAVs in solving surveying tasks at the Dukat mine. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):47–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-47-50>

Введение

Объектом исследований является технология выполнения съёмочных работ с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА Phantom 4 Pro с режимом RTK) в маркшейдерской практике на месторождении «Дукат».

Актуальность данной работы обосновывается внедре-

нием беспилотного летательного аппарата в маркшейдерское сопровождение открытых горных работ в соответствии с программой техперевооружения – в июне 2021 г. на ГОК «Дукат».

Целью исследований являлся анализ возможности отказа от пунктов высотного обоснования (ПВО) исходя из

того, что БПЛА укомплектован базовой станцией (система RTK позволяет передавать данные между БПЛА и базовой станцией), что позволяет облегчить процесс съемки, сократить время обработки данных [1].

Результаты исследований

На основании разработанной программы испытаний – опорный этап «Полная съемка объекта с помощью БПЛА Phantom 4 Pro – участка «Начальный» с дублирующей съемкой тахеометром Sokkia CX-105L и GPS приемника». При этом после запуска БПЛА (квадрокоптера) полученные фотографии в режиме RTK (в WGS 84 (World Geodetic

System)) для получения 3D-модели обрабатывались с помощью ПО «Agisoft Metashape Professional» [2].

В практике применялись два способа обработки данных по переводу координат в местную систему. Первый способ состоял в применении ключа, который вводился в ПО «Agisoft Metashape Professional». Для обработки данных и получения 3D-модели производилась загрузка съемочных фотографий в программную среду «Agisoft Metashape Professional» [3].

Второй способ перевода в местную систему координат (далее – МСК) – с помощью привязки каждой фотографии к МСК. При съемке местности квадрокоптер формирует фотографии и файл в формате MRK с исходными данными (номер фотографии, широта, долгота, высота) [4].

Фототриангуляция реализована алгоритмом Bundle Block Adjustment, в основе которого лежит метод наименьших квадратов (рис. 1). Это интерпретация способа связок, который является самым строгим способом решения фототриангуляции. В расчет включены координаты точек привязки (центр фотографирования или опорных точек) и проекции маркеров на кадре [5]. Далее выполнено построение плотного облака точек (см. рис. 1) на основе карт глубины, для построения которых использовался алгоритм Semi-Global Matching. Суть алгоритма заключается в том, что каждому пикселю левого снимка стереопары находится соответствующий пиксель на правом снимке (рис. 2). Далее формируется куб (параллелепипед) для всего снимка, где каждому пикселю соответствует одна «линия» ячеек, а строке пикселей на снимке соответствует одно продольное сечение куба. Элементами куба являются значения критерия соответствия, анализируя которые, находят минимальные значения для каждого пикселя [6].

После проведения съемки тахеометром и спутниковым геодезическим оборудованием построена поверхность через ПО AutoCad и экспортировались точки, линии рельефа в Studio RM. В процессе построения поверхностей выполнено аналогово-геометрическое сравнение их эмпирического распределения (рис. 3) [6].

При более детальном изучении отмечается, что при съемке БПЛА построенная модель объединяет с рельефом такие элементы, как растительность, водоемы, ЛЭП, но при корректной фильтрации облака точек это аннулируется [1].

Данные расчета объемов в границе одного контура, выполненного в программной среде Studio RM, отражены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

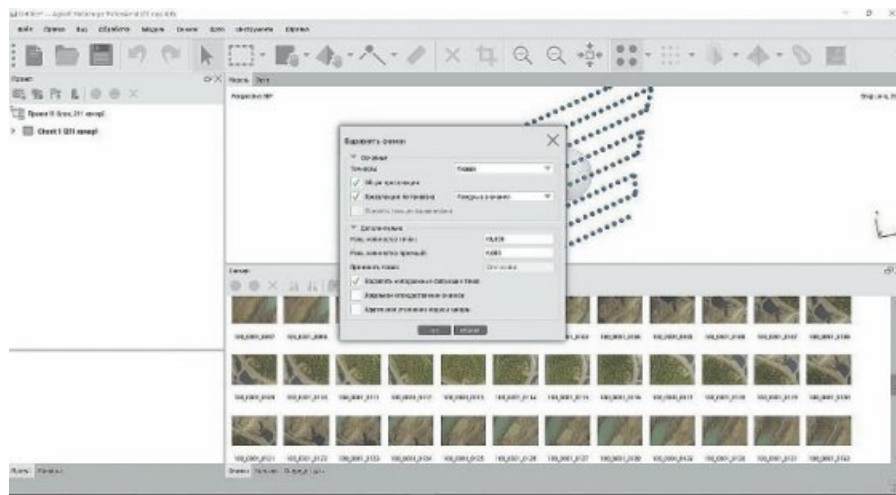


Рис. 1
Выравнивание фотографий

Fig. 1
Alignment of photographs

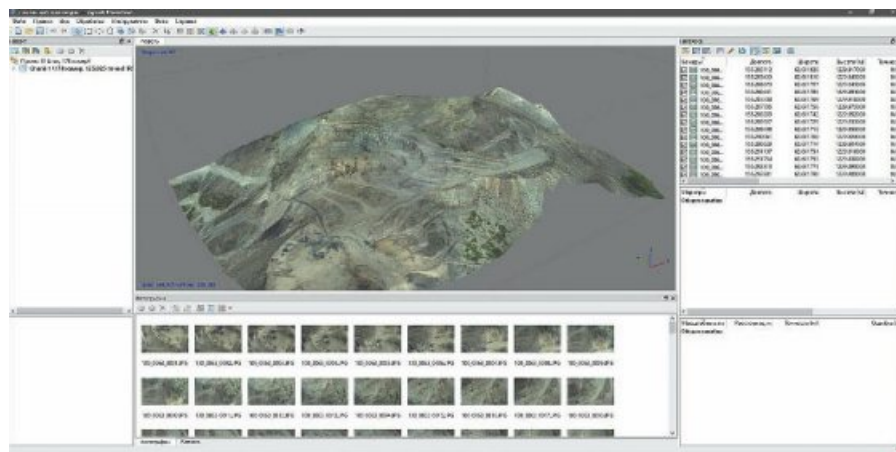


Рис. 2
Модель на основе плотного облака точек

Fig. 2
A model based on a dense point cloud



Рис. 3
Эмпирическое распределение моделей: синий каркас – тахеометрическая съемка, желтый – GPS оборудование, красный – аэрофотосъемка с расчетом объемов

Fig. 3
Empirical distribution of the models: the blue framework - a total station survey, yellow - GPS equipment, red - aerial survey with volume calculations

Таблица 1
Расчет объемов насыпи с помощью приборов

Table 1
Calculation of the volume of the embankment with the help of instruments

Sokkia CX-105L		
VOLTYPE	CUTFLD	VOLUME
CUT	1	314,012
БПЛА Phantom 4 Pro		
VOLTYPE	CUTFLD	VOLUME
CUT	1	267,294

На следующем этапе было выполнено создание исходной поверхности с помощью первоначального топографического плана (подложки) (см. рис. 4) и определение объема насыпи по тахеометрической съемке и съемке БПЛА в уплотненном состоянии с учетом общего объема насыпи и коэффициента уплотнения $k_y=1,5$ по формуле:

$$V_{\text{насыпь}} = \frac{V_{\text{общ}}}{k_y}; \quad (1)$$

$$V_{\text{насыпь/т}} = \frac{314,012}{1,5} = 209,341 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{насыпь/БПЛА}} = \frac{267,294}{1,5} = 178,196 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{насыпь/т}} = \frac{313,87}{1,5} = 209,246 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{насыпь/GPS}} = \frac{294,091}{1,5} = 196,06 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{насыпь/БПЛА}} = \frac{268,2287}{1,5} = 178,819 \text{ м}^3.$$

Оценка точности определения объемов произведена через критерий Стьюдента, а погрешность определения объема вычислялась по формулам:

$$m_V^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial S_1}\right)^2 \cdot m_{S_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial S_2}\right)^2 \cdot m_{S_2}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial L}\right)^2 \cdot m_L^2 \text{ и} \quad (2)$$

$$m_V^2 = \left(\frac{1}{2}L\right)^2 \cdot m_{S_1}^2 + \left(\frac{1}{2}L\right)^2 \cdot m_{S_2}^2 + \left(\frac{S_1+S_2}{2}\right)^2 \cdot m_L^2,$$

где $m_{S_1}^2$ – средняя квадратическая погрешность площади соответственно 1-го и 2-го сечения; m_L^2 – средняя квадратическая погрешность определения расстояния между сечениями.

Площадь сечения определялась по формуле:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k [X_j(Y_{j+1} - Y_{j-1})] = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k [Y_j(X_{j-1} - X_{j+1})], \quad (3)$$

а погрешность определения площади:

$$m_S = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sum (Y_{j+1} - Y_{j-1})^2 m_{X_j}^2 + \sum (X_{j-1} - X_{j+1})^2 m_{Y_j}^2} \quad (4)$$

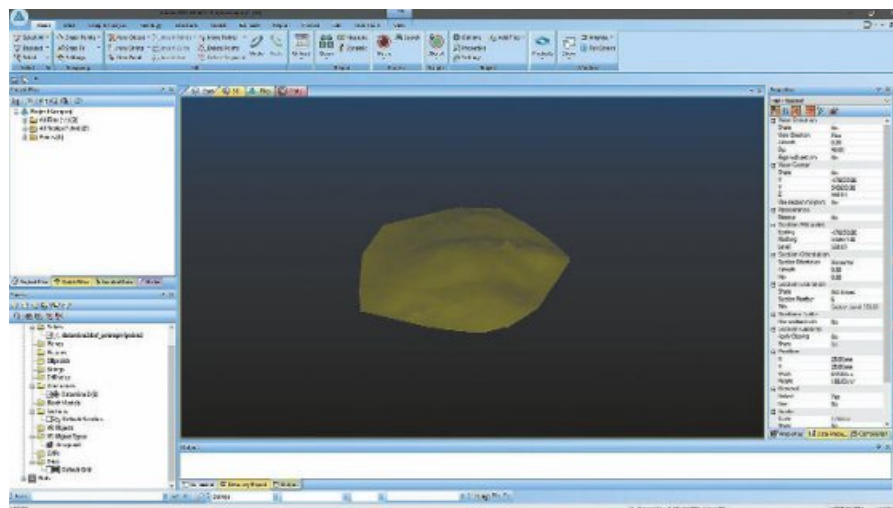


Рис. 4
Построение границы одного контура в ПО Studio RM

Fig. 4
Plotting the boundaries of a single contour in the Studio RM software

Таблица 2
Погрешность определения площади

Table 2
The average square. error rate

№ отвала	№ сечения	Площадь горизонтального/вертикального сечения, м ²	Ср.кв.др. погрешность, м ²
1 – Тахеосъемка	1	4,13	±0,07
	2	6,25	±0,06
	3	3,23	±0,07
	4	7,24	±0,07
	5	6,32	±0,06
2 – GPS	1	3,26	±0,06
	2	5,27	±0,08
	3	4,21	±0,06
	4	6,98	±0,05
	5	7,21	±0,05
3 – БПЛА / UAV	1	3,87	±0,10
	2	5,97	±0,70
	3	4,23	±0,62
	4	7,21	±0,07
	5	6,12	±0,06

С увеличением площади горизонтального сечения СКП остаётся в доверительном интервале, взятом в соответствии с распределением Стьюдента 0,95%.

Заключение

Исходя из проведенных исследований аналогово-геометрического сравнения эмпирического распределения построенных моделей определено, что использование Phantom 4 Pro с режимом RTK является приоритетным и расхождение с тахеометрической съемкой находится в пределах установленного допуска.

Список литературы

1. Бурдаков С.Ф., Марков А.О. *Управление квадрокоптером при полетах с малыми и средними перегрузками*. СПб.: СПбГПУ; 2016. 250 с.
2. Макаров Ю.В. *Летательные аппараты МАИ*. М.: МАИ; 2015. 256 с.
3. Курбатова В.В. Маркшейдерский учет объемов рудных складов с применением методов ДЗЗ. *Маркшейдерия и недропользование*. 2020;(5):43–46.
4. Митрофанова Н.С. Дроны: история возникновения, сферы применения, и перспективы развития. В кн.: *IT: вчера, сегодня, завтра: материалы 4-й науч.-исслед. конф. студентов и аспирантов Института водного транспорта, г. Санкт-Петербург, 11 декабря 2015 г.* СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова; 2016. С. 173–184.
5. Курбатова В.В. Верификация аэрофотосъемки и GNSS-съемки рудных складов. *Маркшейдерский вестник*. 2021;(3):33–37.
6. Хабарова И.А., Хабаров Д.А., Яворская И.Д., Иванов И.Н. Обзор современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке. *Международный журнал прикладных наук и технологий INTEGRAL*. 2019;(4-2):2.

References

1. Burdakov S.F., Markov A.O. *Quadrocopter control during flights with small and medium overloads*. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University of Peter the Great; 2016. 250 p. (In Russ.)
2. Makarov Yu.V. *MAI flying machines*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2015. 256 p. (In Russ.)
3. Kurbatova V.V. Geological survey records of ore deposits volumes with use of earth remote sensing (ERS) methods. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2020;(5):43–46. (In Russ.)
4. Mitrofanova N.S. Drones: the history of origin, scope, and prospects of development. In: *IT: yesterday, today, tomorrow: materials of the 4th research conference of students and postgraduates of the Institute of Water Transport, St. Petersburg, December 11, 2015*. St. Petersburg: State University of Marine and the river Fleet named after Admiral S.O. Makarov; 2016, pp. 173–184. (In Russ.)
5. Kurbatova V.V. Verification of aerial and GNSS surveys of ore warehouses. *Mine Surveying Bulletin*. 2021;(3):33–37. (In Russ.)
6. Khabarova I.A., Khabarov D.A., Javorskaia I.D., Ivanov I.N. Review of modern achievements in photogrammetry and aerial photography. *International Journal of Applied Sciences and Technology INTEGRAL*. 2019;(4-2):2. (In Russ.)

Информация об авторах

Курбатова Вероника Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Политехнический институт, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Волин Александр Михайлович – старший преподаватель кафедры геологии и горного дела, Политехнический институт, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: almvol@yandex.ru

Ломакина Наталья Евгеньевна – старший преподаватель кафедры горного дела, Политехнический институт, Северо-Восточный государственный университет г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Гарифулина Ирина Юрьевна – старший преподаватель кафедры геологии и горного дела, Политехнический институт, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Кузьменков Максим Андреевич – ассистент преподавателя кафедры геологии и горного дела, Политехнический институт, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: snowfallandtea@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.01.2023

Поступила после рецензирования: 07.02.2023

Принята к публикации: 08.02.2023

Information about the authors

Veronika V. Kurbatova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Polytechnic Institute, Northeastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Alexander M. Volin – Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: almvol@yandex.ru

Natalia E. Lomakina – Senior Lecturer of the Mining Department, Polytechnic Institute, Northeastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Irina Yu. Garifulina – Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Polytechnic Institute, Northeastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Maxim A. Kuzmenkov – Associate Lecturer of the Department of Geology and Mining, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: snowfallandtea@mail.ru

Article info

Received: 13.01.2023

Revised: 07.02.2023

Accepted: 08.02.2023