

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-68-72

УДК 622.33:528.7

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
ОТКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ, ПОСТРОЕННЫХ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ****VERIFICATION OF SPATIAL-DIGITAL MODELS OF OPEN COAL STORAGE,
CONSTRUCTED ON THE BASIS OF AERIAL SURVEY RESULTS****Тайлаков Олег Владимирович^{1,2},**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: tailakov@uglemetan.ru

Tailakov Oleg V.^{1,2}, Dr. Sc., Professor**Макеев Максим Павлович¹,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник

Makeev Maksim P.¹, C.Sc. (Engineering), Senior researcher**Коровин Денис Сергеевич¹,**

инженер

Korovin Denis S.¹, engineer¹Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10¹Coal Institute of FRC CCC SB RAS, 10, Leningradsky Ave., Kemerovo, 650065, Russian Federation²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. Рассмотрены нормативные требования к моделированию и определению объемов открытых угольных складов. Представлены экспериментальные данные создания и расчета геометрических характеристик поверхности склада угольного разреза, созданного по результатам аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного комплекса Геоскан 101. При верификации цифровой модели рельефа склада по данным маркишейдерского плана горных выработок разность двойных измерений координат контрольных точек составила 0,18 м в плане и 0,26 м по высоте. Установлено, что погрешность объема угольного склада, рассчитанного способом разделения его на объемные фрагменты с шагом основания равным линейному размеру одного пикселя модели, составляет 2,7 %, и отличается от замеров, выполненных методом вертикальных параллельных сечений по результатам маркишейдерской наземной съемки на 4,6 %.

Abstract. The article considers regulatory requirements for modeling and determining of the volumes of open coal storage facilities. Experimental data are presented on the creation and calculation of the geometric characteristics of the surface of a coal quarry storage created by the results of an aerial survey using an unmanned aerial system Geoscan 101. When the digital model of the relief of the storage was verified with the data of the surveying plan of the mine workings, the difference in the double measurements of the coordinates of the control points was 0.18 m in plan and 0.26 m in height. It was established that the error in the volume of the coal storage calculated by dividing it into volume fragments with a base step equal to the linear size of one pixel of the model is 2.5% and it differs from the measurements cut by the method of vertical parallel cross sections according to the results of surveying ground surveys by 4.6%.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъемка, цифровая фотограмметрия, цифровая модель рельефа, открытый угольный склад.

Keywords: unmanned air vehicle, aerial photography, digital photogrammetry, digital elevation model, open coal storage.

Беспилотные летательные аппараты широко применяются для создания планов местности и 3D-моделей поверхности объектов [1-3]. Одной из задач маркишейдерской службы угледобывающего предприятия является съемка и измерение про-

странственных характеристик открытого угольного склада. Поставлена задача оценить погрешность создания и уравнивания цифровой модели рельефа открытого угольного склада.

По результатам экспериментальной аэрофотосъемки с помощью беспилотного комплекса для



Рис. 1. Соответствие контуров цифровых моделей поверхности открытого угольного склада на цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD

Fig. 1. Correspondence of contours of digital models of the surface of an open coal storage at a digital photogrammetric station PHOTOMOD

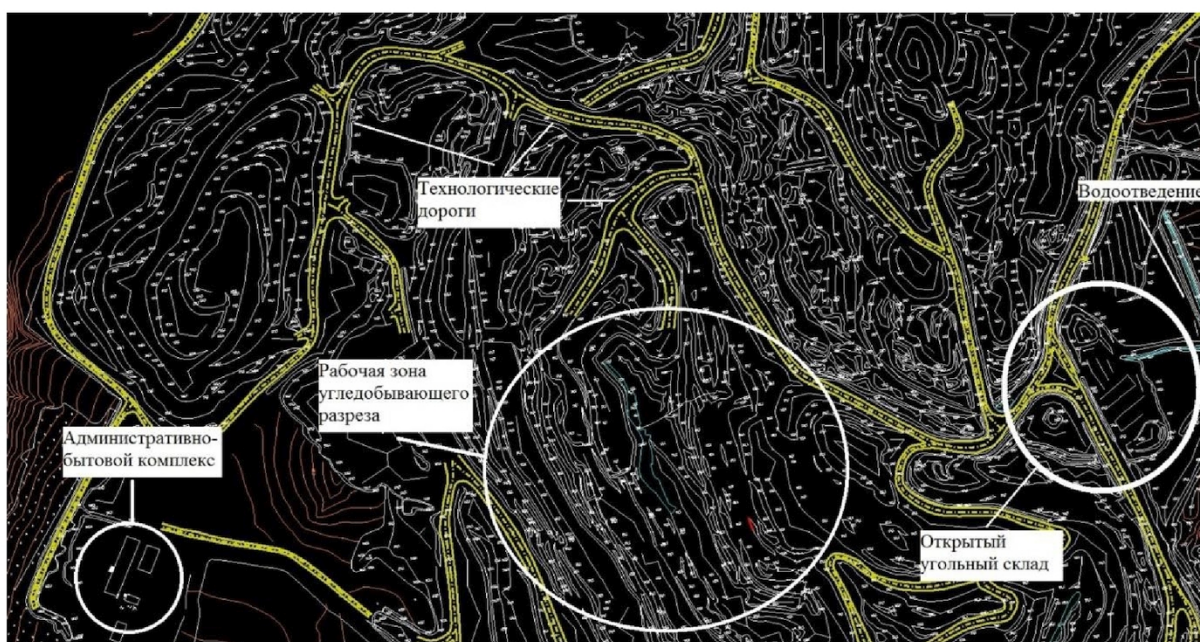


Рис. 2. Отображение в программной среде MicroStation векторизованного топографического плана, обновленного с использованием результатов аэрофотосъемки

Fig. 2. Display in the MicroStation software environment of a vector topographic plan updated using aerial survey results

картографирования Геоскан 101 [4] в цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD была построена модель поверхности одного из складов угольного разреза [5]. Для уменьшения погрешности уравнивания модели был применен способ линейной коррекции координатной сети поверхности по известным характеристикам распознанного на плане наземных транспортно-технологических средств [6]. После внесения дополнительных, рассчитанных опорных точек средняя квадратическая ошибка модели открытого

склада на контрольных точках составила 0,12 м в плане и 0,17 м по высоте [7].

По требованиям инструкции по производству маркшейдерских работ расхождение пространственно-цифровых моделей открытых угольных складов, построенных по результатам аэрофотосъемки и на плане горных выработок, не должно превышать 1 мм в масштабе плана и 0,4 м по высоте [8]. То есть, пространственно-цифровые модели открытого угольного склада, построенные по результатам маркшейдерской съемки и аэрофото-

Таблица 1. Верификация цифровой модели рельефа по данным наземной маркшейдерской съемки
Table 1. Verification of the digital terrain model with the data of the land survey

| Контрольная точка | Цифровая модель рельефа | | | План горных выработок | | | Δ_{xy} , м | Δ_z , м |
|-------------------|-------------------------|-------|--------|-----------------------|-------|--------|-------------------|----------------|
| | X, м | Y, м | Z, м | X, м | Y, м | Z, м | | |
| 1 | 25,31 | 87,10 | 217,77 | 25,55 | 86,98 | 217,99 | 0,27 | 0,22 |
| 2 | 63,53 | 17,10 | 218,46 | 63,56 | 17,10 | 218,08 | 0,03 | 0,38 |
| 3 | 35,53 | 44,59 | 217,98 | 35,61 | 44,69 | 218,27 | 0,13 | 0,29 |
| 4 | 23,03 | 81,74 | 218,58 | 22,95 | 81,85 | 218,20 | 0,14 | 0,38 |
| 5 | 25,64 | 76,16 | 219,22 | 25,38 | 76,01 | 218,89 | 0,30 | 0,33 |
| 6 | 27,77 | 70,40 | 218,34 | 27,89 | 70,26 | 218,61 | 0,18 | 0,27 |
| 7 | 31,95 | 65,07 | 217,75 | 31,68 | 64,82 | 218,01 | 0,37 | 0,25 |
| 8 | 31,25 | 59,04 | 217,95 | 31,02 | 58,74 | 217,99 | 0,38 | 0,04 |
| 9 | 30,40 | 53,39 | 218,72 | 30,17 | 53,65 | 218,94 | 0,35 | 0,22 |
| 10 | 31,52 | 49,76 | 217,95 | 31,48 | 50,06 | 217,81 | 0,30 | 0,14 |
| 11 | 38,06 | 39,73 | 218,24 | 37,99 | 39,76 | 218,76 | 0,08 | 0,52 |
| 12 | 39,39 | 35,05 | 217,76 | 39,22 | 35,32 | 218,02 | 0,32 | 0,24 |
| 13 | 43,34 | 31,91 | 218,37 | 43,15 | 31,67 | 218,49 | 0,31 | 0,12 |
| 14 | 49,41 | 30,90 | 217,85 | 49,41 | 30,69 | 218,26 | 0,21 | 0,41 |
| 15 | 49,81 | 25,63 | 217,96 | 50,06 | 25,75 | 218,34 | 0,28 | 0,38 |

съемки с применением беспилотных летательных аппаратов, должны иметь расхождения не более 0,5 м в плане при масштабе 1:500 и 0,4 м по высоте.

На контуре и поверхности склада были выполнены измерения в 58 контрольных точках (рис. 1). Затем в программном комплексе PHOTOMOD StereoLink [9, 10] в стереорежиме были найдены соответствующие координаты точек на топографическом маркшейдерском плане программной среды MicroStation [11] (рис. 2).

На основе вычисления разности соответствующих координат в каждой точке, была найдена погрешность двойного измерения [12], которая составила 0,18 и 0,26 м в плане и по высоте (табл.

1). В таблице 1 представлен фрагмент данных для первых 15 точек. Сумма квадратов разностей составила 3,75 м² в плане и 8,03 м² по высоте, средняя разность – 0,24 и 0,31 м, максимальная разность – 0,38 и 0,78 м соответственно.

Для измерения объема угольного склада применялся способ его разделения на объемные фрагменты с шагом основания равным линейному размеру одного пикселя модели [13]. Линейный размер пикселя на местности составил 3,1 см, количество пикселей – 2392315 шт., общая площадь основания склада – 2299 м², средняя высотная отметка поверхности склада – 9,36 м, а его объем – 21522 м³.

В соответствии с инструкцией по маркшей-

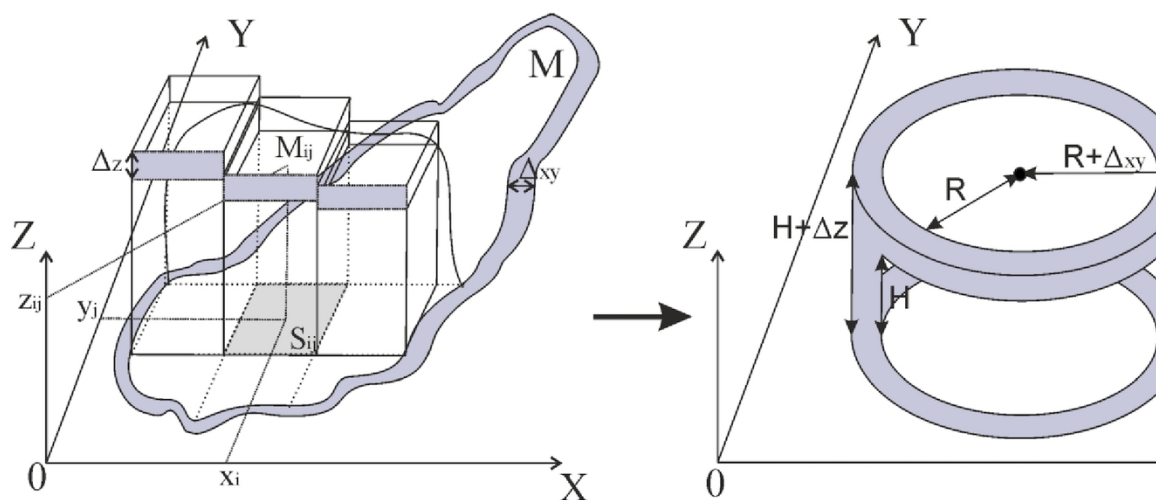


Рис. 3. Представление поверхности угольного склада в виде фигуры с правильной геометрической формой

Fig. 3. The representation of the surface of a coal storage in the form of a figure with a regular geometric shape

дерскому учету объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом при измерениях объема открытого угольного склада от 20 до 50 тыс. м³ допускается разность значений в двух независимых замерах до 8 % и относительная погрешность измерения до 5 % [14]. Объем угольного склада, измеренный методом вертикальных параллельных сечений по результатам маркшейдерской съемки, составил 22550 м³, что отличается от значений, полученных способом разделения модели открытого угольного склада на объемные фрагменты с шагом основания равным линейному размеру одного пикселя его модели на 4,6 %.

Для оценки погрешности измерения объема угольного склада представим его поверхность в форме цилиндра [15]. При этом площади основания цилиндра и склада должны совпадать, а средняя высота склада равняться высоте цилиндра (рис. 3).

Радиус основания цилиндра соответствующего основанию склада составил

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{2299/\pi} = 27,05 \text{ м.} \quad (1)$$

Общая средняя квадратическая погрешность площади Δ_{xy} выражается суммарным влиянием погрешностей измерений при съемке в плане E_{xy} и определения контура основания склада по плану, равной $\frac{1}{2}$ GSD, т.е.

$$\Delta_{xy} = \pm \sqrt{(E_{xy})^2 + \left(\frac{1}{2} \text{GSD}\right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta_{xy} = \pm \sqrt{(0,12)^2 + (0,0275)^2} = \pm 0,123 \quad (3)$$

Поскольку высотные отметки рассчитываются с применением специализированного программного обеспечения автоматически, среднюю квадратическую погрешность определения высотных отметок Δ_z можно приравнять к погрешности измерений при съемке по высоте E_z .

В общем виде погрешность объема угольного склада, определенного по результатам аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата, можно выразить формулой

$$M_v = \pm \frac{\pi \cdot (R + \Delta_{xy})^2 \cdot (H + \Delta_z) - V}{V}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_v &= \pm \frac{\pi \cdot (27,05 + 0,123)^2 \cdot (9,36 + 0,17) - 21522}{21522} \\ &= \pm \frac{584}{21522} = \pm 2,7\% \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, цифровая модель поверхности открытого угольного склада, построенная с использованием результатов аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, расходится с планом горных выработок со средним квадратическим отклонением 0,18 м в плане и 0,26 м по высоте. Способ разделения модели открытого угольного склада на объемные фрагменты с шагом основания равным линейному размеру одного пикселя модели позволяет измерять его объем с относительной погрешностью до 2,7 % и разностью с объемом, найденным методом вертикальных параллельных сечений до 4,6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Б.С. Перспективы развития комплексов с беспилотными летательными аппаратами на период до 2025 года / Б.С. Алешин, В.Л. Суханов, А.Г. Шнырев, В.М. Шibaев // *Аэрокосмический курьер*. – 2012. – № 5.
2. Применение беспилотных летательных аппаратов для картографических работ / Колл. авт. (НТЦ АО «Роскартография») // *Геопрофи*. – 2016. – № 6. – С. 18-21.
3. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal North Wales / T.N. Tonkin, N.G. Midgley, D.J. Graham, J.C. Labadz // *Geomorphology*. – 2014. – № 226 –Р. 35-43.
4. БПЛА Геоскан 101 // Группа компаний Геоскан URL: <https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan101> (дата обращения: 18.07.2017).
5. Тайлаков О.В. Выбор рациональных параметров аэрофотосъемки угольного склада, выполняемой с применением беспилотного летательного аппарата / О.В. Тайлаков, В.И. Ефимов, Д.С. Коровин // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2016. – № 1. – С. 50-57.
6. Тайлаков О.В. Особенности фотограмметрической обработки аэрофотоснимков открытого угольного склада при использовании беспилотных летательных аппаратов / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2016. – № 5. – С. 3-7.
7. Quantifying submerged fluvial topography using hyper spatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry / A.S. Woodget, P.E. Carbonneau, F. Visser, I.P. Maddock // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2014. – № 40(1). – Р. 47-64.
8. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03). Серия 07. Выпуск 15 / Колл. авт. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.
9. Сапрыкина Г.В. Эффективное использование вычислительных ресурсов в программе

PHOTOMOD / Г.В. Сапрыкина, А.Д. Чекурин // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2011. – № 24.

10. Варущенко С.С. Новое программное обеспечения для горнодобывающей отрасли // Геопрофи. – 2005. – № 4. – С. 10-11.

11. D. Body. The Changing Face of Surveying within the Mining Industry // A Bentley White Paper. – 2014.

12. Маркшейдерские работы на карьерах и приисках / М. А. Перегудов, И. И. Пацев, В. И. Борщ-Компонец и др. – М.: Недра, 1980. – 366 с.

13. Тайлаков О.В. Алгоритмическое и программное обеспечение с применением беспилотных летательных аппаратов для оценки остатков угля на открытых складах / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин, М.П. Макеев, С.В. Соколов // Уголь. – 2015. – № 2. – С. 68-71.

14. Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом (РД 07-604-03). Серия 07. Выпуск 13 / Колл. авт.– М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.

15. Казаков П.Г. Параллельные проекции и методы решения конструктивных задач. – М.: Учпедгиз, 1960. – 115 с.

REFERENCES

1. Aleshin B.S., Suhanov V.L., Shnyrev A.G., Shibaev V.M. Perspektivy razvitiya kompleksov s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami na period do 2025 goda. Ajerokosmicheskij kur'er. 2012. No. 5.

2. NTC AO «Roskartografija». Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja kartograficheskikh rabot. Geoprofi. 2016. No. 6. p. 18-21.

3. Tonkin T.N., Midgley N.G., Graham D.J., Labadz J.C. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal North Wales. Geomorphology. 2014. No 226. pp. 35-43.

4. UAV Geoscan 101. Access mode: <https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan101> [18.07.2017].

5. Tajlakov O.V., Efimov V.I., Korovin D.S. Vybora racional'nyh parametrov ajerofotosemki ugol'nogo sklada, vypolnjaemoj s primeneniem bespilotnogo letatel'nogo apparata. Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal. 2016. No 1. pp. 50-57.

6. Tajlakov O.V., Korovin D.S. Osobennosti fotogrammetricheskoy obrabotki ajerofotosnimkov otkrytogo ugol'nogo sklada pri ispol'zovanii bespilotnyh letatel'nyh apparatov. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnickeskogo universiteta. 2016. No 5. P. 3-7.

7. Woodget A.S., Carbonneau P.E., Visser F, Maddock I.P. Quantifying submerged fluvial topography using hyper spatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. Earth Surface Processes and Landforms. 2014. No 40(1). pp. 47-64.

8. Instrukcija po proizvodstvu markshejderskikh rabot (RD 07-603-03).

9. Saprykina G.V., Chekurin A.D. Jefferktivnoe ispol'zovanie vychislitel'nyh resursov v programme PHOTOMOD Informacionnyj bjulleten' GIS-Associacii. 2011. No. 24.

10. Varushhenko S.S. Novoe programmnnoe obespechenija dlja gornodobyvajushhej otrasli. Geoprofi. 2005. No. 4. pp. 10-11.

11. D. Body. The Changing Face of Surveying within the Mining Industry. A Bentley White Paper. 2014.

12. Peregudov M.A., Pacev I.I., Borshh-Komponiec V.I. Markshejderskie raboty na kar'erah i priiskah. 1980. p. 366.

13. Tajlakov O.V., Korovin D.S., Makeev M.P., Sokolov S.V. Algoritmicheskoe i programmnnoe obespechenie s primeneniem bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja ocenki ostatkov uglja na otkrytyh skladah. Ugol'. 2015. No. 2. pp. 68-71.

14. Instrukcija po markshejderskomu uchetu ob'emov gornyh rabot pri dobyche poleznyh iskopaemyh otkrytym sposobom (RD 07-604-03).

15. Kazakov P.G. Parallel'nye proekcii i metody reshenija konstruktivnyh zadach. 1960. p. 115.

Поступило в редакцию 30.08.2017

Received 30.08.2017