

УДК 528.71:629.783:528.02:622.36
DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Александр Владимирович Комиссаров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова 10, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, директор ООО «СИБ-ГЕО-МАР», тел. (383)361-01-59, e-mail: avkom82@mail.ru

Евгений Ильич Аврунев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова 10, кандидат технических наук, доцент, директор Института кадастра и природопользования, тел. (383)344-31-73, e-mail: kadastr-204@yandex.ru

Харьес Каюмович Ямбаев

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Россия, г. Москва, Гороховский переулок, 4, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геодезии, тел. (499)261-58-53, e-mail: yambaev@miigaik.ru

Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.p.hlebnikova@sgugit.ru

В статье изложена методика моделирования геодезических и фотограмметрических данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для исследования точности определения объемов складов сыпучих материалов. В качестве фигуры для моделирования принят усеченный эллиптический конус, который наиболее близко подходит к сбуртованным складам по форме. Для моделирования результатов измерений использовались величины погрешностей, присущие каждому методу. После моделирования результатов измерений производился расчет объемов на основе построения TIN-поверхности. Затем полученные результаты сравнивались с идеальной фигурой и вычислялась относительная погрешность измерений. В результате полученных исследований установлено, что геодезический метод определения объемов складов сыпучих материалов является более точным для небольших объемов до 300 тыс. м³, а при больших размерах складов целесообразнее использовать фотограмметрический метод, который практически сравним с геодезическим по точности, но при этом менее трудоемкий, а при объеме склада более 1 000 тыс. м³ точность фотограмметрического метода становится выше геодезического.

Ключевые слова: геодезический метод, фотограмметрический метод, определение объемов, моделирование, точность, относительная погрешность, склад сыпучих материалов.

Точные замеры объемов сыпучих материалов – неотъемлемая часть работы горнорудных комбинатов, шахт, нефтеперерабатывающих заводов, химических производств, различных транспортных компаний и предприятий агропромыш-

ленного комплекса. Это вызвано тем, что сыпучие материалы сложно поддаются точному учету.

При этом сыпучее сырье составляет значительную часть расходов предприятий, и для эффективного его распределения необходимо контролировать объем.

Необходимая точность определения объемов в большей степени зависит от стоимости единицы объема материала и может варьироваться от единиц до долей процентов от общего объема материалов. Чем дороже материал, тем с большей точностью требуется вычислять его количество. Высокие требования к точному подсчету земляных работ предъявляют в настоящее время и строители. Объем перемещенного грунта на больших строительных площадках измеряется миллионами кубометров, и погрешность в их определении может стоить значительных финансовых расходов. Требования к точности определения объемов часто достигают 1–3 % от общего объема.

При выборе методов определения объемов сыпучих материалов необходимо уделять особое внимание следующим показателям:

- периодичность;
- оперативность;
- точность;
- трудозатратность;
- стоимость.

Для определения массы сыпучих материалов используются два основных способа:

- физический, основанный на непосредственном замере массы сыпучих материалов;
- геометрический, заключающийся в определении объема сыпучих материалов и интегрального показателя его плотности.

Первый способ является очень затратным, так как замер массы сыпучих материалов производится путем взвешивания отдельных его частей. При больших объемах складов (более 3–5 тыс. м³) это очень длительный и финансово затратный процесс. Поэтому для подобных складов сыпучих материалов экономически выгоднее использовать геометрический способ.

В общем виде при данном способе объем любой фигуры определяется по формуле

$$V = \int_a^b S(x)dx, \quad (1)$$

где $S(x)$ – площадь фигуры.

Из формулы (1) следует, что точность определения объема зависит от погрешностей определения площади фигуры и границ интегрирования (высот).

Перед началом выполнения замеров складов сыпучих материалов они должны быть сбуртованы, т. е. приведены к правильной форме и должны пред-

ставлять фигуру, близкую к усеченному эллиптическому конусу. В этом случае расчет объема выполняется следующим образом:

$$V = \frac{\pi h}{6} [(2a_1 + a_2)b_1 + (2a_2 + a_1)b_2], \quad (2)$$

где a_1, b_1, a_2, b_2 – величины большой и малой полуоси основания и верха эллиптического конуса;

h – высота эллиптического конуса.

Для определения объемов складов сыпучих материалов можно использовать следующие методы съемок [1–12]:

- наземное лазерное сканирование;
- геодезический метод;
- фотограмметрический метод, с беспилотного летательного аппарата;
- наземная фотосъемка.

Из данных методов наиболее точным является метод наземного лазерного сканирования, который позволяет с точностью 1–3 см и дискретностью замеров 4–5 см определить объем с относительной погрешностью 0,01 % [1, 3, 8]. Однако из всех он является самым дорогим с точки зрения себестоимости, если учитывать амортизационные отчисления на восстановление основных средств.

Наземная фотосъемка тоже является достаточно точной, но при этом требует значительных полевых и камеральных трудозатрат ввиду необходимости подготовки планово-высотного обоснования для съемки и последующей стереообработки данных.

В практике производства работ, в основном, используется геодезический метод и аэросъемка с дронов [4–8]. В связи с этим сравним данные методы на основе результатов моделирования.

Для моделирования результатов расчетов воспользуемся формулой (2), на основе которой рассчитаем координаты точек с различной дискретностью:

- для геодезического метода – от 2 до 4 м;
- для фотограмметрического с беспилотного летательного аппарата – 0,2–1 м.

Затем в полученные координаты вносятся погрешности. Предполагалось, что съемка геодезическим методом выполняется с трех точек теодолитного хода, т. е. систематические погрешности вносятся в пределах 3 см. Кроме того, в измерения вносятся случайные погрешности исходя из следующего [11, 13, 14]:

- точки съемки от электронного тахеометра удалены не более чем на 100 м;
- погрешность измерения расстояний составляет 5 мм;
- погрешность угловых измерений 7".

При фотограмметрическом методе (при съемке с дрона) предполагалось, что [4–6]:

- съемка производится с высоты 50 м, при этом количество моделируемых снимков составляло 4 штуки, базис фотографирования 40–50 м;

- размер пикселя на местности составляет не более 5 см;
- остаточные величины дисторсии составляют 2–3 пикселя;
- центры фотографирования определяются с помощью ГНСС-аппаратуры в режиме кинематики с погрешностью 7–10 см;
- измерения контролируются опытным фотограмметристом со средней квадратической погрешностью (СКП) стереоскопического визирования, обеспечивающей выполнение условия:

$$m_h \leq 0,004 H / b, \quad (3)$$

где H – высота фотографирования;

b – базис фотографирования эталонной стереопары.

По изложенной методике было смоделировано несколько вариантов геодезического и фотограмметрического методов определения объемов складов сыпучих материалов. Результаты сравнения представлены в таблице.

Результаты сравнения геодезического и фотограмметрического методов определения объемов складов сыпучих материалов

№ п/п	Объем, м ³			Разность объемов, м ³		Относительная погрешность определения объема, %	
	полученный фотограмметрическим методом	полученный геодезическим методом	номинальный	между номинальным и полученным фотограмметрическим методом	между номинальным и полученным геодезическим методом	фотограмметрическим методом	геодезическим методом
1	21 606	21 448	21 467,6	–138	20	–0,645	0,091
2	171 951	171 670	171 740,4	–211	70	–0,123	0,041
3	343 841	343 357	343 480,8	–361	124	–0,105	0,036
4	721 748	721 085	721 308,3	–440	224	–0,061	0,031
5	1 305 736	1 304 848	1 305 227	–509	379	–0,039	0,029
6	1 896 789	1 895 746	1 896 258,1	–531	512	–0,028	0,027
7	2 865 771	2 864 453	2 865 169,2	–602	716	–0,021	0,025

Из анализа результатов замеров видно, что при небольших объемах складов геодезический метод дает меньшую относительную погрешность, а при увеличении объемов точность фотограмметрического метода начинает превосходить точность геодезического метода. Также следует отметить, что количество пикетов при геодезическом методе для склада более 700 тыс. м³ превышает 1 000 штук, что очень трудоемко.

Представленные выводы подтверждают практический опыт выполнения работ на складах сыпучих материалов. При этом в качестве номинальной величины объема принималось значение, полученное в результате контрольного взвешивания.

Таким образом, на основе выполненных исследований, можно сделать следующие практические выводы:

- для складов сыпучих материалов до 300 тыс. м³ предпочтительнее использовать геодезический метод;
- при размере склада более 300 тыс. м³ целесообразнее использовать фотограмметрический метод, который практически сравним с геодезическим по точности, но при этом менее трудоемкий;
- при размере склада более 1 000 тыс. м³ точность фотограмметрического метода становится выше, чем геодезического;
- при отсутствии скуртованности складов или неправильной их форме целесообразнее использовать фотограмметрический метод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наземное лазерное сканирование: монография / А. В. Комиссаров, В. А. Середович, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
2. Гук А. П., Шляхова М. М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 51–60.
3. Карпов А. К., Середович А. В., Иванов А. В. Опыт применения наземного лазерного сканирования для определения объемов зерна на складских аграрных предприятиях // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. – С. 141–143.
4. Зуев Н. А., Кобзева Е. А. Использование беспилотных авиационных систем при проведении маркшейдерских работ на разработках открытого типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГГА, 2018. Т. 1. – С. 26–33.
5. Вьюнов М. В. Оценка использования возможности применения аэрофотосъемочных БПЛА для учета горных работ при добыче полезных ископаемых [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: http://config.com/files/pdf/презентации_2017/Вьюнов.pdf.
6. SenseFly. Building the future of quarry monitoring – using drones to boost safety & survey efficiency 2016 [Electronic recourse]. – Mode of access: https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/user-cases/2016/senseFly-Case-Study-Redbird.pdf.
7. Построение цифровой модели временных отвалов карьера Борок в программе Agisoft Photoscan / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов, А. Н. Нурмухаметова, А. И. Тарабукин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГГА, 2018. Т. 1. – С. 34–40.
8. Писарев В. С. Использование современных сканирующих систем на открытых горных выработках // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры «От идеи до внедрения» : сборник материалов международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 61–64.
9. Нурмухаметова А. Т. 3-мерное моделирование при подсчете объемов полезного ископаемого // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. – Томск, 2017. – С. 582–583.
10. Автоматизация маркшейдерских работ на руднике «Восход» / Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, А. З. Капасова, М. Б. Игемберлина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017.

XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 52–55.

11. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Бесимбаев Н. Г. Анализ точности геодезических измерений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 15–18.

12. Исследование возможности 3D моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ / О. Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова, А. С. Бедарев, А. О. Даулетова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 178–183.

13. Неволин А. Г., Медведская Т. М. К вопросу о влиянии ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров технологического оборудования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 16–27.

14. Никонов А. В., Чешева И. Н., Лифашина Г. В. К вопросу об определении постоянной поправки дальномера электронного тахеометра // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 54–61.

Получено 05.09.2019

© А. В. Комиссаров, Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, Е. П. Хлебникова, 2019

COMPARISON OF ACCURACY DETERMINATION OF BULK MATERIAL PILE VOLUMES BASED ON PICTURES FROM UNMANNED AIRCRAFT AND GEO-DESIGN MEASUREMENTS

Alexander V. Komissarov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Director of SIB-GEO-MAR LLC, phone: (383)361-01-59, e-mail: avkom82@mail.ru

Evgeny I. Avrunev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Director of the Institute of Cadastre and Environmental Management, phone: (383)344-31-73, e-mail: kadastr-204@yandex.ru

Kharyes K. Yambaev

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, 105064, Russia, D. Sc., Professor, Professor of Department of Geodesy, phone: (499)261-58-53, e-mail: yambaev@miigaik.ru

Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: e.p.hlebnikova@sgugit.ru

The article describes the methodology for modeling geodetic and photogrammetric data obtained from unmanned aerial vehicles to study the accuracy of determining the volume of bulk materials piles. As the modeling pattern was accepted a frustrum elliptic cone, which most closely reminds piled stores in shape. For modeling measurement results were used the error values, peculiar to each method. After modeling the measurement results, volumes were calculated based on the

construction of the TIN surface. Then the obtained results were compared with the ideal figure and the relative measurement error was calculated. As a result of the studies, it was found that the geodetic method for determining the volumes of bulk materials piles is more accurate for small volumes up to 300 thousand cubic meters, and for large sizes of piles it is more expedient to use the photogrammetric method, which is practically comparable with the geodetic in accuracy, but less time-consuming, and with a pile volume of more than 1000 thousand cubic meters, the accuracy of the photogrammetric method becomes higher than the geodetic one.

Key words: geodetic method, photogrammetric method, determination of volumes, modeling, accuracy, relative error, bulk materials piles.

REFERENCES

1. Komissarov, A. V., Seredovich, V. A., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Terrestrial laser scanning [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].
2. Guk, A. P., & Shlyakhova, M. M. (2015). Some of the problems of constructing a realistic measurement of 3D models for remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 51-60 [in Russian].
3. Karpov, A. K., Seredovich, A. V., & Ivanov, A. V. (2009). Experience of using terrestrial laser scanning to determine the volumes of grain for storage of agricultural enterprises. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2009: Vol. 1, Part 1]* (pp. 141–143). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
4. Zuev, N. A., & Kobzeva, E. A. (2018). The use of unmanned aerial systems during surveying operations on open type developments. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: Vol. 1. International Scientific Conference: Surveying, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 26–33). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
5. Vyunov, M. V. (2017). Evaluation of the use of the possibility of using aerial photography UAVs for accounting mining operations in the extraction of minerals. Retrieved from http://config.com/files/pdf/presentations_2017/Vyunov.pdf.
6. SenseFly. (2016). Building the future of quarry monitoring - using drones to boost safety & survey efficiency. Retrieved from https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/user-cases/2016/senseFly-Case-Study-Redbird.pdf.
7. Pisarev, V. S., Akhmedov, B. N., Nurmukhametova, A. N., & Tarabukin, A. I. (2018). Construction of a digital model of temporary dumps of Borok open pit in the Agisoft Photoscan. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: Vol. 1. International Scientific Conference: Surveying, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 34–40). Novosibirsk: SSUGT Publ. [In Russian].
8. Pisarev, V. S. (2015). Using modern scanning systems at open pits. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry "Ot idei do vnedreniya" [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastres "From Idea to Implementation"]* (pp. 61–64) [in Russian].
9. Nurmukhametova, A. T. (2017). Three-dimensional modeling in calculating mineral volumes. In *Sbornik trudov XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M. I. Kuchina: Problemy geologii i osvoeniya nedr [Proceedings of XXI International Symposium*

Named after Academician M. A. Usov of Students and Young Scientists Dedicated to the 130th Anniversary of the Professor M. I. Kuchin] (pp. 582–583). Tomsk [in Russian].

10. Khmyrova, E. N., Besimbaeva, O. G., Kapasova, A. Z., & Igemberlina, M. B. (2017). Automation of mine surveying works at the Voskhod mine. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: Vol. 1. International Scientific Conference: Surveying, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 52–55). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

11. Besimbaev, O. G., Khmyrova, E. N., & Besimbaev, N. G. (2014). Analysis of the accuracy of geodetic measurements. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography], 5, 15–18 [in Russian].

12. Besimbaeva, O. G., Khmyrova, E. N., Bedarev, A. S., & Dauletova, A. O. (2014). Investigation of the possibility of 3D modeling for surveying support for mining operations. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: Vol. 2. International Scientific Conference: Surveying, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 178–183). Novosibirsk: SGGA Publ. [in Russian].

13. Nevolin, A. G., & Medvedskaya, T. M. (2019). The problem of initial data errors influence on the determination accuracy of technological equipment geometric parameters. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 24(1), 16–27 [in Russian].

14. Nikonov, A. V., Chesheva, I. N., & Lifashina, G. V. (2015). Determination of total station stadia constant. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 1(29), 54–61 [in Russian].

Received 05.09.2019

© A. V. Komissarov, E. I. Avruney, Kh. K. Yambaev, E. P. Khlebnikova, 2019