

А. А. Гребенников^{1✉}, И. Т. Андреев¹

Исследование точности определения объема штабеля сыпучих материалов способом мобильного лазерного SLAM сканирования

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleshenka.grebennikov@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования точности определения объема штабеля сыпучих материалов с применением технологии мобильного лазерного SLAM сканирования. В ходе полевых работ выполнена серия измерений штабеля дробленой рудной массы фракции 100 +40 с использованием мобильного лазерного сканера Goslam RS300. В исследовании выполнялось моделирование трехмерных цифровых моделей штабеля на основе облаков точек, их последующий анализ и сравнение рассчитанных объемов. Было выявлено, что при использовании способа мобильного лазерного SLAM сканирования расхождение между рассчитанными объемами не превышает 0.5 % от объема штабеля. При этом существенно сокращается время на определение объема по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: штабель сыпучих материалов, определение объема, мобильное лазерное SLAM сканирование, трехмерная цифровая модель, облако точек, Goslam LidarWorks, анализ результатов

A. A. Grebennikov^{1✉}, I. T. Andreev¹

Research on the accuracy of determining the volume of a pile of loose materials using mobile laser SLAM scanning

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleshenka.grebennikov@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study on the accuracy of determining the volume of a bulk material stockpile using mobile laser scanning technology. During fieldwork, a series of three measurements of a crushed ore mass stockpile with a fraction of 100 +40 was performed using the Goslam RS300 mobile laser scanner. The study involved modeling three-dimensional digital models of the stockpile based on point clouds, their subsequent analysis, and comparison of the calculated volumes. It was found that when using the mobile laser scanning method, the discrepancy between the calculated volumes does not exceed 0.5% of the stockpile volume, while significantly reducing the time required to determine the volume compared to traditional methods.

Keywords: bulk material stack, volume determination, mobile laser scanning, three-dimensional digital model, point cloud, Goslam LidarWorks, result analysis

Введение

Определение объема штабелей сыпучих материалов с необходимой точностью является важной задачей для горнодобывающей, строительной, металлургической и сельскохозяйственной отраслей. Ошибки в оценке запасов напрямую могут повлиять на финансовые показатели и логистику предприятия в целом. В

последнее время большое распространение получили наземные и мобильные лазерные сканирующие системы, позволяющие получать плотное облако точек на этапе полевых работ [1]. После выполнения измерений, последующей камеральной обработки плотного облака точек и моделирования получается трехмерная цифровая модель объекта. Особое внимание получают мобильные лазерные сканеры с технологией SLAM, позволяющие определять свое местоположение и отстраивать плотное облако точек окружающей среды в реальном времени [2–4].

Целью исследования является анализ точности определения геометрического объема штабеля сыпучих материалов способом мобильного лазерного SLAM сканирования. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить мобильное лазерное SLAM сканирование одного и того же штабеля сыпучих материалов серией измерений с одинаковым временным интервалом.
2. Выполнить камеральную обработку облаков точек и моделирование трехмерных цифровых моделей штабеля в программном комплексе (ПК) Goslam LidarWorks.
3. Определить объем штабеля по смоделированным трехмерным цифровым моделям в ПК Datamine Studio RM.
4. Выполнить сравнение и анализ полученных данных.

Методы и материалы

Мобильное лазерное SLAM сканирование и определение объема штабеля сыпучих материалов выполняется по технологической схеме, представленной на рис. 1.

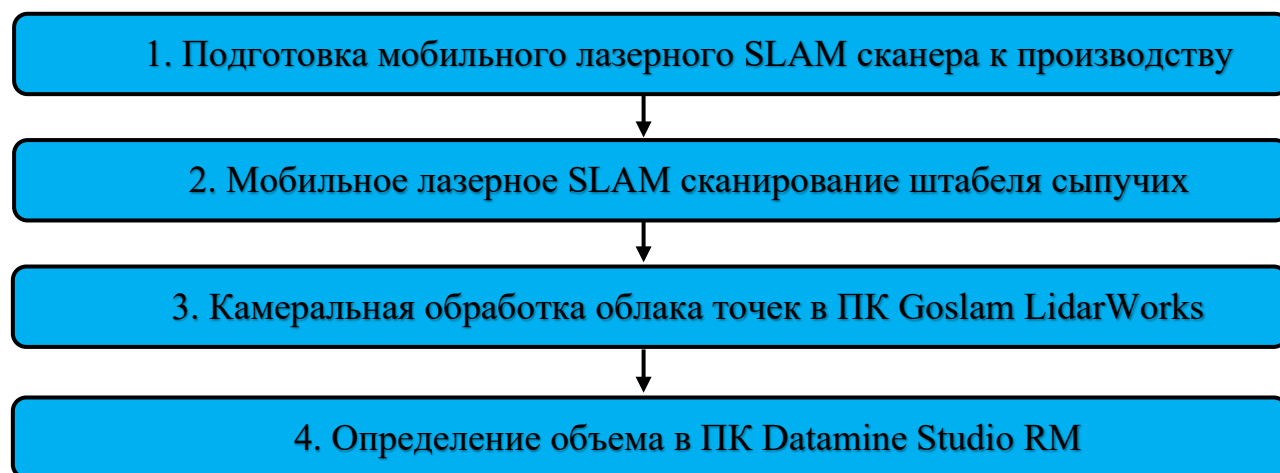


Рис. 1. Технологическая схема производства мобильного лазерного SLAM сканирования и определения объема штабеля сыпучих материалов

При выполнении мобильного лазерного SLAM сканирования необходимо обойти штабель вокруг, далее подняться на штабель и пройти по верхней бровке [5, 6]. Если штабель имеет большой размер, то необходимо добавить в траекто-

рию движения линию по середине штабеля, чтобы захватить всю область и исключить появление пустот (незасканированных областей) в облаке точек.

На рис. 2 представлен типовой маршрут выполнения мобильного лазерного SLAM сканирования для штабеля сыпучих материалов.



Рис. 2. Типовой маршрут выполнения мобильного лазерного SLAM сканирования для штабеля сыпучих материалов

После мобильного лазерного SLAM сканирования выполняется экспорт облака точек и файла привязки из накопителя данных.

Далее рассмотрим методику камеральной обработки облака точек с использованием программного комплекса Goslam LidarWorks, которая выполняется в следующей последовательности.

1. Импорт облака точек и файла привязки в программный комплекс.
2. Сегментация необходимой области облака точек, где находится штабель сыпучих материалов.
3. Фильтрация и удаление «шумов» с облака точек в автоматическом режиме.
4. Преобразование координат и высот облака точек в местную систему координат и высот [7].
5. Вычисление и ориентирование нормалей по облаку точек.
6. Моделирование трехмерной цифровой модели по алгоритму реконструкции поверхности Пуассона с выбором глубины октодерева.
7. Экспорт трехмерной цифровой модели в формате «.dxf» для определения объема.

Результаты

В ходе исследования было выполнено мобильное лазерное SLAM сканирование в количестве трех раз с интервалом два часа. В качестве объекта съемки был выбран штабель дробленой рудной массы фракции 100 +40. Мобильное лазерное SLAM сканирование штабеля выполнялось лазерным сканером Goslam

RS300 в режиме «на рюкзаке», с применением спутникового приемника «SinoGNSS T30». Производитель заявляет точность измерений (определения координат) данным сканером не хуже 10 мм. В качестве базовой станции был использован спутниковый приемник «EFT S2». Расстояние от базовой станции до штабеля, где выполнялось мобильное лазерное SLAM сканирование, равняется 300 м. Съемка основания под штабелем рудной массы была произведена в день отсыпки и формирования штабеля способом ГНСС-технологий в кинематическом режиме с шагом съемки от 3 до 5 м с использованием спутникового приемника «EFT M4 GNSS».

На рис. 3 представлена трехмерная цифровая модель штабеля, смоделированная в ПК Goslam LidarWorks по алгоритму реконструкции поверхности Пуассона с глубиной октодеревя, равной 9.

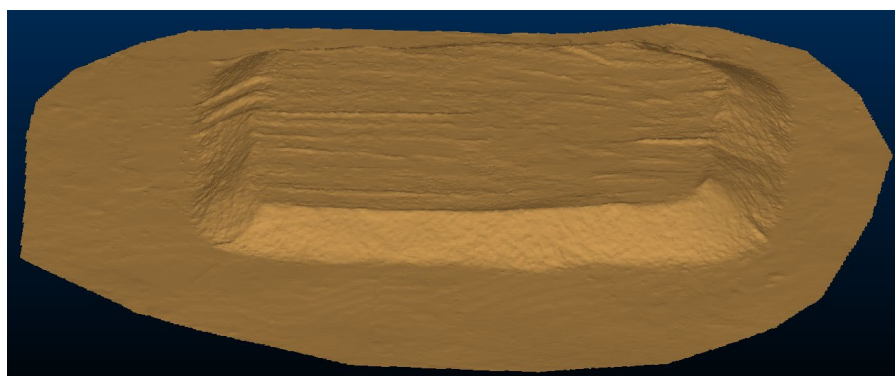


Рис. 3. Трехмерная цифровая модель штабеля

После импорта трехмерной цифровой модели в ПК Datamine Studio RM (рис. 3) была выполнена отрисовка 3D-полилинией границы штабеля по нижней бровке и «обрезка» по этой границе.

На рис. 4, *а* представлен фрагмент цифровой модели штабеля до «обрезки» и после «обрезки» (рис. 4, *б*).

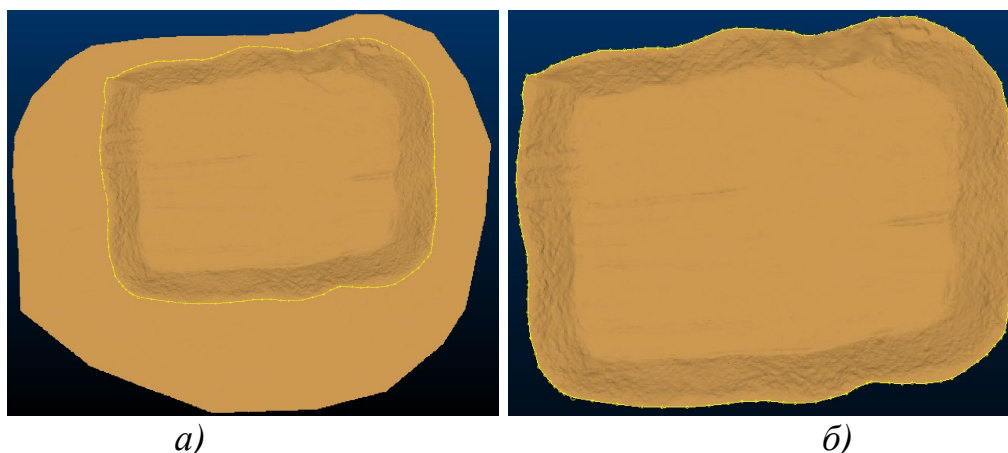


Рис. 4. Трехмерная цифровая модель штабеля (вид сверху):
а) до «обрезки»; *б)* после «обрезки»

На рис. 5 представлены три трехмерные цифровые модели штабеля, смоделированные по соответствующим лазерному сканированию облакам точек

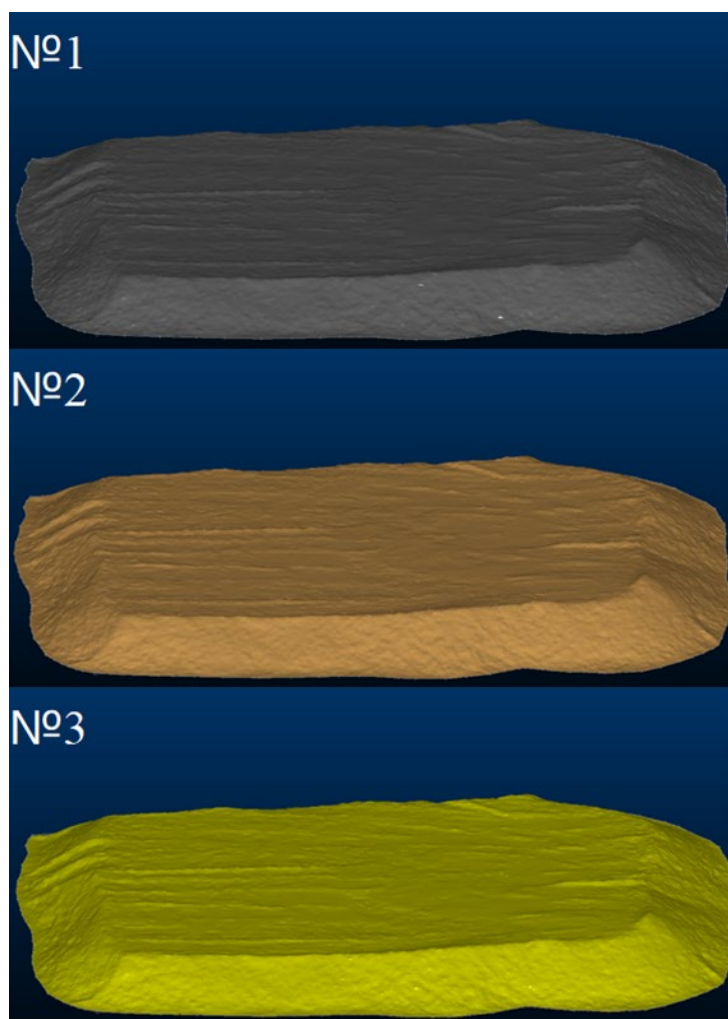


Рис. 5. Трехмерные цифровые модели штабеля, смоделированные по соответствующим лазерному сканированию облакам точек

Как следует из рис. 5, трехмерные цифровые модели не имеют отличий, которые можно оценить даже визуально. Далее выполняется определение объема штабеля и оценка точности по внутренней сходимости. Исходными данными являются трехмерная цифровая модель основания под штабелем и трехмерные цифровые модели штабеля. После этого выбирается инструмент «Cut and Fill Volumes» («Объемы выемки и насыпи»), где во всплывающем диалоговом окне в поле «First surface» выбирается трехмерная цифровая модель основания под штабелем, а в поле «Second surface» выбирается трехмерная цифровая модель штабеля. После этого задается граница нижней бровки штабеля и выполняется определение объема [8–10].

В табл. 1 представлен сравнительный анализ результатов определения объема штабеля.

Таблица 1 – Анализ результатов определения объема штабеля

Номер трехмерной цифровой модели	1	2	3
Объем штабеля, м ³	839.2	836.7	834.7
$\Delta V = V_l - V_n , \text{ м}^3$		2.5	4.5
$V_{cp}, \text{ м}^3$		838.0	837.0
$\Delta V/V_{cp}, \%$		0.3	0.5

Исходным для расчета был принят объем трехмерной цифровой модели под номером 1. Исходя из данных табл. 1 расхождение между определенными объемами не превышает 0.5 % от объема штабеля. В соответствии с п. 105 (Приказ Ростехнадзора от 19.05.2023 N 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru> – Текст : электронный) допустимая ошибка определения объемов из двух и более независимых определений не должна превышать 2 % независимо от объема штабеля.

Заключение

В результате исследования было произведено мобильное лазерное SLAM сканирование в количестве трех раз с интервалом измерений в два часа. После полевых работ была произведена камеральная обработка облака точек и моделирование трехмерных цифровых моделей штабеля сыпучих материалов. В ходе анализа результатов определения объемов штабеля расхождение между рассчитанными объемами не превышает 0.5 % от объема штабеля, что свидетельствует о возможности применения данного оборудования для определения объемов сыпучих материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гура Д. А. Использование мобильных лазерных сканеров, установленных в рюкзак, при мониторинге объектов инфраструктуры / Гура Д. А., Марковский И. Г. // Современные проблемы и перспективы развития земельно-имущественных отношений : Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 24 апреля 2020 года / Отв. за выпуск Е.В. Яроцкая. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 360–364.
2. Kim I. H., Lim D. W., Jung J. W. Single-camera-based sand volume estimation of an excavator bucket // Multimedia Tools Appl. – 2019. – No. 78. – Pp. 5493–5522. – DOI 10.1007/s11042 019-7225-0.
3. Kiriak N. Development and implementation of technical decision for digital support of construction using photogrammetry methods // Nuclear Engineering and Design 16 July 2021. – DOI 10.1016/j.nucengdes.2021.111366. – EDN HKDIFP.
4. Tucci G., Gebbia A., Conti A., Fiorini L., Lubello C. Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying // Remote Sens. – 2019. – 11 (12). – P. 1471. – DOI 10.3390/rs11121471.
5. Комиссаров, А. В., Аврунев Е. И., Ямбаев Х. К., Хлебникова Е. П. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическим измерениям // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 70–77 – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77. – EDN CCMBWM.
6. Середович, В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск : СГГА, 2009. 261 с.

7. Гребенников, А. А. Применение мобильного лазерного сканера Goslam RS300 при выполнении маркшейдерско-геодезических работ на месторождениях, разрабатываемых открытым способом / А. А. Гребенников // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 1, № 1. – С. 48–58. – DOI 10.33764/2618-981X-2025-1-1-48-58. – EDN PIRUON.
8. Гребенников, А. А. Сравнение различных программных комплексов при подсчете объемов рудного штабеля / А. А. Гребенников // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 1. – С. 44–53. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-44-53. – EDN TRPKNI.
9. Сальников В.Г., Басаргин А.А., Астапов А.М. Анализ способов подсчета объемов штабеля сыпучих материалов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 9 т. Т. 1. (Новосибирск. 2019 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – С. 203–211.
10. Токин, А. А., Шоломицкий, А. А. Методика автоматизированной съемки и подсчета объемов сыпучих материалов на складах // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 31–40. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-31-40.

© А. А. Гребенников, И. Т. Андреев, 2026