

*Р. Е. Калиакпаров*¹✉

Выбор метода съёмки и определение объёмов рудных складов различной фракции

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kaliakparov1@vk.com

Аннотация. В работе выполнен анализ эффективности применения наземной GNSS-съёмки и аэрофотосъёмки с использованием беспилотных авиационных систем (БАС) при определении объёмов рудных складов различной фракции. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности, безопасности и оперативности маркшейдерских работ при учёте складских запасов. Рассмотрены особенности формирования складов с мелкой и негабаритной фракцией, влияющие на выбор метода съёмки. Установлено, что GNSS-съёмка обеспечивает точность до 2–3 см и эффективна для небольших складов с устойчивой поверхностью, однако характеризуется высокой трудоёмкостью и ограничениями по безопасности. Аэрофотосъёмка с применением БАС позволяет сократить время съёмки в 2–3 раза, обеспечивает точность на уровне 3–7 см и полностью исключает необходимость нахождения оператора на объекте. В результате сравнительного анализа определены области рационального применения методов и обоснована целесообразность их комбинирования.

Ключевые слова: GNSS-съёмка, аэрофотосъёмка, БАС, рудные склады, объём, фотограмметрия

*R. E. Kaliakparov*¹✉

Selection of survey method and volume determination of ore stockpiles with different fractions

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kaliakparov1@vk.com

Abstract. The paper analyzes the efficiency of terrestrial GNSS survey and UAV-based aerial photogrammetry for volume determination of ore stockpiles with different particle size distributions. The relevance of the study is обусловлена the need to improve accuracy, safety, and efficiency of mine surveying operations in stockpile inventory control. The characteristics of fine-grained and oversized ore stockpiles affecting the choice of survey method are considered. It is established that GNSS surveying provides accuracy up to 2–3 cm and is effective for small stockpiles with stable surfaces, but is labor-intensive and limited by safety conditions. UAV-based photogrammetry reduces survey time by 2–3 times, provides accuracy at the level of 3–7 cm, and eliminates operator exposure to hazardous zones. As a result, the optimal application areas of each method are defined and the feasibility of their combined use is justified.

Keywords: GNSS survey, UAV photogrammetry, stockpiles, volume calculation, geodesy

Введение

Определение объёмов рудных складов является одной из основных задач маркшейдерского обеспечения, горнодобывающих предприятий. Результаты съёмки используются при учёте добытой и переработанной руды, контроле дви-

жения горной массы, а также при формировании производственной отчётности. Ошибки при определении объёмов складываемого материала могут приводить к искажению данных оперативного учёта, что особенно заметно при значительных объёмах складирования [1].

Формирование рудных складов происходит в результате процессов дробления, транспортировки и складирования, вследствие чего их поверхность приобретает различный характер в зависимости от фракционного состава материала. При мелкой фракции (до 100–200 мм) частицы распределяются относительно равномерно, формируя сглаженный рельеф с незначительными перепадами высот [2]. Наличие негабаритных включений (более 300–500 мм), напротив, приводит к образованию выраженного микрорельефа с локальными перепадами до 1–2 м, выступами и зонами потенциальной неустойчивости [3]. Такие особенности существенно влияют на плотность съёмки и точность построения цифровых моделей поверхности.

В инженерной практике для определения объёмов складов традиционно применяется наземная GNSS-съёмка, обеспечивающая высокую точность координат характерных точек на уровне $\pm 2\text{--}3$ см [4]. Однако данный метод требует непосредственного перемещения оператора по поверхности склада, что при увеличении его размеров и усложнении геометрии приводит к росту трудоёмкости и снижению уровня безопасности работ. Практика показывает, что съёмка склада площадью порядка 1000 м² занимает в среднем 15–30 минут, при этом увеличение плотности измерений приводит к пропорциональному росту времени выполнения работ [5].

Развитие дистанционных методов измерений обусловило широкое внедрение аэрофотосъёмки с использованием беспилотных авиационных систем. Данный подход позволяет выполнять съёмку без физического контакта с объектом, обеспечивая равномерное покрытие поверхности, включая труднодоступные участки. При высоте полёта 80–120 м и наземном разрешении 2–3 см/пиксель формируются цифровые модели поверхности с точностью порядка 3–7 см, что соответствует требованиям производственного учёта [6]. При этом время полевых работ сокращается до 5–10 минут, а последующая обработка данных выполняется в специализированных фотограмметрических программных комплексах.

Несмотря на развитие технологий, выбор метода съёмки в каждом конкретном случае определяется не только требуемой точностью, но и морфологией склада, условиями доступа и требованиями безопасности. Для объектов со сложной геометрией и наличием негабаритной фракции применение наземных методов может приводить к снижению достоверности результатов из-за ограничений по плотности съёмки, тогда как дистанционные методы позволяют более полно воспроизводить поверхность объекта [7, 8].

Цель работы – анализ эффективности применения наземной GNSS-съёмки и аэрофотосъёмки с использованием беспилотных авиационных систем при определении объёмов рудных складов различной фракции и обоснование областей их рационального применения.

Методы и материалы

В качестве объектов исследования рассмотрены два рудных склада, различающиеся гранулометрическим составом материала и особенностями поверхности. Первый склад был сформирован рудой мелкой фракции с объёмом около 3000 м³, второй – рудой с наличием негабаритных включений и объёмом около 12000 м³.

Фракционный состав материала определялся по технологическим характеристикам дробления, принятым на предприятии. Для склада мелкой фракции размер кусков преимущественно не превышал 100–200 мм. За счёт относительно плотной укладки материала формировалась поверхность с плавным изменением высотных отметок и локальными перепадами высот не более 0,3–0,5 м (рис. 1). [2].



Рис. 1. Рудный склад с мелкой фракцией

Для склада негабаритной фракции характерно наличие отдельных кусков размером более 300–500 мм, формирующих выраженный микрорельеф поверхности. В результате на отдельных участках наблюдались локальные перепады высот до 1–2 м, выступающие элементы рудной массы и зоны с ограниченной проходимостью (рис. 2).



Рис. 2. Рудный с негабаритными включениями

Для съёмки складов с мелкой фракцией применялась наземная GNSS-съёмка с использованием геодезических приёмников, обеспечивающих точность определения координат характерных точек на уровне $\pm 2-3$ см [4]. Съёмка выполнялась в кинематическом режиме с последовательной фиксацией точек по контуру и поверхности насыпи. Плотность съёмки определялась визуально по изменению рельефа и составляла в среднем 1 точку на $1-2$ м². При таких параметрах съёмка склада площадью порядка $500-1000$ м² занимает от 15 до 30 минут в зависимости от сложности поверхности.

Для складов с негабаритной фракцией использовалась аэрофотосъёмка с применением беспилотных авиационных систем. Съёмка выполнялась с высоты $80-120$ м при продольном перекрытии снимков 80% и поперечном – 70%, что обеспечивало наземное разрешение (GSD) порядка 2–3 см/пиксель [6]. Полученные изображения обрабатывались в фотограмметрическом программном обеспечении с построением плотного облака точек и цифровой модели поверхности [7].

Расчёт объёмов в обоих случаях выполнялся в программном комплексе GEOVIA Surpac на основе триангуляционных моделей поверхности (TIN). Для этого использовался метод определения объёма между поверхностью склада и базовой плоскостью. В качестве базовой поверхности принималась горизонтальная плоскость, соответствующая уровню основания склада.

Для оценки воспроизводимости результатов выполнялась повторная съёмка исследуемых складов с использованием той же методики и последующим повторным расчётом объёмов. Контроль проводился отдельно для каждого объекта исследования. Результаты основной и контрольной съёмок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты основной и контрольной съёмок

Объект	Метод съёмки	Основная съёмка, м ³	Контрольная съёмка, м ³	Расхождение, %
Склад мелкой фракции	GNSS	3000	2910	3
Склад негабаритной фракции	БАС	12000	11520	4

Сопоставление полученных объёмов показало, что расхождения между результатами измерений составили 3,0 % для склада мелкой фракции и 4,0 % для склада с негабаритными включениями. Увеличение расхождения для второго объекта связано с более сложной морфологией поверхности, наличием выраженного микрорельефа и большей площадью склада. Полученные результаты свидетельствуют о достаточной воспроизводимости измерений и подтверждают возможность применения выбранных методов для определения объёмов рудных складов различной фракции.

Результаты

Проведённый анализ показал, что эффективность применения методов съёмки существенно зависит от морфологии рудного склада и характера его поверхности. Для складов с мелкой фракцией GNSS-съёмка обеспечивает высокую

точность за счёт возможности непосредственного определения координат характерных точек поверхности. При равномерном распределении точек с плотностью порядка 1–2 м² на одну точку формируется достаточно детализированная модель, позволяющая корректно воспроизводить геометрию насыпи. При этом отклонения в расчёте объёма, полученные по результатам повторных съёмок, не превышают 2–3%, что соответствует нормативным требованиям [4].

С увеличением размеров склада и усложнением его рельефа наблюдается рост трудоёмкости GNSS-съёмки. В частности, при увеличении площади объекта до 2000 м² и более время выполнения работ возрастает до 40–60 минут за счёт необходимости повышения плотности измерений и обхода труднодоступных участков. При этом в зонах с резкими перепадами высот и наличием негабаритных включений формирование равномерной сети точек затруднено, что приводит к локальному снижению точности модели [5].

Для складов с негабаритной фракцией применение аэрофотосъёмки демонстрирует более устойчивые результаты. Съёмка таких объектов выполняется в течение 5–10 минут, при этом обеспечивается полное покрытие поверхности независимо от сложности рельефа. Полученные в результате фотограмметрической обработки модели содержат плотное облако точек, позволяющее детализированно воспроизводить геометрию поверхности, включая труднодоступные зоны. Плотность облака точек при стандартных параметрах съёмки достигает 200–400 точек на м², что существенно превышает плотность наземных измерений [6, 7].

Сравнение результатов расчёта объёмов, полученных различными методами, показало, что расхождение между GNSS-съёмкой и аэрофотосъёмкой для контрольных объектов не превышает 3–5%. При этом для складов со сложной геометрией фотограмметрический метод демонстрирует более стабильные результаты за счёт равномерного покрытия поверхности и отсутствия пропусков в данных. Характерно, что при недостаточной плотности GNSS-точек наблюдается тенденция к сглаживанию рельефа, что может приводить к занижению объёма [8].

Дополнительно установлено, что основное преимущество аэрофотосъёмки проявляется при увеличении площади и сложности объекта. При площади складов свыше 1500–2000 м² применение БАС позволяет сократить общее время выполнения работ (включая полевые и камеральные этапы) в среднем в 2–3 раза по сравнению с наземной съёмкой. При этом точность определения объёма остаётся в пределах, допустимых для производственного учёта [6].

Полученные результаты подтверждают, что при выборе метода съёмки необходимо учитывать не только требуемую точность, но и геометрию объекта, поскольку именно этот фактор в наибольшей степени влияет на полноту и достоверность исходных данных.

Заключение

В ходе выполненного исследования проанализирована эффективность применения наземной GNSS-съёмки и аэрофотосъёмки с использованием беспилотных авиационных систем при определении объёмов рудных складов различной фракции. Рассмотрение объектов с различной морфологией показало, что решающим фактором при выборе метода является не только требуемая точность, но и характер поверхности, определяемый фракционным составом материала.

Для складов с мелкой фракцией (до 100–200 мм), характеризующихся сглаженной поверхностью и перепадами высот, как правило, не превышающими 0,3–0,5 м, применение GNSS-съёмки обеспечивает получение устойчивых результатов с точностью порядка ± 2 –3 см. При плотности измерений около 1 точки на 1–2 м² формируется цифровая модель, позволяющая определять объём с погрешностью не более 2–3%. В то же время трудоёмкость метода остаётся значительной: съёмка складов площадью 500–1000 м² занимает 15–30 минут, а при увеличении площади до 2000 м² и более время работ возрастает до 40–60 минут.

Для складов с негабаритной фракцией (более 300–500 мм), обладающих сложной геометрией и перепадами высот до 1–2 м, применение наземной съёмки ограничивается условиями доступа и безопасностью выполнения работ. В этих условиях аэрофотосъёмка с использованием БАС обеспечивает более полное и равномерное покрытие поверхности. При времени полевых работ 5–10 минут формируется цифровая модель с точностью 3–7 см, а расхождение результатов расчёта объёма по сравнению с наземными методами не превышает 3–5%.

Сравнительный анализ показал, что при увеличении площади складов свыше 1500–2000 м² применение аэрофотосъёмки позволяет сократить общее время выполнения работ в 2–3 раза при сохранении требуемой точности. Дополнительным преимуществом метода является исключение необходимости нахождения оператора на поверхности склада, что существенно повышает безопасность работ.

Полученные результаты показывают, что применение единого метода съёмки для всех типов складов не является эффективным. Для объектов с простой геометрией целесообразно использовать GNSS-съёмку, тогда как для складов со сложной структурой и негабаритной фракцией предпочтение следует отдавать аэрофотосъёмке. На практике наибольшую эффективность обеспечивает комбинированный подход, при котором выбор метода определяется конкретными условиями съёмки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по производству маркшейдерских работ при добыче твёрдых полезных ископаемых. – Республика Казахстан, 2009. – 509 с.
2. Беляев А. Н. Фотограмметрия и дистанционное зондирование в горном производстве. – СПб.: Горный университет, 2020. – 248 с.
3. Захаров В. И. Применение беспилотных авиационных систем для аэрофотосъёмки горных объектов // Геодезия и картография. – 2019. – № 6. – С. 45–52.
4. Карпов С. В. Использование GNSS-технологий при съёмке и контроле складских запасов // Вестник горного университета. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 112–119.
5. Лебедев М. Ю., Сидоров И. В. Цифровые модели местности в задачах горного производства // Автоматизация и телемеханика в горной промышленности. – 2022. – № 2. – С. 56–64.
6. Agisoft LLC. Metashape User Manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.agisoft.com> (дата обращения: 21.03.2026).
7. DJI. Phantom Series User Manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.dji.com> (дата обращения: 21.03.2026).
8. Trimble Inc. GNSS Surveying Systems Overview [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.trimble.com> (дата обращения: 21.03.2026).

© П. Е. Калиакпаров, 2026