ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11-1):305-321
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_305

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА СКЛАДОВ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Е.А. Волошина[1], С.Ю. Новоженин[1], С.К. Келехсаев[2]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru
[2] ООО «Карьерпроект», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Рассмотрен вопрос обоснования применения беспилотных летательных аппаратов (беспилотных воздушных судов, БВС) для съемки складов общераспространенных полезных ископаемых в качестве независимого способа определения объема наряду с традиционными способами съемки складов: с применением электронных тахеометров и съемкой спутниковыми системами. В качестве научного эксперимента были проведены натурные исследования – съемка двадцати разновеликих складов песка (объемом от 300 до 60 000 м^3) двумя способами: с применением GNSS-систем (Global Navigation Satellite System, использовался спутниковый приемник Topcon Hiper SR) и БВС (квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2). Детально рассмотрена процедура обработки данных, полученных с квадрокоптера, в программном комплексе Agisoft Metashape. С помощью специализированных программных комплексов рассчитаны значения объемов складов, определены расхождения. Построены графики зависимости расхождений в определении объема склада между двумя способами съемки от объемов склада. В ходе исследования также произведено сравнение цифровых моделей, построенных двумя способами – по плотному и разреженному облаку точек. Установлено, что для корректного определения контура склада по модели следует использовать цифровую модель, построенную по плотному облаку точек, имеющую разрешение 5 пикс/см.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, спутниковый приемник, маркшейдерская съемка, опознак, открытые горные работы, карьер, склад полезного ископаемого, цифровая модель, триангуляционная поверхность, подсчет объемов.

Для цитирования: *Волошина Е. А., Новоженин С. Ю., Келехсаев С. К.* Обоснование применения беспилотных летательных аппаратов для определения объема складов полезного ископаемого // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 305–321. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_305.

Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages

E.A. Voloshina[1], S.Yu. Novozhenin[1], S.K. Kelekhsaev[2]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru
[2] Karierproekt LLC, Saint-Petersburg, Russia

© Е.А. Волошина, С.Ю. Новоженин, С.К. Келехсаев. 2023.

Abstract: The substantiation of use of unmanned aerial vehicles (UAV) in the common mineral storage photography as an independent method of storage volume evaluation alongside with the conventional techniques using electronic tacheometers and satellite systems is discussed. The scientific experiment included an in-situ test—surveying of twenty different-size warehouses of sand (volume from 300 to 60 000 m^3) using two methods: GNSS-systems (Global Navigation Satellite System, satellite receiver Topcon Hiper SR) and UAV (quadcopter DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2). The processing procedure of the quadcopter data in the environment Agisoft Metashape is comprehensively described. Using special software packages, volumes of the test storages are calculated, and divergences are determined. The curves of the divergences in the storage volumes evaluated using two survey methods as functions of the storage volumes are plotted. During the research, the digital models constructed using two methods of dense and scattered point clouds were compared. It is found that for the correct outlining of a mineral storage in modeling, it is expedient to use the model constructed using the dense point cloud with the resolution of 5 pixels/cm.

Key words: unmanned aerial vehicle, satellite receiver, surveying, topobeacon, open pit mining, quarry, mineral storage, digital model, triangulation surface, volume evaluation.

For citation: Voloshina E. A., Novozhenin S. Yu., Kelekhsaev S. K. Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):305-321. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_305.

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты, а именно квадрокоптеры с модулем RTK, прочно вошли в маркшейдерскую практику обеспечения открытых горных работ [1—3]. Это связано с тем, что такие квадрокоптеры позволяют повысить производительность и безопасность работ в сравнении с классическими приборами (тахеометрами, лазерно-сканирующими системами и спутниковыми системами) [4—6] и при этом достичь высокой точности получаемого результата — цифровых моделей, построенных по снимкам. Использование перечисленных методов широко представлено в соответствующей литературе [7—10].

Высокая производительность БВС обусловлена возможностью захватить большую площадь измеряемой местности за сравнительно небольшое время. Кроме того, инженер, использующий квадрокоптеры для выполнения маркшейдерских съемок карьеров, не обязан находиться в непосредственной близости к горным работам, что заметно повышает безопасность выполнения маркшейдерских работ. Наконец, установленная на борту квадрокоптера фотоаппаратура позволяет достичь точности, требуемой для решения задач обеспечения горного производства.

Несмотря на описанные выше преимущества беспилотных летательных аппаратов перед классическими средствами измерений, в Российской Федерации на сегодняшний день отсутствует нормативно-правовая база маркшейдерского обеспечения горных производств при помощи БВС [11—13]. Однако существует ряд различных исследований по теме применения геодезических квадрокоптеров в горном деле [14—19].

Формирование и обоснование методики применения геодезического квадрокоптера для маркшейдерской съемки карьера описано в работах А.А. Блищен-

ко и др. [20—27]. Технологическая схема применения DJI Phantom 4 при проведении маркшейдерских работ на разработках открытого типа, а также результаты ее использования при выполнении работ по созданию топографической продукции представлены в статье А.А. Зуева и А.А. Кобзева [28]. Новые технологии могут позволить оптимизировать работу горнопромышленной техники на карьерах [29—32].

В работах Д.С. Коровина, О.С. Колесатова, А.В. Красавина, Т.С. Афанасьева, Е.О. Сухачева описывается методика определения объема складов на основе результатов аэрофотограмметрической съемки с помощью БПЛА, например, [33].

Сравнению современных методов определения объемов добытых полезных ископаемых, в том числе с помощью геодезических квадрокоптеров, посвящена статья С.Р. Ванеева и М.В. Ванеевой [34].

В статье А.В. Комиссарова, Е.И. Аврунева, Х.К. Ямбаева, Е.П. Хлебникова изложена методика моделирования геодезических и фотограмметрических данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для исследования точности определения объемов складов сыпучих материалов [35].

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что вопрос обоснования применения беспилотных технологий для маркшейдерских съемок на карьерах, а также для определения объема складов имеет потенциал для дальнейшего изучения.

Достоверный учет извлекаемых запасов полезного ископаемого на месторождении является одной из главных задач маркшейдерского обеспечения горных работ. Контроль объемов добычи на горных предприятиях, реализующих открытый способ разработки, ведут на основе маркшейдерских съемок горных выработок, а также съемок вынутого полезного ископаемого, которое чаще всего хранится в складах. Согласно п. 44 РД 07-604-03 «Инструкции по маркшейдерскому учету объема горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом», съемка отвала полезного ископаемого производится дважды. В случае выявления изменения формы отвала необходима контрольная съемка.

Существуют различные методы съемки складов полезного ископаемого и подсчета их объемов, применяемые на открытых горных работах:

- при помощи тахеометра с последующим подсчетом способом среднего арифметического;
- при помощи спутниковых навигационных систем с обработкой результатов съемки в Autodesk Civil 3D;
- с использованием квадрокоптеров и специализированного ПО Agisoft Metashape.

Исходя из того, что существует несколько методов определения объема складов, важно определить, насколько могут различаться результаты вычисления объема, полученные разными методами съемки для одних и тех же насыпных тел.

В соответствии с вышесказанным, цель исследования — определить, допустимо ли использование квадрокоптера в качестве метода маркшейдерской съемки складов полезного ископаемого на основе сравнения с методом геодезического спутникового оборудования.

Методы

Исходные данные для подсчета объемов были получены из результатов применения двух методов съемки: с помощью спутникового приемника и геодезического квадрокоптера. Определение объемов осуществлялось в Autodesk Civil 3D и Agisoft Metashape.

Исследование было проведено с использованием приборов, имеющих действительные метрологические поверки,

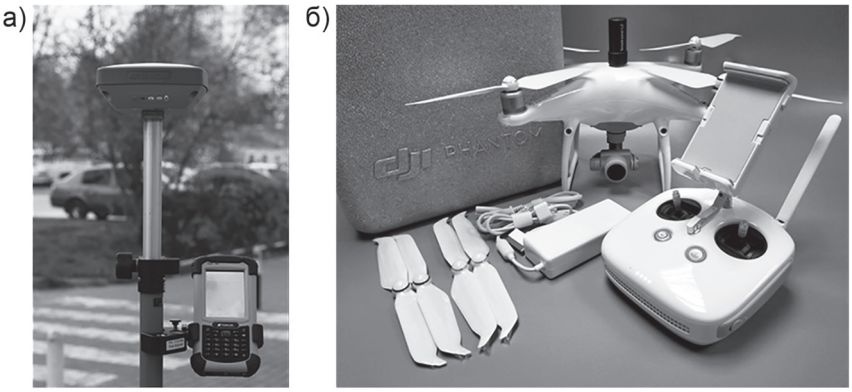


Рис. 1. Применяемое оборудование: GNSS-приемник Topcon Hiper SR (а); рабочий комплект квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 (б) [источники: www.topconpositioning.com, www.coptertime.ru]

Fig. 1. Equipment used: Topcon Hiper SR GNSS receiver (a); DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 quadcopter kit (b) [sources: www.topconpositioning.com, www.coptertime.ru]

и соответствующего сертифицированного программного обеспечения.

Натурные маркшейдерские съемки были выполнены при помощи спутникового приемника Topcon Hiper SR (рис. 1) в режиме RTK с последующей обработкой в ПО Autodesk Civil 3D и при помощи квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 (рис. 2) с обработкой съемки в Agisoft Metashape.

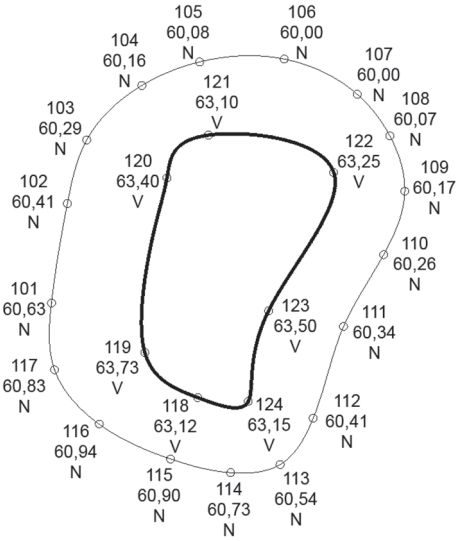


Рис. 2. Исходный файл съемки склада песка [составлено авторами]

Fig. 2. Sand storage source file [compiled by authors]

Технические характеристики используемых приборов представлены в табл. 1 и табл. 2 соответственно.

Маркшейдерская съемка складов с использованием GNSS-приемника Hiper SR осуществлялась в режиме RTK. Вешка устанавливалась на всех характерных точках с расстоянием между пикетами, необходимым для получения наглядной и отчетливой конфигурации геометрии снимаемых насыпных тел, но не более 10 м в соответствии с положением п. 51 РД 07-603-03 «Инструкции по производству маркшейдерских работ».

Спутниковые измерения производились в режиме RTK. Характеристики съемки следующие: эпоха измерений — 1 с, длительность измерений на точке — 5 с, маска возвышения — 10°, параметр PDOP — 8 и более, ошибка определения высоты приемника — 1 мм. Основой для измерений служили пункты опорной маркшейдерской сети.

В результате выполнения съемок были получены исходные данные, содержащие наборы съемочных точек для каждого исследуемого склада. Дальнейшая камеральная обработка полевых измерений производилась при помощи программного комплекса Autodesk Civil 3D.

Процесс вычисления объемов складов в Autodesk Civil 3D представлен на примере склада № 3 из рассматриваемых. Сначала производится экспорт данных из полевого контроллера (DXF-файл съемки). Контуры верхней и нижней бровок склада обведены сплайнами для наглядности (рис. 2).

Таблица 1

Технические характеристики GNSS-приемника Topcon Hiper SR [источник: www.topconpositioning.com]
Topcon Hiper SR GNSS receiver specifications [source: www.topconpositioning.com]

Отслеживаемые сигналы	GPS, ГЛОНАСС, SBAS, QZSS
Число каналов	226 универсальных
Точность	Статика, быстрая статика. В плане: 3 мм + + 0,5 мм/км; по высоте: 5 мм + 0,5 мм/км; RTK. В плане: 10 мм + 1,0 мм/км; по высоте: 15 мм + 1,0 мм/км
Ввод и вывод	TPS, RTCM SC104 v 2.x, 3.x; CMR/CMR+
Запись данных	во внутреннюю память, объем внутренней памяти — 4 Гб
Интерфейсы	Bluetooth, последовательный порт, USB порт
Защищенность	IP67
Период работы без подзарядки батареи	до 15 ч
Рабочая температура	от –20 °C до +65 °C (при работе от внутренних аккумуляторов)
Масса	850 г

Таблица 2

Технические характеристики квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 [источник: www.teodrone.ru]
Specifications of quadrocopter DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1 / L2 [source: www.teodrone.ru]

Назначение	**Автоматическое выполнение аэрофотосъемочных работ**
Камера	20 Мп
Взлет/посадка	вертикально в автоматическом режиме, в ручном режиме площадка 2×2 м
Тип двигателя	электрический / 4 двигателя
Площадь участка фотосъемки за 1 полет (высота 150 м, разрешение 4,0 см/пиксель, перекрытие 70% продольное и 50% поперечное)	0,5 км^2
Рекомендуемая допустимая скорость ветра	до 10 м/с
Скорость полета	0 — 72 км/ч
Максимальная влетная масса	1,388 кг
Габаритные размеры БВС	диагональное расстояние между двигателями 350 мм
Максимальная рабочая высота полета	500 м

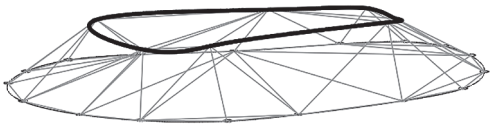


Рис. 3. Поверхность «Склад 3» [составлено авторами]
Fig. 3. Sand dump surface [compiled by the authors]

В программном комплексе Civil 3D для расчета объема используется универсальный метод трехгранных призм. Объемы рассчитываются между двумя TIN-поверхностями: базовой (например — цифровая модель поверхности месторождения) и поверхностью сравнения (например — цифровая модель существующего карьера, полученная в результате маркшейдерской съемки), каждая из которых представлена множеством плоских треугольников, образующих нерегулярную триангуляционную сеть (по методу триангуляции Делоне).

Пространство, замкнутое между двумя поверхностями, разбивается на совокупность трехгранных призм, основания которых расположены на базовой поверхности и поверхности сравнения, в результате чего образуется поверхность для вычисления объемов. Значение координаты *Z* поверхности для вычисления объемов рассчитывается как разность высотных отметок соответствующих точек исходных поверхностей. Таким образом, новая поверхность для вычисления объема является разностной для поверхности сравнения и базовой поверхности. Поверхность для вычисления объема склада № 3 была построена на основе двух TIN-поверхностей: «Основание», в которую были включены точки нижней бровки склада с кодом «N», и «Склад № 3», построенную с помощью всех точек исходной съемки склада. Кроме того, для уточнения контуров нижних и верхних бровок склада были построены полилинии, которые использовались как границы поверхностей.

Поверхность «Склад № 3» представлена на рис. 3.

Для построения результирующей поверхности был выбран тип поверхности «Поверхность TIN для вычисления объема» с названием «Объем склада 3», указаны базовая поверхность и поверхность сравнения: «Основание» и «Склад 3» соответственно.

В данной работе объемы складов вычислялись без учета исходной поверхности, на которой был сформирован рассчитываемый склад песка. Данное допущение принято исходя из того, что в ПО Agisoft Metashape, используемом для обработки результатов съемки с помощью квадрокоптера, нет возможности учета исходной поверхности. Однако в данной программе есть опция «аппроксимирующая плоскость», которая создает базовую поверхность нерегулярной сетью треугольников, что соответствует способу построения базовой поверхности в Autodesk Civil 3D.

Результат построения поверхности для вычисления объемов представлен на рис. 4. Данные об объеме полученной поверхности доступны во вкладке «Статистика» в разделе «Объем».

По результатам съемки, выполненной с помощью GNSS-приемника Topcon Hiper SR в режиме RTK, и вычисления объемов в Autodesk Civil 3D объем склада № 3 составил 762,5 м^3 в разрыхленном состоянии.

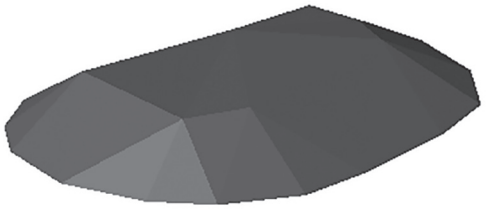


Рис. 4. Поверхность для вычисления объема склада № 3 [составлено авторами]
Fig.4. Surface for calculating the volume of sand dump № 3 [compiled by the authors]

Определение объемов складов по результатам съемки с помощью квадрокоптера

После съемки исследуемых складов спутниковым приемником была произведена съемка с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 в режиме управления GPS, при котором в автоматическом режиме выполняется съемка местности по программе полета БВС, заранее составленной в программе Pix4Dcapture.

Все съемки складов производились при следующих условиях: количество опознаков — 4 шт.; высота полета — 60 м; продольное перекрытие — 80%; поперечное перекрытие — 75%; режим камеры: A (приоритет диафрагмы); ISO — 100; режим съемки — пейзажная; размер и формат изображения — 3:2 JPG; баланс белого и раскрытие диафрагмы — в зависимости от условий.

Рассмотрим процесс обработки маркшейдерской съемки складов, представленный на примере вычисления объема склада № 3.

Перед началом съемки раскладываются два опознавательных знака (хорошо различимые и однозначно дешифрируемые объекты на местности, для которых определяются координаты). В данном случае использовались наземные номерные опознаки Geobox Oz-100 (рис. 5). Координаты центров опознаков были определены GNSS-приемником Topcon Hiper SR в режиме RTK.

Опознаки используются для контроля полученных данных, уточнения высоты модели и калибровки камеры в фотограмметрическом программном комплексе (Agisoft Metashape) и располагаются ближе к границам снимаемого участка в местах с наибольшей и наименьшей высотами.

Используемая съемочная система предполагает применение постобработки данных (Post-Processing Kinematic), которая заключается в процессе определения точных координат снимков с помощью ровера (мобильный приемник GNSS-сигнала, установленный на борту квадрокоптера) и базы (приемник, записывающий сырые данные, получаемые от спутников) с последующей корректировкой. Характеристики двухчастотного приемника квадрокоптера представлены в табл. 3.

В качестве базовой станции использовался спутниковый приемник Topcon Hiper SR, установленный на пункт опорной маркшейдерской сети карьера. Базовая станция обеспечивает возможность приема сырых данных от спутников с частотой 5 ГЦ, маска возвышения — 10°.

После установки опознаков и базовой станции производится сборка, запуск квадрокоптера и осуществляется съемка. После приземления квадрокоптера производится выгрузка сырых данных с приемника, установленного на его борту.

Далее выполняется камеральная обработка фотографий и данных, полученных с геодезического квадрокоптера, с целью вычисления объема склада № 3 в ПО Agisoft Metashape. Agisoft Metashape Professional — это хорошо зарекомендовавшее себя программное обеспе-

Рис. 5. Опознак Geobox Oz-100 [источник: www.geobox.ru]
Fig. 5. Control survey point Geobox Oz-100 [source: www.geobox.ru]

Таблица 3

Характеристики GNSS-приемника AGNSS L1/L2 [источник: www.teodrone.ru]
Characteristics of the GNSS receiver AGNSS L1 / L2 [source: www.teodrone.ru]

Диапазон рабочих температур, °C	–20 — +45
Вес GNSS комплекта, г	107
Частоты	L1/L2
Количество каналов	186
Поддерживаемые системы	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo

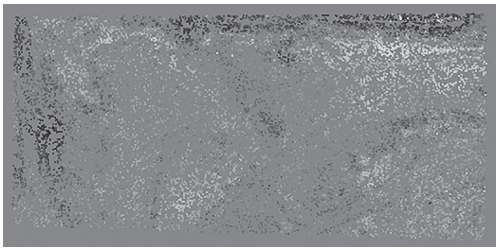


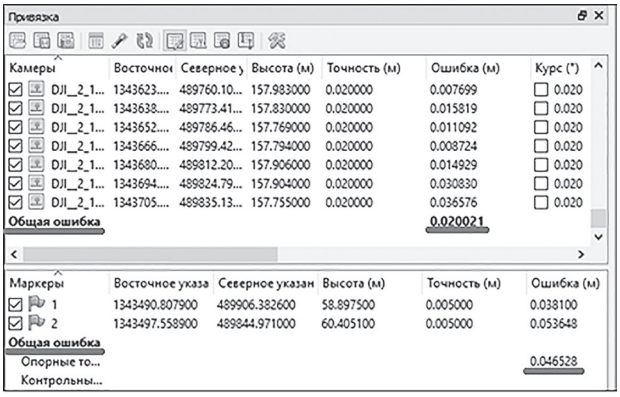
Рис. 6. Связующие точки [составлено авторами]
Fig. 6. Tie points [compiled by the authors]

чение, которое использует методы фотограмметрии и машинного обучения для анализа и постобработки снимков, полученных с разных устройств, в том числе квадрокоптеров.

Сначала необходимо создать новый проект и загрузить фотографии, полученные с квадрокоптера. Далее выбирается система координат — МСК 47 (Зона 1) и импортируется файл меток, содержащий координаты центров аэрофотоснимков. После выполнения данных операций можно переходить к выравниваю снимков. Выравнивание фотоснимков — это процесс поиска общих (связующих) точек на снимках с целью определения положения и ориентации камеры для каждого кадра.

Для поиска общих точек Metashape использует алгоритм, который сначала находит «особые» точки на отдельных фотографиях, затем точки отождествляются на основе уникальных идентификаторов — дескрипторов. Если точка опознана на двух и более кадрах, она становится связующей. В результате операции выравнивания получается разряженное облако связующих точек (рис. 6).

Следующим шагом после выравнивания является импорт в программу опознавательных знаков и уточнение их центров на снимках. Использование опознаков позволяет повысить точность построения цифровой модели. Для уточ-



Привязка

Камеры	Восточное	Северное у	Высота (м)	Точность (м)	Ошибка (м)	Курс (°)
DJI_2_1...	1343623....	489760.10...	157.983000	0.020000	0.007699	0.020
DJI_2_1...	1343638....	489773.41...	157.830000	0.020000	0.015819	0.020
DJI_2_1...	1343652....	489786.46...	157.769000	0.020000	0.011092	0.020
DJI_2_1...	1343666....	489799.42...	157.794000	0.020000	0.008724	0.020
DJI_2_1...	1343680....	489812.20...	157.906000	0.020000	0.014929	0.020
DJI_2_1...	1343694....	489824.79...	157.904000	0.020000	0.030830	0.020
DJI_2_1...	1343705....	489835.13...	157.755000	0.020000	0.036576	0.020
Общая ошибка					0.020021	

Маркеры	Восточное указа	Северное указан	Высота (м)	Точность (м)	Ошибка (м)
1	1343490.807900	489906.382600	58.897500	0.005000	0.038100
2	1343497.558900	489844.971000	60.405100	0.005000	0.053648
Общая ошибка					
Опорные то...					0.046528
Контрольны...					

Рис. 7. Ошибки после оптимизации [составлено авторами]
Fig. 7. Errors after optimization [compiled by the authors]

нения центров опознаков производится фильтрация фотографий по каждому из них и позиционирование маркера на центр изображения плаката. После работы с опознаками устанавливается точность камер, привязка камеры по высоте и выполняется оптимизация положения камер. На рис. 7 представлены ошибки определения положений камер и положения опознаков после оптимизации.

Рис. 8. Плотное облако точек с выделением склада [составлено авторами]
Fig. 8. Dense point cloud with warehouse highlight [compiled by the authors]

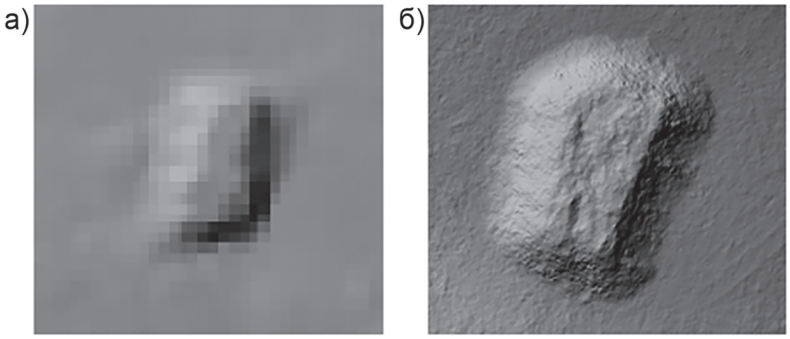


Рис. 9. Сравнение карт высот: на основе разреженного облака (а); на основе плотного облака (б) [составлено авторами]
Fig. 9. Comparison of DEM: based on a sparse cloud (a); based on a dense cloud (b) [compiled by the authors]

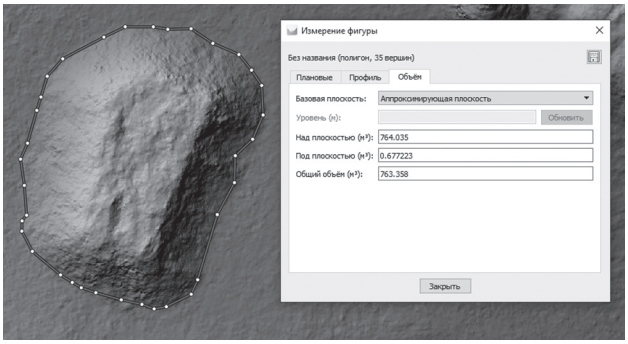


Рис. 10. Определение объема склада № 3 [составлено авторами]
Fig. 10. Determining the volume of sand dump № 3 [compiled by the authors]

Таблица 4

Результаты определения объемов 20 складов двумя методами [составлено авторами]

The results of determining volumes of 20 sand dumps by two methods [compiled by authors]

№ склада	Объем склада по результатам съемки с БВС, м^3	Объем склада по результатам съемки GNSS-приемником, м^3	Расхождение, %
1	337,9	331,0	2,0
2	557,6	541,4	2,9
3	764,0	762,5	0,2
4	822,2	853,7	3,7
5	998,6	1038,1	3,8
6	1612,1	1567,5	2,8
7	2117,6	2030,0	4,1
8	2220,1	2120,7	4,5
9	1982,2	2072,0	4,3
10	6782,4	6450,3	4,9
11	12 313,0	11 680,1	5,1
12	17 003,6	16 199,5	4,7
13	21 523,0	20 264,9	5,8
14	26 067,3	24 732,9	5,1
15	27 115,0	25 613,1	5,5
16	30 982,7	29 555,7	4,6
17	35 112,3	33 690,2	4,1
18	36 249,2	34 890,6	3,7
19	44 100,6	45 356,6	2,8
20	60 095,3	58 558,0	2,6

Для вычисления объема склада № 3 была построена карта высот. Существует два способа построения: на основе разряженного облака точек или на основе плотного облака точек. В результате использования разряженного облака в качестве основы получена карта высот низкого разрешения, что не позволяет четко выделить контур исследуемого склада. Поэтому в данной работе карта высот была построена на основе плотного облака точек высокого качества, с итоговым разрешением 5,05 пикс/см (см. рис. 8).

Сравнение уровней детализации двух карт высот, построенных на основе разреженного и плотного облаков, представлено на рис. 9.

Для определения объема склада № 3 на построенной карте высот замкнутым полигоном был обведен контур нижней бровки склада. Далее производится определение объема с указанием режима построения базовой плоскости — аппроксимирующая плоскость. Результат выполненных действий представлен на рис. 10.

По результатам съемки, выполненной с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 в режиме GPS, и вычисления объемов в ПО Agisoft Metashape Professional объем склада № 3 составил 764,0 м^3 (в разрыхленном состоянии).

Затем был осуществлен расчет расхождения в определении объемов склада № 3, выполненный по результатам двух методов съемки (с помощью GNSS-приемника и БВС):

$$\Delta_3 = \frac{764,0 - 762,5}{764,0} \cdot 100\% = 0,2\% . \quad (1)$$

Результаты

В данном разделе представлены результаты вычисления объемов двадцати разновеликих складов песка. Результаты определения и сравнения объемов, вычисленных в процессе камеральной обработки маркшейдерских съемок складов, представлены в табл. 4 и на рис. 11.

На диаграмме (см. рис. 11) цифрой *1* обозначены величины объемов складов, определенные по результатам съемки БВС и рассчитанные в ПО Agisoft Metashape, цифрой *2* — объемы, определенные по результатам съемки спутниковыми GNSS-приемниками и рассчитанные в ПО Autodesk Civil 3D.

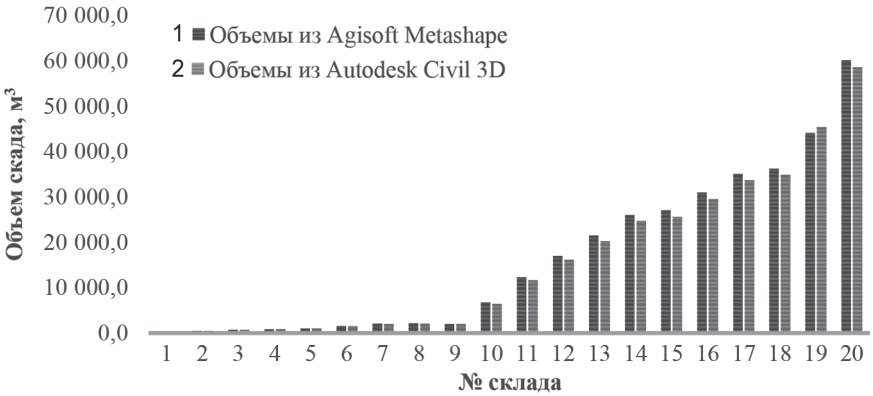


Рис. 11. Диаграмма объемов складов [составлено авторами]
Fig. 11. Diagram of sand dumps volumes [compiled by the authors]

Обсуждение результатов

Одной из основных задач для недропользователя является получение достоверных данных о количестве добытого полезного ископаемого. Сравнение контуров объектов съемки, полученных различными методами, в данном исследовании не производилось, так как построение модели склада является промежуточным этапом работы и выполняется в специализированном программном обеспечении. Кроме того, съемка складов выполнялась одновременно, что обуславливает постоянство формы отвала. Поэтому было принято решение сравнивать результаты съемки двумя методами по итоговым значениям рассчитанных по моделям объемов складов. Анализ полученных данных показывает, что в 75% случаев значение объема исследуемого склада, вычисленное в Agisoft Metashape, превышало аналогичное значение из Autodesk Civil 3D. Это связано с тем, что ПО Agisoft позволяет более детально учесть геометрию исследуемого объекта благодаря использованию всего набора данных, находящихся в изучаемой области, следствием чего является повышение точности полученного результата.

На рис. 12 изображен график, на оси абсцисс которого отложены номера ис-

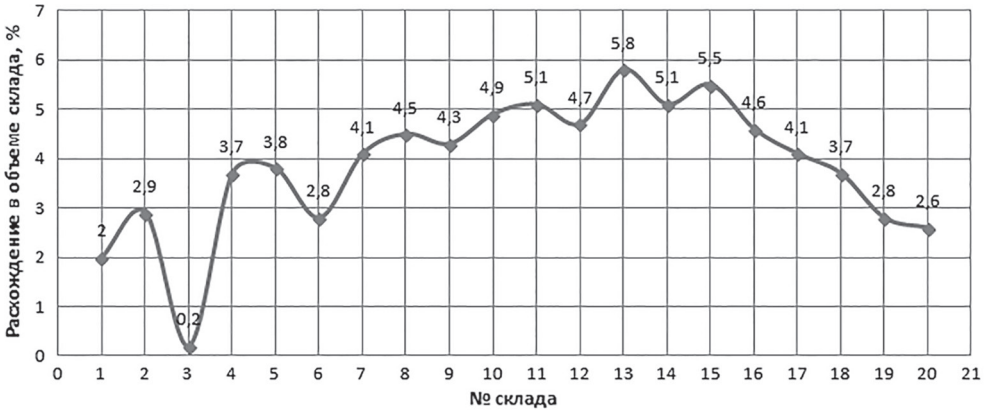


Рис. 12. Расхождения в определении объемов складов [составлено авторами]
Fig. 12. Discrepancies in the definition of warehouse volumes [compiled by the authors]

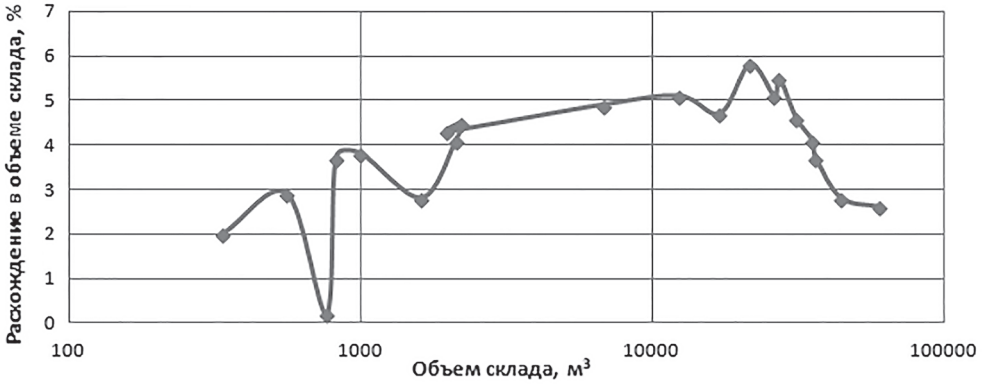


Рис. 13. Зависимость расхождения между двумя определениями объемов от величины объема склада [составлено авторами]

Fig. 13. Dependence of the discrepancy between 2 methods of determining volumes on the size of the volume of the sand dumps [compiled by the authors]

следуемых складов, а на оси ординат — расхождения в процентах между двумя методами в определении объемов.

Также был построен график зависимости расхождений в определении объема склада по результатам двух методов съемки от объема склада (рис. 13). На данном графике горизонтальная ось представлена порядками объемов исследуемых складов (логарифмическая шкала), а вертикальная — значениями расхождений в определении объемов для каждого склада.

Анализ графика показывает, что при определении объема складов по результатам съемок двумя различными методами (с помощью Agisoft Metashape и Autodesk Civil 3D) фактическое расхождение между результатами возрастает нелинейно в зависимости от объема исследуемого склада до значения порядка 25 000 м^3. Для складов с объемом полезного ископаемого свыше 25 000 м^3 максимальное расхождение объемов, полученных из результатов двух методов съемки, составляет 5,8%, что не превышает допустимой разности двух независимых определений объемов — 8% (п. 45 РД 07-604-03).

Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что, согласно п. 12 РД 07-604-03, съемка с помощью геодезического квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro TEO RTK PPK AGNSS L1/L2 в режиме управления GPS с последующей обработкой в ПО Agisoft Metashape может использоваться наряду с методом съемки GNSS-приемником с обработкой в Autodesk Civil 3D на основании высокой степени сходимости полученных данных.

Авторы выражают признательность главному маркшейдеру ООО «Карьерпроект», к.т.н. А.А. Блищенко за помощь в получении материалов для исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tong X., Liu, X., Chen P., Liu S., Luan K., Li L., Liu S., Liu X., Xie H., Jin Y., Hong Z.* Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas // Remote Sens. 2015, vol. 7, pp. 6635—6662. DOI: 10.3390/rs70606635.

2. *Мустафин М. Г.*, *Валькова Е. О.*, *Вальков В. А.* Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров // Маркшейдерский вестник. — 2022. — № 3 (148). — С. 13—18.

3. *Вальков В. А.*, *Виноградов К. П.*, *Валькова Е. О.*, *Мустафин М. Г.* Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. — 2022. — № 11. — С. 40—49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.

4. *Pravdina E. A.* Laser scanner data capture time management // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1649—1661.

5. *Глазунов В. В.*, *Бурлуцкий С. Б.*, *Шувалова Р. А.*, *Жданов С. В.* Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 771—782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.

6. *Санникова А. П.*, *Мустафин М. Г.* Оценка устойчивости борта карьера с учетом данных цифровой фотосъемки поверхностей обнажений // Записки Горного института. — 2013. — Т. 199. — С. 276—280.

7. *Саадун А.*, *Фредж М.*, *Букарм Р.*, *Хаджи Р.* Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 822—832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

8. *Сухов А. К.*, *Выстрчил М. Г.*, *Гусев В. Н.*, *Блищенко А. А.*, *Данько А. В.* Изучение качества фотограмметрических моделей, получаемых в условиях слабой освещенности // Известия Уральского государственного университета. — 2020. — № 3(59). — С. 140—148. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-140-148.

9. *Xu Z.*, *Xu E.*, *Liu S.*, *Wu L.* Registration of terrestrial laser scanning surveys using terrain-invariant regions for measuring exploitative volumes over open-pit mines // Remote Sensing. 2019, vol. 11, no. 6, article 606. DOI: 10.3390/rs11060606.

10. *Wim van Wegen* Surveying in the mining sector. An overview of geospatial methods in mining engineering // GIM International. 2018, vol. 12, pp. 26—28.

11. *Сухов А. К.*, *Данько А. В.*, *Выстрчил М. Г.* Опыт использования беспилотных летательных аппаратов при съемке россыпных месторождений золота // Естественные и технические науки. — 2019. — № 7 (133). — С. 85—89.

12. *Блищенко А. А.*, *Санникова А. П.* Формирование методики применения геодезического квадрокоптера на карьерах // Маркшейдерский вестник. — 2022. — № 3 (148). — С. 33—38.

13. *Макаров В. А.*, *Бондаренко Д. А.*, *Макаров И. В.*, *Шрайнер К. А.* Опыт применения технологии аэрофотосъемочных работ с беспилотных летательных аппаратов в горном деле». Режим доступа: URL: https://russiandrone.ru/ (20.02.2023).

14. *Блищенко А. А.*, *Гусев В. Н.* Совместное использование электронных тахеометров и GNSS-приемников для маркшейдерских съемок на карьерах // Естественные и технические науки. — 2019. — № 4 (130). — С. 79—81.

15. *Blishchenko A.* Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (quarries) / Scientific and practical studies of raw material issues. CRC Press, 2019, pp. 58—62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.

16. *Самойловский А.* Применение беспилотных летательных аппаратов на горнодобывающих предприятиях // Горная промышленность. — 2018. — № 6 (142). — С. 60—61.

17. *Климов С. С.*, *Бессараб А. А.*, *Набиулин М. Ф.* Использование беспилотных летательных аппаратов в буровзрывных работах // Глобус: геология и бизнес. — 2022. — № 3(72). — С. 58—60.

18. *Koomans R.*, *Limburg H.*, *van der Veeke S.* Soil mapping with drones // GIM International. 2022, vol. 5, pp. 71—77.

19. *Loots M., Grobbelaar S., van der Lingen E.* A review of remote-sensing unmanned aerial vehicles in the mining industry // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2022, vol. 122, pp. 387 — 396.

20. *Блищенко А. А.* Формирование и обоснование методики применения геодезического квадрокоптера для маркшейдерских съемок на карьерах: Автореф. дис. … канд. техн. наук. — СПб., 2022. — 27 с.

21. *Блищенко А. А.* Использование геодезических приборов на открытых горных работах, тенденция применения беспилотных технологий // Colloquium-Journal. Earth Sciences. 2020, no. 14(66), pp. 4 — 6. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11902.

22. *Блищенко А. А.*, *Санникова А. П.* Применение БПЛА при маркшейдерском обеспечении съемки лесного фонда // Вестник СГУГиТ. — 2022. — Т. 27. — № 1. — С. 42 — 51. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51.

23. *Блищенко А. А.*, *Лобынцев А. К.*, *Сухов А. К.* Оценка точности измерения складов на горных объектах с помощью беспилотной технологии // Маркшейдерский вестник. — 2020. — № 4 (137). — С. 23 — 27.

24. *Гусев В. Н.*, *Блищенко А. А.*, *Санникова А. П.* Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 173 — 179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.

25. *Мовчан И. Б.*, *Шайгаллямова З. И.*, *Яковлева А. А.* Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 217 — 233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23.

26. *Bamford T., Medinac F., Esmaeili K.* Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques // Remote Sensing. 2020, vol. 12, no. 17, article 2801. DOI: 10.3390/rs12172801.

27. *Blischenko A. A.*, *Gusev V. N.* Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of unmanned aerial vehicles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 720, no. 1, pp. 70 — 75, article 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103.

28. *Зуев Н. А.*, *Кобзев А. А.* Использование беспилотных авиационных систем при проведении маркшейдерских работ на разработках открытого типа // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — № 1. — С. 26 — 33.

29. *Курганов В. М.*, *Грязнов М. В.*, *Колобанов С. В.* Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 10 — 21. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

30. *Шабаров А. Н.*, *Носков В. А.*, *Павлович А. А.*, *Черепов А. А.* Концепция геомеханического риска при открытой добыче полезных ископаемых // Горный журнал. — 2022. — № 9. — С. 22 — 29. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

31. *Захаров В. Н.*, *Гвишиани А. Д.*, *Вайсберг Л. А.*, *Жеранов Б. В.* Большие данные и устойчивое функционирование геотехнических систем // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 45 — 52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.

32. *Пономаренко М. Р.*, *Кутепов Ю. И.*, *Шабаров А. Н.* Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 56 — 70. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

33. *Колесатова О. С.*, *Красавин А. В.*, *Афанасьева Т. С.*, *Сухачева Е. О.* Определение объемов складов на основе результатов аэрофотограмметрической съемки / Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа — регионам». — Екатеринбург, 2021. — С. 211 — 212.

34. *Ванеев С. Р., Ванеева М. В.* Сравнительный анализ современных методов определения объемов добытых полезных ископаемых // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). — 2020. — № 1. — С. 24—29.

35. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. Tong X., Liu, X., Chen P., Liu S., Luan K., Li L., Liu S., Liu X., Xie H., Jin Y., Hong Z. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas. *Remote Sens*. 2015, vol. 7, pp. 6635—6662. DOI: 10.3390/rs70606635.

2. Mustafin M. G., Valkova E. O., Valkov V. A. Ways of development of mine-surveying and geodetic observations of the stability of the sides of quarries. *Mine Surveying Bulletin*. 2022, no. 3 (148), pp. 13—18. [In Russ].

3. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O. Creation of highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodesy and Cartography*. 2022, no. 11, pp. 40—49. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.

4. Pravdina E. A. Laser scanner data capture time management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1649—1661.

5. Glazunov V. V., Burlutsky S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on accounting for engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 771—782. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.

6. Sannikova A. P., Mustafin M. G. Evaluation of the stability of the quarry wall, taking into account the data of digital photography of outcrop surfaces. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 199, pp. 276—280. [In Russ].

7. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using Digital Image Processing and an Empirical Model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822—832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

8. Sukhov A. K., Vystrchil M. G., Gusev V. N., Blischenko A. A., Dan'ko A. V. Study of the quality of photogrammetric models obtained in low light conditions. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 3(59), pp. 140—148. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-140-148.

9. Xu Z., Xu E., Liu S., Wu L. Registration of terrestrial laser scanning surveys using terrain-invariant regions for measuring exploitative volumes over open-pit mines. *Remote Sensing*. 2019, vol. 11, no. 6, article 606. DOI: 10.3390/rs11060606.

10. Wim van Wegen Surveying in the mining sector. An overview of geospatial methods in mining engineering. *GIM International*. 2018, vol. 12, pp. 26—28.

11. Sukhov A. K., Dan'ko A. V., Vystrchil M. G. Experience in the use of unmanned aerial vehicles in surveying alluvial gold deposits. *Natural and technical sciences*. 2019, no. 7 (133), pp. 85—89. [In Russ].

12. Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Formation of a methodology for the use of a geodetic quadrocopter in open pits. *Mine Surveying Bulletin*. 2022, no. 3 (148), pp. 33—38.

13. Makarov V. A., Bondarenko D. A., Makarov I. V., Shrayner K. A. *Opyt primeneniya tekhnologii aerofotos"emochnykh rabot s bespilotnykh letatel'nykh apparatov v gornom dele* [Experience in the use of aerial photography technology from unmanned aerial vehicles in mining], available at: https://russiandrone.ru/ (accessed 20.02.2023).

14. Blishchenko A. A., Gusev V. N. Joint use of electronic tacheometers and GNSS receivers for mine surveying in quarries. *Natural and technical sciences*. 2019, no. 4 (130), pp. 79—81. [In Russ].

15. Blishchenko A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (quarries). *Scientific and practical studies of raw material issues*. CRC Press, 2019, pp. 58 — 62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.

16. Samoilovsky A. Use of unmanned aerial vehicles in mining enterprises. *Russian Mining Industry*. 2018, no. 6 (142), pp. 60 — 61. [In Russ].

17. Klimov S. S., Bessarab A. A., Nabiulin M. F. JSC Use of unmanned aerial vehicles in drilling and blasting. *Globus: geologiya i biznes*. 2022, no. 3(72), pp. 58 — 60. [In Russ].

18. Koomans R., Limburg H., van der Veeke S. Soil mapping with drones. *GIM International*. 2022, vol. 5, pp. 71 — 77.

19. Loots M., Grobbelaar S., van der Lingen E. A review of remote-sensing unmanned aerial vehicles in the mining industry. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022, vol. 122, pp. 387 — 396.

20. Blishchenko A. A. *Formirovanie i obosnovanie metodiki primeneniya geodezicheskogo kvadrokoptera dlya marksheyderskikh s"emok na kar'erakh* [Formation and justification of the methodology of using a geodesic quadcopter for surveying surveys at quarries], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2022, 27 p.

21. Blishchenko A. A. The use of geodetic instruments in open-pit mining, the trend in the use of unmanned technologies. *Colloquium-Journal. Earth Sciences*. 2020, no. 14(66), pp. 4 — 6. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11902.

22. Blishchenko A. A. The use of UAVs in surveying the forest fund survey. *Vestnik SSUGT*. 2022, vol. 27, no. 1, pp. 42 — 51. [In Russ]. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51.

23. Blishchenko A. A., Lobyntsev A. K., Sukhov A. K. Assessment of the accuracy of measuring warehouses at mining facilities using unmanned technology. *Mine Surveyor Bulletin*. 2020, no. 4 (137), pp. 23 — 27. [In Russ].

24. Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Investigation of a complex of factors influencing the error in the implementation of surveying of mine objects using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 173 — 179. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.

25. Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., & Yakovleva A. A. Identification of the factors of structural control of primary gold occurrences by the method of unmanned aeromagnetic exploration on the example of the Neryungri region of Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 217 — 233. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.23.

26. Bamford T., Medinac F., Esmaeili K. Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 17, article 2801. DOI: 10.3390/rs12172801.

27. Blischenko A. A., Gusev V. N. Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 720, no. 1, pp. 70 — 75, article 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103.

28. Zuev N. A., Kobzev A. A. The use of unmanned aircraft systems during surveying work on open-type developments. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018, no. 1, pp. 26 — 33. [In Russ].

29. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of the reliability of the functioning of excavator-automobile complexes in a quarry. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10 — 21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

30. Shabarov A. N., Noskov V. A., Pavlovich A. A., Cherepov A. A. Concept of geomechanical risk in open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 9, pp. 22 — 29. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

31. Zakharov V. N., Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., Dzeranov B. V. Big data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 45 — 52. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.

32. Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Open pit mining monitoring support with information and analysis using web mapping technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 56—70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_56.

33. Kolesatova O. S., Krasavin A. V., Afanas'eva T. S., Sukhacheva E. O. Determination of warehouse volumes based on the results of aerial photogrammetric survey. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Ural'skaya gornaya shkola — regionam»* [International scientific and practical conference «Ural Mining School-regions»], Ekaterinburg, 2021, pp. 211—212. [In Russ].

34. Vaneev S. R., Vaneeva M. V. Comparative analysis of modern methods for determining the volume of extracted minerals. *Modeli i tekhnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt)*. 2020, no. 1, pp. 24—29. [In Russ].

35. Komissarov A. V. et al. Comparison of the accuracy of determining the volume of bulk materials based on survey data from unmanned aerial vehicles and geodetic measurements. *Vestnik SSUGT*. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 70—77. [In Russ]. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волошина Екатерина Александровна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Pravdina_EA@pers.spmi.ru,
ORCID ID 0009-0002-4510-7138,
Новоженин Сергей Юрьевич[1], канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID 0000-0001-5398-4777,
Келехсаев Станислав Константинович — инженер-геодезист,
ООО «Карьерпроект», e-mail: kmd@spmi.ru,
[1] Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.
Для контактов: Новоженин С.Ю., e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.A. Voloshina[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: Pravdina_EA@pers.spmi.ru,
ORCID ID 0009-0002-4510-7138,
S.Yu. Novozhenin[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID 0000-0001-5398-4777,
S.K. Kelekhsaev, Engineer-Surveyor,
Karierproekt LLC,
199106, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kmd@spmi.ru,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: S.Yu. Novozhenin, e-mail: Novozhenin_SYu@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 20.03.2023; получена после рецензии 16.06.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 20.03.2023; received after the review 16.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.