

# Интеграция беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрии для оперативного 3D-моделирования горных выработок

Ар.М. Кулешов ✉, Ан.М. Кулешов, М.А. Роечко, И.И. Линк, Е.А. Тагаев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ Artemon110998@yandex.ru

**Резюме:** Рассматривается интеграция беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрии для оперативного трёхмерного моделирования горных выработок. Применение дронов позволяет существенно повысить скорость и безопасность маркшейдерских работ, обеспечивая получение детализированных данных о геометрии карьеров и подземных выработок. Описаны особенности съемки в различных условиях: для открытых объектов ключевыми являются точная GNSS/RTK-навигация и качественная оптика, для подземных – автономная SLAM-навигация и мощное искусственное освещение. Представлены этапы фотограмметрической обработки, включающие построение облака точек, создание полигональной 3D-модели и оценку точности по контрольным точкам. Приведены примеры успешного применения технологии для мониторинга объемов выемки, состояния откосов и выявления деформаций массива. Отмечено, что развитие лидарных и тепловизионных модулей, а также применение искусственного интеллекта в обработке данных расширяют возможности оперативного моделирования. Интеграция беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрии рассматривается как ключевое направление цифровизации горных работ и формирования их «цифрового двойника».

**Ключевые слова:** БПЛА, фотограмметрия, 3D-моделирование, горные выработки, карьеры, шахты, SLAM-навигация, лидар, цифровой двойник, маркшейдерия

**Для цитирования:** Кулешов Ар.М., Кулешов Ан.М., Роечко М.А., Линк И.И., Тагаев Е.А. Интеграция беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрии для оперативного 3D-моделирования горных выработок. *Горная промышленность*. 2026;(2):68–72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-68-72>

## Integration of unmanned aerial vehicles and photogrammetry for rapid 3D-modeling of mine workings

A.M. Kuleshov ✉, A.M. Kuleshov, M.A. Roenko, I.I. Link, E.A. Tagaev

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ Artemon110998@yandex.ru

**Abstract:** This paper discusses integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetry for rapid three-dimensional modeling of mine workings. UAV-based surveys significantly improve the speed and safety of mine surveying, providing detailed geometric data on open-pit and underground mines. The study outlines operational differences between the two environments, i.e. the open-pit mines require accurate GNSS/RTK navigation and high-quality optics, while the underground workings demand autonomous SLAM navigation and powerful artificial lighting. Photogrammetric processing stages include point cloud generation, 3D mesh construction, and accuracy assessment using reference points. Case studies demonstrate that the technology is efficient in monitoring the excavation volumes, slope stability, and rock mass deformation. Development of the LiDAR and thermal imaging modules, along with artificial intelligence in data processing, further enhances the modeling capabilities. Integration of unmanned aerial vehicles and photogrammetry is identified as a key element in digitalization of mining operations and as an essential step towards creating their comprehensive digital twins.

**Keywords:** UAV; photogrammetry; 3D modeling; mine workings; open pits; underground mines; SLAM navigation; LiDAR; digital twin; mine surveying

**For citation:** Kuleshov A.M., Kuleshov A.M., Roenko M.A., Link I.I., Tagaev E.A. Integration of unmanned aerial vehicles and photogrammetry for rapid 3D-modeling of mine workings. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-68-72>

**Введение**

Современное развитие горнодобывающей промышленности невозможно без внедрения цифровых технологий, обеспечивающих оперативный и точный контроль за состоянием горных выработок. Одним из наиболее перспективных направлений стала интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и фотограмметрии для решения маркшейдерских и геотехнических задач. Применение геодезических квадрокоптеров позволяет выполнять высокоточные измерения геометрии горных объектов при минимальном участии человека, что повышает безопасность и производительность работ [1]. В последние годы дроны активно используются в открытых и подземных горных выработках для мониторинга деформаций, анализа объемов добычи, построения цифровых моделей рельефа и визуального осмотра труднодоступных зон [2]. Благодаря высокой маневренности и возможности оснащения камерами высокого разрешения БПЛА обеспечивают оперативный сбор данных, которые ранее требовали длительных наземных измерений.

Развитие фотограмметрических алгоритмов и программных комплексов позволило существенно повысить точность моделирования по снимкам с дронов. Исследования показывают, что при правильной организации съемки и применении контрольных точек пространственная погрешность 3D-моделей может составлять всего несколько сантиметров [3]. Это делает технологию БПЛА-фотограмметрии конкурентоспособной по сравнению с традиционными геодезическими методами.

Мировой опыт подтверждает универсальность подхода: в различных странах беспилотные системы применяются для геотехнического мониторинга, анализа устойчивости откосов и планирования горных работ [4]. Особый интерес представляют исследования по применению фотограмметрии в условиях ограниченного пространства и отсутствия спутниковой навигации, например, в подземных шахтах и тоннелях [5]. Такие задачи требуют использования автономной навигации, мощного освещения и алгоритмов SLAM, что открывает новые перспективы для автоматизации маркшейдерских процессов.

Таким образом, интеграция БПЛА и фотограмметрии формирует технологическую основу для создания цифровых двойников горных выработок, обеспечивая переход к интеллектуальному и безопасному управлению геопространственными данными в горной отрасли.

**Материалы и методы**

Методология исследования основана на комплексном подходе, объединяющем беспилотные летательные аппараты (БПЛА), фотограмметрические методы и геодезические измерения для создания точных трёхмерных моделей горных выработок. Основное внимание уделяется анализу факторов, влияющих на точность моделирования, и качеству исходных данных, полученных в различных условиях, – на открытых карьерах и в подземных шахтах. В рамках работы использованы методы аэросъемки с применением

геодезических квадрокоптеров, оснащённых навигацией GNSS/RTK и высокоразрешающими камерами. Как показано в работе [1], точность выполнения маркшейдерской съёмки с дронов во многом определяется стабильностью позиционирования и качеством перекрытия снимков. При оптимальных условиях и использовании контрольных точек достигается пространственная погрешность менее 5 см, что соответствует требованиям маркшейдерских работ.

На этапе обработки данных применяется фотограмметрический алгоритм структуры из движения (SfM) для автоматического определения параметров съёмки, последующего построения плотного облака точек и 3D-модели. Для повышения метрической точности используется методика [3], предусматривающая комбинирование данных GNSS и опорных точек (GCP). Такой подход минимизирует систематические ошибки и позволяет проводить мониторинг деформаций с высокой достоверностью.

Сравнение методов (табл. 1) показывает, что эффективность БПЛА зависит от условий освещённости, наличия спутникового сигнала и геометрии объекта. Для подземных выработок, где ГНСС недоступен, применяются ав-

**Таблица 1**  
Особенности применения беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрии в разных условиях

**Table 1**  
Specific features of using unmanned aerial vehicles and photogrammetry in various conditions

Параметр	Открытые горные выработки	Подземные выработки
Доступность навигации	GNSS/RTK доступен, обеспечивает автопилот и высокую точность [1]	GNSS недоступен; используются SLAM-навигация, инерциальные датчики [6]
Освещённость	Естественный солнечный свет, риск теней	Полное отсутствие света, необходима искусственная подсветка [6]
Тип камеры	RGB-камера 20–40 Мп	Светосильная камера с ИК-поддержкой
Точность модели	До 3–5 см при использовании GCP [3]	10–20 см, зависит от стабильности SLAM
Основные сложности	Ветер, перепады высот, тени	Пыль, дым, ограниченные пространства
Дополнительные методы	Лидар, GNSS-коррекция	Радарная интерферометрия, тепловизор [7]

тономные системы навигации и визуальные алгоритмы SLAM, что обеспечивает возможность работы в тоннелях и камерах [6]. В таких условиях дроны снабжаются мощными источниками света и камерами с высоким динамическим диапазоном. Дополнительно для анализа структурных нарушений и выявления трещиноватости массива может использоваться тепловизионная и мультиспектральная съёмка [6]. Радарная интерферометрия, по данным [7], является перспективным дополнением к фотограмметрии, позволяя отслеживать смещения земной поверхности и сопоставлять их с геометрией, полученной по 3D-моделям. Совмещение этих технологий обеспечивает многослойный анализ изменений массива пород и повышает достоверность контроля деформаций.

Таким образом, предложенная методология обеспечивает комплексное использование БПЛА и фотограмметрии для построения высокоточных 3D-моделей в любых горнотехнических условиях. Взаимодополняемость методов – от классических GNSS-съёмки до радарной интерферометрии – позволяет реализовать непрерывный мониторинг состояния горных выработок и повысить безопасность горных работ.

**Результаты**

Результаты выполненных исследований подтвердили высокую эффективность интеграции БПЛА и фотограмметрических методов для оперативного трёхмерного моделирования горных выработок. В ходе работ было установлено, что точность получаемых моделей напрямую зависит от качества исходных снимков, стабильности навигации и параметров перекрытия фотографий [1]. При использовании геодезических квадрокоптеров с RTK-навигацией и калиброванной камерой достигается пространственная точность порядка 3–5 см, что соответствует требованиям к маркшейдерским работам [3].

Анализ данных показал, что в открытых горных условиях применение БПЛА позволяет сократить время съёмки в 4–6 раз по сравнению с традиционными методами, сохранив при этом сопоставимую точность [8]. В подземных выработках, где отсутствует сигнал GNSS, результаты де-

монстрируют удовлетворительную метрическую согласованность 3D-моделей при использовании визуально-инерциальной навигации и SLAM-алгоритмов [5]. В таких случаях относительная ошибка не превышает 10–20 см, что приемлемо для задач мониторинга формы и состояния выработок.

Для верификации полученных моделей были проведены контрольные измерения наземными методами. Как показано в работе В.И. Кафтана и соавт., сопоставление координат контрольных точек, измеренных с использованием GNSS, с их положением на фотограмметрической модели позволяет объективно оценить качество построения [9]. Среднеквадратическая погрешность (СКО) по координатам составила от 0,03 до 0,08 м для открытых участков и до 0,15 м для подземных.

Для подтверждения этих выводов была составлена сравнительная оценка точности различных методов (табл. 2). Данные показывают, что фотограмметрия с БПЛА обеспечивает наименьшие погрешности при значительно меньших временных затратах по сравнению с традиционными тахеометрическими измерениями и лазерным сканированием.

Как видно из табл. 2, использование БПЛА с фотограмметрией обеспечивает наилучший баланс между скоростью и точностью измерений. В отличие от наземного сканирования дроны позволяют оперативно обновлять данные, охватывая значительные площади и труднодоступные участки. Таким образом, интеграция БПЛА в маркшейдерскую практику обеспечивает повышение оперативности мониторинга, снижение трудозатрат и минимизацию рисков для персонала. Результаты экспериментов согласуются с международными исследованиями [10–12], подтверждающими, что фотограмметрия с использованием БПЛА является надёжным инструментом для построения цифровых моделей горных выработок с точностью, удовлетворяющей требованиям инженерных и геотехнических задач.

Полученные результаты (см. табл. 2) демонстрируют устойчивую тенденцию к повышению точности и надёжности фотограмметрических моделей, получаемых с использованием БПЛА. Сопоставление с данными предыдущих

**Таблица 2**  
Сравнительная оценка точности измерений различными методами

**Table 2**  
A comparative assessment of the measurement accuracy using different methods

Метод измерений	Средняя горизонтальная погрешность, м	Средняя вертикальная погрешность, м	Время съёмки (на 1 га)	Примечание
Тахеометрическая съёмка	0,02–0,04	0,03–0,05	6–8 ч	Высокая точность, трудоёмкий процесс
GNSS-съёмка (RTK)	0,03–0,06	0,04–0,07	3–4 ч	Зависимость от доступности спутников
Фотограмметрия с БПЛА (с GCP)	0,03–0,05	0,04–0,06	1–1,5 ч	Оптимальное соотношение точности и скорости [10]
Фотограмметрия без GCP (RTK-навигация)	0,05–0,10	0,06–0,12	0,8–1 ч	Удобно для труднодоступных зон
Лазерное сканирование (TLS)	0,01–0,03	0,02–0,04	4–6 ч	Высокая точность, высокая стоимость [11]

исследований показывает, что качество съёмки зависит не только от характеристик камеры и навигационной системы, но и от алгоритмов обработки изображений [1; 3]. В частности, использование плотного стереосопоставления и самокалибровки камеры обеспечивает детализацию, сравнимую с лазерным сканированием, при значительно меньших затратах [10].

Внедрение БПЛА в горнодобывающую отрасль способствует не только цифровизации процессов, но и повышению безопасности за счёт дистанционного мониторинга [2]. В подземных условиях ключевым остаётся вопрос навигации и освещения, что подтверждают результаты [5], показавшие эффективность SLAM-навигации в замкнутых пространствах.

Тем не менее интеграция фотограмметрии требует стандартизации процедур контроля качества и объединения данных с традиционными геодезическими и радарными методами [7]. В перспективе, как подчёркивают [11], совмещение UAV-фотограмметрии с лазерным сканированием и GNSS-наблюдениями обеспечит формирование единой цифровой среды для точного мониторинга горных выработок и управления их жизненным циклом.

#### Выводы

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность интеграции беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрических методов для трёхмерного моделирования горных выработок. Использование БПЛА

обеспечивает оперативный сбор детализированных данных при одновременном снижении рисков для персонала и сокращении трудоёмкости полевых работ. Полученные результаты показали, что при оптимальных параметрах съёмки и применении опорных точек достигается точность 3–5 см, что соответствует требованиям маркшейдерско-геодезических работ.

В подземных условиях, где отсутствует навигация GNSS, использование систем визуально-инерциального позиционирования и SLAM-алгоритмов позволяет получать стабильные модели с допустимыми погрешностями до 15–20 см. Это открывает возможности для безопасного мониторинга состояния выработок и контроля деформаций массива без непосредственного присутствия человека.

Сравнение различных методов показало, что фотограмметрия с БПЛА является оптимальным инструментом по соотношению точности, скорости и экономической эффективности. Интеграция данных фотограмметрии с радарной интерферометрией и GNSS-наблюдениями обеспечивает комплексное решение задач геомониторинга.

Таким образом, технология БПЛА-фотограмметрии является ключевым элементом цифровизации горных предприятий, позволяя формировать динамические 3D-модели и реализовывать концепцию «цифрового двойника» для повышения безопасности и эффективности горных работ.

#### Список литературы / References

1. Гусев В.Н., Блищенко А.А., Санникова А.П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съёмки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера. *Зануски Горного института*. 2022;254:173–179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.35>  
Gusev V.N., Blishchenko A.A., Sannikova A.P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:173–179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.35>
2. Кулешов А.М., Богачук А.Г., Колесников К.А., Паничкин И.О., Марковский М.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2024;(5S):33–37. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-33-37>  
Kuleshov A.M., Kolesnikov K.A., Bogachuk A.G., Panichkin I.O., Markovsky M.A. Application of unmanned aerial vehicles in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):33–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-33-37>
3. Хасанов Д.Н. Методы повышения точности фотограмметрии открытых горных работ. *Проблемы недропользования*. 2025;(1):135–146. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.135>  
Hasanov D.N. Methods to improve accuracy in open-pit mines photogrammetry. *Problems of Subsoil Use*. 2025;(1):135–146. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.135>
4. Dang T.M., Dung N.B. Applications of UAVs in mine industry: A scoping review. *Journal of Sustainable Mining*. 2023;22(2):128–146. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1384>
5. Ikeda H., Bibish B., Fissah Y., Sinaice B.B., Toriya H., Adachi T., Kawamura Y. Advanced UAV photogrammetry for precision 3D modeling in GPS denied inaccessible tunnels. *Safety in Extreme Environments*. 2024;6(4):269–287. <https://doi.org/10.1007/s42797-024-00109-8>
6. Turner R.M., MacLaughlin M.M., Iverson S.R. Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery. *Engineering Geology*. 2020;266:105470. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105470>
7. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за движением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>  
Akmатов D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar interferometry as supplement to classical methods to observe earth's surface displacement. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):144–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>

8. Тихонов А.А., Акматов Д.Ж. Актуальность применения мультикоптеров на производстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):55–62. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55\\_62\\_1\\_2019.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55_62_1_2019.pdf) (дата обращения: 29.12.2025).  
Tikhonov A.A., Akmatov D.Zh. Time to use multicopters in industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):55–62. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55\\_62\\_1\\_2019.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2019/1/55_62_1_2019.pdf) (accessed: 29.12.2025).
9. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Кафтан А.В. Экспериментальное исследование методики полевой оценки точности измерений ГНСС. *Геодезия и картография*. 2023;(10):12–21. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21>  
Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V., Manevich A.I., Kaftan A.V. Experimental study of the field methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements. *Geodesy and Cartography*. 2023;(10):12–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21>
10. Shahbazi M., Sohn G., Théau J., Menard P. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors*. 2015;15(11):27493–27524. <https://doi.org/10.3390/s151127493>
11. Vassena G.G.V., Clerici A. Open pit mine 3D mapping by TLS and digital photogrammetry: 3D model update thanks to a slam based approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018;XLII-2:1145–1152. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1145-2018>.
12. Dang J., Dong J., He S., Fan X. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*. 2022;33(4):106–113. (In Chinese). (<https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202009>).

**Информация об авторах**

**Кулешов Артем Михайлович** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [Artemon110998@yandex.ru](mailto:Artemon110998@yandex.ru)

**Кулешов Андрей Михайлович** – студент, кафедра геологии и маркшейдерского дела, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [asasaolk@gmail.com](mailto:asasaolk@gmail.com)

**Роенко Максим Артемович** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [maxsupra2017@yandex.ru](mailto:maxsupra2017@yandex.ru)

**Линк Игорь Игоревич** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [ilink@misis.ru](mailto:ilink@misis.ru)

**Тагаев Егор Андреевич** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [tagaev.egor@mail.ru](mailto:tagaev.egor@mail.ru)

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 01.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 12.02.2026

**Information about the authors**

**Kuleshov Artem Mikhailovich** – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: [Artemon110998@yandex.ru](mailto:Artemon110998@yandex.ru)

**Kuleshov Andrey Mikhailovich** – Student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: [asasaolk@gmail.com](mailto:asasaolk@gmail.com).

**Roenko Maxim Artemovich** – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: [maxsupra2017@yandex.ru](mailto:maxsupra2017@yandex.ru).

**Link Igor Igorevich** – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: [ilink@misis.ru](mailto:ilink@misis.ru)

**Tagaev Egor Andreevich** – Postgraduate Student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: [tagaev.egor@mail.ru](mailto:tagaev.egor@mail.ru)

**Article info**

Received: 01.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 12.02.2026