

# О возможности применения комбинированной лидарной и фотограмметрической съемки с беспилотных воздушных судов в качестве метода мониторинга горных объектов

А.С. Иванов, И.Ю. Розанов✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ i.rozanov@ksc.ru

**Резюме:** Исследована возможность интеграции двух методов дистанционного зондирования – лидарной и фотограмметрической съёмки с использованием беспилотных воздушных судов – для мониторинга деформационных процессов на поверхности горного объекта, подверженного влиянию подземных горных работ. Основной целью исследования стало повышение достоверности и полноты пространственной информации о состоянии бортов карьера за счёт взаимодополнения данных, полученных разными методами. Описан полный цикл исследований: от планирования и выполнения полётов с учётом рельефа до комплексной постобработки данных и сопоставления результатов с предыдущими замерами, выполненными наземными методами. Особое внимание уделено методике совмещения облаков точек, построению цифровых моделей рельефа и ортофотопланов, а также применению нескольких подходов к выявлению изменений – через сравнение облаков точек, полигональных поверхностей и растровых моделей. Анализ позволил выявить значительное количество участков с признаками смещений, часть из которых классифицированы как критически важные. Для систематизации результатов предложена унифицированная форма информационной карты участка, включающая пространственные, геометрические, визуальные и геологические данные, а также количественные характеристики деформаций. В статье подчёркивается, что использование беспилотных воздушных судов открывает новые возможности для мониторинга горных объектов, особенно в условиях сложного рельефа и потенциальной опасности наземных работ. Беспилотные воздушные суда обеспечивают высокую мобильность, оперативность сбора данных и возможность многократного повторения съёмок без значительных затрат времени и ресурсов, обеспечивая надёжную основу для последующего анализа деформационных процессов и повышения достоверности результатов мониторинга.

**Ключевые слова:** беспилотные воздушные суда, воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, фотограмметрическая съемка, лидары, устойчивость бортов карьеров

**Для цитирования:** Иванов А.С., Розанов И.Ю. О возможности применения комбинированной лидарной и фотограмметрической съемки с беспилотных воздушных судов в качестве метода мониторинга горных объектов. *Горная промышленность*. 2026;(2):146–151. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-146-151>

## On the possibility of using combined LIDAR and photogrammetric surveys from unmanned aerial vehicles as a method to monitor mining facilities

A.S. Ivanov, I.Yu. Rozanov✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ i.rozanov@ksc.ru

**Abstract:** The article explores the possibility of integrating two remote sensing methods, i.e. the LIDAR and the photogrammetric imaging, using unmanned aircraft to monitor deformation processes on the daylight surface of a mining facility, which is affected by underground mining operations. The main purpose of the work is to enhance the reliability and completeness of spatial information on the condition of the open pit mine walls through mutual complementation of the data obtained by two different methods. The full cycle of research is described from planning and performing flights with account of the terrain to complex post-processing of data and comparing the results with measurements previously performed using ground-based methods. Special attention is paid to the method of combining point clouds, constructing digital terrain models and orthophotomaps,

as well as applying several approaches to detecting changes, e.g. through comparing point clouds, polygonal surfaces, and raster models. The analysis revealed a significant number of sites with signs of displacement, some of which were classified as critically important. A unified design of the site information card is proposed to systematize the results, including the spatial, geometric, visual and geological data, as well as quantitative characteristics of the deformations. The article emphasizes that the use of unmanned aerial vehicles opens up new opportunities in mining sites monitoring, especially in conditions of challenging terrains and the potential hazards concerned with the ground-based surveys. Unmanned aerial vehicles provide high mobility, rapid data collection and the ability to repeat surveys multiple times without significant investment of time and resources, thus providing a reliable basis for subsequent analysis of the deformation processes and enhancing reliability of the monitoring results.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, airborne laser scanning, aerial photography, photogrammetric survey, LIDAR, open pit wall stability

**For citation:** Ivanov A.S., Rozanov I.Yu. On the possibility of using combined LIDAR and photogrammetric surveys from unmanned aerial vehicles as a method to monitor mining facilities. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):146–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-146-151>

## Введение

Мониторинг устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов выполняется для выявления зон и участков возможного проявления деформационных процессов. В условиях открытых горных работ устойчивость горных объектов является ключевым вопросом для поддержания производства, безопасности и эффективности [1]. Современные эффективные методы мониторинга это: приземный, спутниковый, лазерный, геотехнический, радарный, глубинный, геофизический, фотограмметрический, аэрокосмический и др. Каждая из технологий имеет ряд преимуществ и недостатков, требований к условиям исполнения, доступности и соотношения затрат. Следовательно, успешное сочетание названных технологий, а также применение автоматизированных систем позволят дополнять и обобщать получаемые данные с учетом конкретных условий наблюдений для достижения большей надежности, точности и эффективности.

Выбор метода мониторинга зависит от исследуемого объекта, его геометрии, условий разработки, местоположения и иных сопутствующих факторов, а также соответствия требованиям ФНП ПБ «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» приказ № 439 от 13.11.2020 г.<sup>1</sup> [2].

Беспилотные воздушные судна (БВС) получили большое распространение в маркшейдерских и геомеханических исследованиях благодаря своей простоте управления, маневренности, финансовой доступности. Современные БВС могут быть оснащены камерами высокого разрешения, лазерными сканерами (лидарами), приемниками глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и другими датчиками для проведения удаленного изучения массива. Полученные в результате измерений облака точек позволяют строить цифровые модели местности или цифровые модели рельефа в зависимости от решаемых задач.

Объектом изучения данной статьи является возможность комбинирования двух технологий получения пространственных данных об объекте, а именно лидарной и фотограмметрической съемок, выполненных в карьере «Центральный» Ждановского месторождения медно-никелевых руд. Месторождение расположено в Мурманской области и входит в ресурсную базу ПАО «ГМК Норникель». Разработка ведется подземным рудником «Северный»,

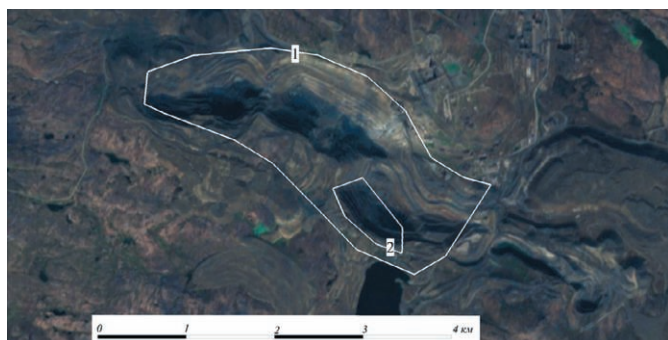
а полный переход от открытого способа разработки к подземному был завершён около 15 лет назад. При ведении подземных горных работ системами с обрушением руды и вмещающих пород актуальны вопросы оценки, прогноза и управления процессами деформации покрывающих пород [3]. Следовательно, необходимо получение точной и достоверной информации о дневной поверхности карьера, подверженного деформационным процессам под влиянием подземных горных работ.

## Полевые работы

Группа методов дистанционного инструментального контроля, основанная на использовании БВС и технологических достижениях предшествующих лет, начала активно развиваться с 2010-х годов. Толчком послужило появление программных решений, сочетающих компьютерное зрение и цифровую фотограмметрию, позволивших создавать 3D-модели без спецоборудования, а рост разрешения камер с уменьшенным весом сделал возможным их установку на лёгкие БВС. В 2019 г. на российском рынке оборудования появились БВС с длительным полётом и лёгкими лазерными сканерами, критически важными для безопасного обеспечения горных работ. Несмотря на рост возможностей остаются проблемы точности, сопоставимости данных, пространственной неопределённости и шума, что подтверждается исследованиями T. Mcleod et al. [4], S. Coccia et al. [5], C. Fey и V. Wichmann [6], M.R. James et al. [7], J. Leahy и S. Jabari [8], предлагающими методы оценки доверия, коррекции ошибок и совмещения лидарных и фотограмметрических данных. В 2025 г. M.G. Vystrchil et al. признали, что современные методы пока уступают традиционным по точности, но дают уникальную площадную интерпретацию смещений, требуя дальнейших исследований для выявления закономерностей и интеграции с классическими подходами [9].

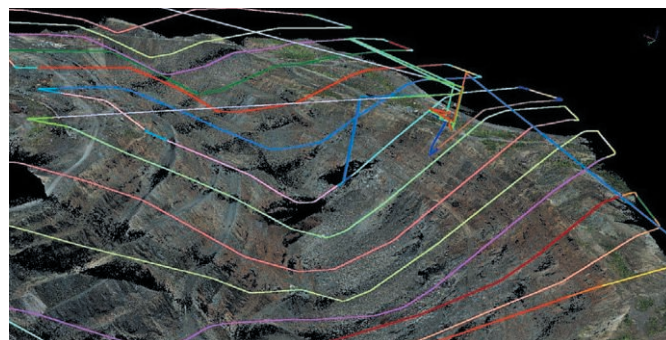
Сотрудниками отдела геомеханики ГоИ КНЦ РАН была выполнена съёмка поверхности и прибортовой территории карьера с применением промышленного беспилотного воздушного судна DJI Matrice 300 RTK Combo, оборудованного сканирующей системой LiAir X3, и беспилотного воздушного судна Geoscan Gemini, оборудованного фотокамерой Sony UMC-R10C (2024 г.). На рис. 1 изображены карьер «Центральный» и границы лидарной и фотограмметрической съёмок, а также участок, требующий детального изучения. Съёмка выполнялась в несколько этапов. На начальном этапе были установлены два спутниковых приемника: фирм

<sup>1</sup> Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»: Утвержден приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 г. №439. С. 64.



**Рис. 1**  
Карьер «Центральный»:  
1 – границы лидарной и фотограмметрической съемки;  
2 – участок, требующий  
детального изучения

**Fig. 1**  
The Tsentralny open pit mine:  
1 – boundaries of the LIDAR  
and photogrammetric surveys;  
2 – an area that needs more  
detailed studies



**Рис. 2**  
Графическое отображение фактической траектории полета БВС с огибанием рельефа на этапе постобработки данных

**Fig. 2**  
A graphical representation of the actual flight path of the UAV with terrain following during the post-processing stage

GreenValley и D-RTK 2 High Precision GNSS. Первый устанавливался на пункте государственной геодезической сети с целью привязки к местной (рудничной) системе координат и проработал в течение 5 ч, записывая статические измерения с частотой 1 Hz на каждом этапе работ. Второй приемник D-RTK 2 High Precision GNSS представляет собой мобильную базовую станцию для передачи дифференциальных поправок в реальном времени с целью уточнения позиционирования DJI Matrice 300 RTK Combo.

На следующем этапе была выполнена аэрофотосъемка на высоте 150 м от поверхности с «огибанием рельефа» по данным, полученным из открытых источников. Полеты выполнены по заранее рассчитанным маршрутным заданиям, технические характеристики которых сведены в табл. 1. Применяв упрощенный режим обработки, построили предварительную цифровую модель местности ЦММ. Её 2.5D-модель в формате Tiff представляет собой информацию о сетке 4,3 м на 4,3 м плановых координат точек и извлекаемых из матрицы высот точек (в системе координат WGS84 проекция 4326), соответствующих участку дальнейших работ. После загрузки модели в полевое программное обеспечение DJI-Pilot2 и Geoscan Planner были рассчитаны будущие маршруты полетов (Галсы) с детальным «огибанием рельефа», т.е. повторением на заданной высоте изменения высотного положения подстилающей поверхности.

На следующем этапе были выполнены полеты БВС, оснащенного лидарной системой LiAir X3, два из которых запу-

скались с южного борта карьера и три с северного борта. Установленная высота полета 100 м над цифровой моделью местности карьера, скорость полета 10 м/с. В среднем полет БВС по каждому маршрутному заданию занимал 25 мин. На рис. 2 представлено графическое отображение фактической траектории полета DJI Matrice 300. После были осуществлены два дополнительных полета на Geoscan Gemini с целью детального изучения юго-восточного борта карьера на высоте 70 м с изменением наклона камеры.

#### Обработка данных и программное обеспечение

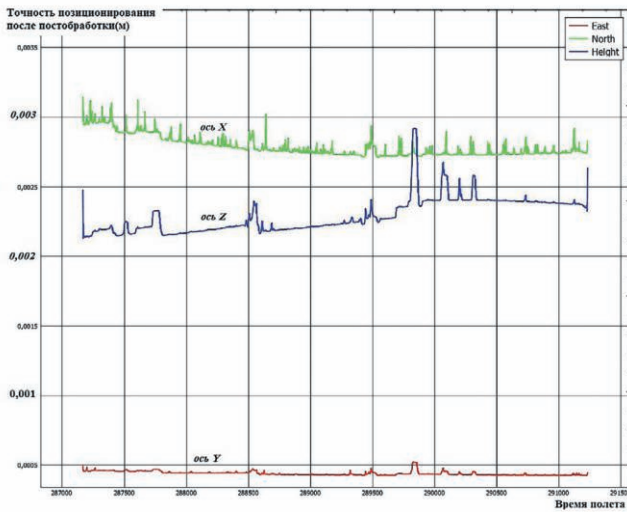
Обработка данных проводилась в программных продуктах Ligeoreference, Agisoft Metashape, Cloudcompare. Первичная обработка данных воздушного лазерного сканирования (ВЛС) представляет собой совмещение данных проекта (сохраненных в памяти сканирующей системы LiAir X3 по завершении полета) с данными статических измерений, полученных на спутниковом приемнике GreenValley. В процессе обработки в программном продукте Ligeoreference выполняется определение точных координат траектории полета и наклона сканера, а также дальнейшая увязка облака точек по ней. Расчетная точность определения координат траектории полета БВС указана на рис. 3 и не превышает 3,5 мм.

С использованием параметров преобразования координат (полученных в 2022 г.) в процессе обработки задана условная (рудничная) система координат. В резуль-

**Таблица 1**  
Технические характеристики маршрутных заданий

**Table 1**  
Technical specifications of the flight route assignments

| Показатель                          | Лидарная съемка  | Фотограмметрическая съемка  |       |
|-------------------------------------|--|---|-------|
| Марка беспилотного воздушного судна | DJI Matrice 300 RTK Combo  | Geoscan Gemini  |       |
| Полезная нагрузка                   | Сканирующая система LiAir X3   | Фотокамера Sony UMC-R10C  |       |
| Характеристика полезной нагрузки    | Скорость сканирования до 720 000 т/с<br>Дальность сканирования 190 м при коэффициенте отражения 10%<br>Погрешность измерений 50 мм | Максимальное разрешение 20,1 Мпикс<br>Тип затвора механический<br>Точность определения положения гор. 5 мм + 0,5 ppm × L б.л.<br>верт. 10 мм + 0,8 ppm × L б.л. |       |
| Количество полетов                  | 5  | 4   | 2     |
| Скорость полета, м/с                | 10   | 10–14   | 10–14 |
| Высота полета, м                    | 100  | 150   | 70    |
| Продольное перекрытие               | –  | 80  | 80    |
| Поперечное перекрытие               | 40   | 60  | 60    |
| Общая продолжительность полета, мин | 127  | 90  | 28    |
| Информация о карьере                | Площадь съемки 616 Га, максимальный перепад высот 430 м  |   |       |

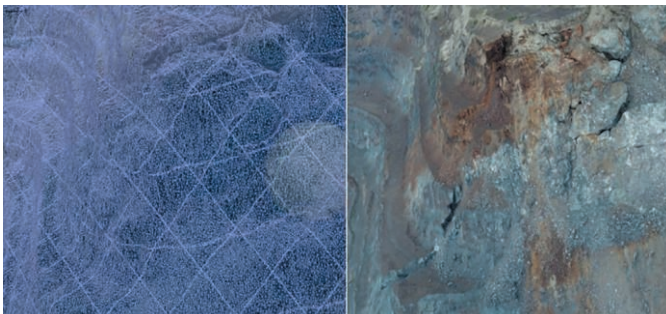


**Рис. 3**  
Точность определения координат траектории полета беспилотного воздушного судна

**Fig. 3**  
The accuracy of determining coordinates of the UAV flight path

тате получено облако, состоящее из 399 245 977 точек. Дальнейшая обработка ВЛС велась в программном продукте CloudCompare. Была выполнена: фильтрация облака точек от шумов (ошибочно полученных точек), фильтрация растительности и объектов инфраструктуры [10]. В результате получено облако, содержащее информацию о пространственном положении точек рельефа (X, Y, Z), реальном цвете (R, G, B) и интенсивности отражения сигнала.

Следующим этапом обрабатывались данные аэрофото-съемки в Agisoft Metashape. Рассчитаны точные центры фотографирования, выровнены снимки, отфильтрованы связующие точки с высокой ошибкой репроецирования, получено облако точек, классифицированы точки рельефа, определены средние ошибки по центрам фотографирования и по контрольным точкам. Далее результаты ВЛС и фотограмметрии были объединены для совместной обработки, по завершении которой были построены ортофотоплан местности с разрешением 4 см/пикс, цифровая модель рельефа, текстурированная полигональная модель карьера, тайловая модель, совмещенное облако точек. На рис. 4 показан пример текстурированной полигональной модели.



**Рис. 4.**  
олигональная модель (слева), текстурированная полигональная модель (справа)

**Fig. 4**  
A polygonal model (left), a textured polygonal model (right)

**Анализ результатов съемки**

Полученные результаты съемок, выполненных каждым методом, имеют ряд недостатков и ряд компенсирующих мер, описанных в табл. 2.

**Таблица 2**  
Описание недостатков и компенсирующих мер

**Table 2**  
A description of disadvantages and corresponding mitigating measures

| Метод    | Недостатки  | Компенсирующие меры  |
|----------|---|--|
| ВЛС, ФГМ | Появление «слепых зон» при продольном или поперечном перекрытии в результате резкого изменения высот либо перекрытие видимости другим объектом  | Применение в полетном задании направления галсов одного метода, перпендикулярного второму методу с получением тем самым двойного перекрытия площади съемки |
| ФГМ      | Получение высокой ошибки репроецирования, полученной в центральной части карьера  | Исключение результатов с высокой ошибкой и замещение результатами ВЛС  |
| ВЛС      | Необходимость в сохранении избыточного количества данных в облаке, построения детальной модели с избыточным количеством треугольников вследствие необходимости выявления систем трещин и их изменений | Построение упрощенной модели с меньшим числом треугольников и использование текстур для работы с трещинами   |
| ВЛС      | Низкая плотность точек в откосах на участке 2, требующем детального изучения из-за сложной геометрии объекта  | Изменение направления угла наклона камеры при съемке ФГМ   |

Для выявления изменений рельефа по результатам съемок, выполненных с применением лазерного сканирования или фотограмметрии, как правило, применяются три метода: сравнение облаков точек, сравнение триангуляционных поверхностей или полигональных моделей, растровое сравнение. На данном объекте были применены все три метода.

На начальном этапе с помощью программного продукта CloudCompare была определена скалярная величина смещения точек и в виде дополнительной информации присвоена облаку точек. При сравнении расстояний между облаками точек использовался метод расстояния «до ближайшей соседней точки», описанной в работе [11]. При таком подходе определяется ближайшая точка в эталонном облаке (съемка карьера от 2022 г.) для каждой сравниваемой точки (съемка от 2024 г.) и измеряется расстояние между ними. Полученные данные уже имеют информацию об изменении положения рельефа, однако применяемый подход срывает некорректно на участках с различным

расстоянием (шагом) между точками и на участках «слепых зон» сканирования, образуемых в результате перекрытия видимости между сканирующей системой (или обзором камеры) и объектом съемки. А также по нему невозможно судить о смещении конкретной точки, так как он не может идентифицировать её в обоих облаках, вследствие чего необходима детальная интерпретация полученных данных.

Далее по полученному облаку точек в RGB с использованием скалярной величины смещения построено растровое изображение объекта (ортофотоплан). При этом величины смещений менее 10 см исключались, так как выходили за полученную величину ошибки измерений на контрольных точках. Для удобства восприятия информации точки, имеющие отрицательный знак смещения по абсолютной высоте (осыпи, просадки, обрушения и т.п.), отображаются градиацией синего цвета от светлого (меньшая величина) к темному (большая величина), а положительный знак (насыпь) – градиацией красного цвета от светлого к темному. Пример результата представлен на рис. 5.



**Рис. 5**  
Растровое отображение участков проявления процессов сдвижения

**Fig. 5**  
A raster display of the areas where the displacement processes were detected

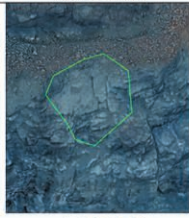
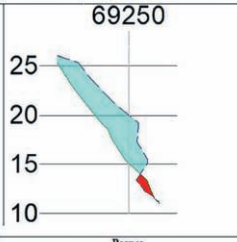
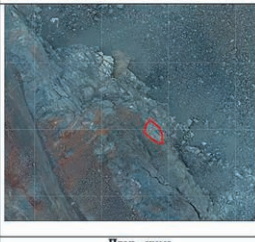
Полученный ортофотоплан позволил выявить потенциальные участки, на которых произошли изменения, и получить их предварительные координаты. Затем, используя отображение в пространстве каждого участка по отдельности, сравнивая полигональные модели и облака точек за два периода съемки, выполнили подтверждение о действительном изменении геометрии объекта или исключение участка из изучения, в случае если скалярная величина смещения была получена ошибочно. На этом же этапе осуществлялась корректировка трехмерных границ каждого участка.

Получив информацию о достоверности определения участка с изменением геометрии объекта, осуществили анализ характера смещений и определение формы проявления процесса сдвижения. Совместив две полигональные модели внутри уточненных границ участка, определили объем, а также построили разрезы.

Всего на объекте исследования зафиксировано 70 участков проявления процессов сдвижения, наиболее значимыми из которых являлись 5. С целью унификации всех полученных информационно-аналитических данных была разработана единая форма информационной карточки, которая содержит:

- уникальный номер участка (например: 01\_06\_24, где 01 – номер по порядку выявления, 06\_24 – месяц и год съемки);
- пространственные границы участка в рудничной системе координат (X, Y, Z);
- план-схему с нанесенной координатной сеткой через 50 м и границами участка;
- характерный разрез по двум полигональным моделям;
- характерный вид на границы участка и 3D-модель с текстурой;
- геологическую информацию об объекте;
- классификацию формы проявления процесса сдвижения;
- измеримые величины, характеризующие величину смещения и/или объем.

Пример информационной карточки изображен на рис. 6.

|  |  |   |     |
|--|--|---|-----|
| Номер: 12 06 24  | Дата съемки: 25.06.24  | Описание:   |     |
| Вид на 3D модель   | Границы в рудничной системе координат, м:                                  | Объем, м <sup>3</sup>   | 350 |
|   | X  | Азимут простирания, °   | 325 |
|  | Y  | Угол падения, °   | 51  |
|  | Z  | Породы: габброиды габбро-вердвального комплекса                                       |     |
|  | Классификация: плоскостное обрушение в результате воздействия горных работ |   |     |
|  | 69250  |  |     |
| Разрез   | План - схема   |   |     |

**Рис. 6**  
Информационная карточка участка проявления процессов сдвижения

**Fig. 6**  
A data sheet on the site where the displacement processes were detected

**Заключение и основные выводы**

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Полученные в результате съемок данные позволили получить информацию о фактическом положении дневной поверхности неэксплуатируемого карьера, подверженного влиянию подэтажного принудительного обрушения на подземном руднике.
2. С достаточной степенью достоверности удалось выявить 70 участков, на которых проявляется процесс сдвижения земной поверхности, а также геометрические характеристики данных процессов.
3. Показана перспективность совместного применения двух методик измерений, сочетание которых позволило компенсировать недостатки и обеспечить взаимодополнение полученных результатов.
4. Предложена форма унификации получаемых обоими методами информационно-аналитических данных.

**Список литературы / References**

1. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Рыбин В.В., Розанов И.Ю. Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных. *Горная промышленность*. 2024;(4):121–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>  
Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Rybin V.V., Rozanov I.Yu. Control and management of geomechanical state and stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines based on Big Data collection and analysis. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):121–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>
2. Рыльникова М.В., Перепелицын А.И., Зотеев О.В., Никифорова И.Л. Особенности и перспективы реализации проекта федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов». *Горная промышленность*. 2020;(1):132–139. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-132-139>  
Rylnikova M.V., Perepelitsyn A.I., Zoteev O.V., Nikiforova I.L. Features and prospects of the implementation of the draft federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, open pits and dumps”. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):132–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-132-139>
3. Семенова И.Э., Розанов И.Ю., Кулькова М.С. Комплексное исследование параметров обрушения подработанной толщи пород Ждановского месторождения. *Горный журнал*. 2023;(12):49–54. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.08>  
Semenova I.E., Rozanov I.Yu., Kulkova M.S. Integrated research of undermined rock mass failure parameters in Zhdanovskoe ore field. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):49–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.08>
4. McLeod T., Samson C., Labrie M., Shehata K., Mah J., Lai P. et al. Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine. *Geomatica*. 2013;67(3):173–180. <https://doi.org/10.5623/cig2013-036>
5. Coccia S., Al Heib M., Klein E. Combination of UAV-Borne lidar and UAV-Borne photogrammetry to assess slope stability. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22), April 10–12, 2022*. ICGRE 107. <https://doi.org/10.11159/icgre22.107>
6. Fey C., Wichmann V. Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain – handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017;42(5):789–802. <https://doi.org/10.1002/esp.4022>
7. James M.R., Robson S., Smith M.W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017;42(12):1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
8. Leahy J., Jabari S. Enhancing aerial Camera-LiDAR registration through combined LiDAR feature layers and graph neural networks. In: *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 45<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing (CSRS), 10–13 June 2024, Halifax, Canada*. 2024. Vol. XLVIII-M-4-2024:25–31., pp. 25–31. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-4-2024-25-2024>
9. Выстрчил М. Г., Мукминова Д. З., Балтыжакова Т. И., Парамонов В. Г., Валькова Е. О. Анализ деформационных процессов по данным маркшейдерских лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(2):78–98. Режим доступа: <https://giab-online.ru/en/catalog/analiz-deformacionnyh-processov-po-dannym-marksheyderskih-lazern> (дата обращения: 29.11.2025).  
Vystrchil M. G., Mukminova D. Z., Baltyzhakova T. I., Paramonov V. G., Valkova E. O. Analysis of deformation processes by survey data of laser scanning and photogrammetry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(2):78–98. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/en/catalog/analiz-deformacionnyh-processov-po-dannym-marksheyderskih-lazern> (accessed: 29.11.2025).
10. Широкова Т.А., Антипов А.В., Арбузов С.А. Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2012;1(4):39–46.  
Shirokova T.A., Antipov A.V., Arbuzov S.A. Area change detection using laser scanning data. *Interexpo GEO-Siberia*. 2012;1(4):39–46. (In Russ.)
11. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, QC, Canada, 28 May 2001 – 1 June 2001*. IEEE; 2001, pp. 145–152. <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423>

**Информация об авторах**

**Иванов Александр Сергеевич** – ведущий инженер лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; e-mail: [as.ivanov@ksc.ru](mailto:as.ivanov@ksc.ru)

**Розанов Иван Юрьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; e-mail: [i.rozanov@ksc.ru](mailto:i.rozanov@ksc.ru)

**Information about the authors**

**Aleksandr S. Ivanov** – Lead Engineer, Laboratory for Geomonitoring and Open-Pit Wall Stability, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: [as.ivanov@ksc.ru](mailto:as.ivanov@ksc.ru)

**Ivav Yu. Rozanov** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory for Geomonitoring and Open-Pit Wall Stability, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: [i.rozanov@ksc.ru](mailto:i.rozanov@ksc.ru)

**Article info**

Received: 03.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 17.02.2026

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 03.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 17.02.2026