

Построение фотограмметрических моделей на основе данных видеосъемки подземных горных выработок в условиях низкого уровня освещенности

В.С. Федотенко, А.Е. Кирков, Д.Н. Радченко ✉, А.П. Аверин

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация
✉ mining_expert@mail.ru

Резюме: В статье приводятся сведения о разработанном комбинированном методе обработки изображений из видеоряда, полученного в ходе полетов беспилотного летательного аппарата в подземных горных выработках. Видеоряд подвергался раскадровке, при которой оценивались различия кадров, составляющих стереопару. Для решения этой задачи применялись возможности компьютерного зрения. Для реализации алгоритмов компьютерного зрения использована библиотека OpenCV, с помощью которой был разработан программный модуль для анализа схожести изображений на базе показателей SSIM и MSE. В ходе исследования установлено, что применение технологий компьютерного зрения и нейросетей позволяет значительно улучшить качество и точность модели горной выработки. Дальнейшее развитие предложенного метода состоит в наработке методик и опыта количественной оценки неоднородностей массива и описания формы элементов горной выработки на различных участках (в кровле, почве, боках и т.д.). Весьма перспективна возможность применения технологий улучшения качества изображения на основе глубокого обучения. Отдельный интерес представляет построение 3D-моделей. Развитие и внедрение в практику подземных горных работ фотограмметрических методов на основе данных видеосъемки будет способствовать решению таких задач, как автономный мониторинг состояния крепи горных выработок, уточнение контуров очистного пространства в динамике выпуска рудной массы, планирование очистной выемки в соседних камерах после проведения закладочных работ, обнаружение опасностей, анализ геологической среды с уточнением, например, параметров систем трещин в горных массивах и многих других.

Ключевые слова: фотограмметрия, подземные горные выработки, модель горной выработки, беспилотный летательный аппарат, видеосъемка, очистные камеры

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00345, <https://rscf.ru/project/25-17-00345/>

Для цитирования: Федотенко В.С., Кирков А.Е., Радченко Д.Н., Аверин А.П. Построение фотограмметрических моделей на основе данных видеосъемки подземных горных выработок в условиях низкого уровня освещенности. *Горная промышленность*. 2025;(6):187–193. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-187-193>

Development of photogrammetric models based on video survey data of underground mine workings in low-light conditions

V.S. Fedotenko, A.E. Kirkov, D.N. Radchenko ✉, A.P. Averin

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ mining_expert@mail.ru

Abstract: The article provides information on a combined method developed for processing images from a video sequence obtained during flights of an unmanned aerial vehicle in underground mine workings. The video sequence was subjected to shot breakdown, during which the differences between the frames comprising the stereoscopic pair were evaluated. This task was addressed using computer vision capabilities. The computer vision algorithms were implemented using the OpenCV library, which was used to develop a software module to analyze the image similarity based on the SSIM and MSE indicators. The study found that the use of computer vision and neural network technologies can significantly improve the quality and accuracy of the mine workings models. Further development of the proposed method consists in developing techniques and gaining the experience for quantitative assessment of the rock mass heterogeneities and describing the shapes of mine workings elements in various locations (in the roof, floor, walls, etc.). The possibility of using the image quality enhancement technologies based on deep learning algorithms is quite promising. A particular area of interest is creation of 3D models. The development and implementation of video-based photogrammetric methods in underground mining practice will contribute to solving tasks such

as autonomous monitoring of the support condition in mine workings, refinement of the stope profile during the ore drawing, planning of stoping in adjacent rooms after backfilling operations, hazard detection, and geological analysis with, for instance, refinement of the fracture-system parameters in rock masses among many others.

Keywords: photogrammetry, underground mine workings, mine working model, unmanned aerial vehicle, video imaging, stopes

Acknowledgements: The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation, grant No. 25-17-00345, <https://rscf.ru/project/25-17-00345/>

For citation: Fedotenko V.S., Kirkov A.E., Radchenko D.N., Averin A.P. Development of photogrammetric models based on video survey data of underground mine workings in low-light conditions. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):187–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-187-193>

Введение

Последние достижения в применении фотограмметрии свидетельствуют о возрастающей роли технологий, которые позволяют на базе оперативной видеосъемки в режиме реального времени или близком к нему создавать объемные модели, проводить мониторинг состояния горных выработок, способствовать решению проблем безопасности. Методы построения фотограмметрических моделей на основе видеосъемки изменили подходы к мониторингу, разведке и управлению параметрами геотехнологических процессов. Эти методы обеспечивают сбор точных пространственных данных без необходимости непосредственного присутствия человека на опасных участках. Развитие фотограмметрии особенно актуально для оценки горнотехнической ситуации в подземных горных выработках, особенно в очистном пространстве подземных камер, доступ человека в которое запрещен. Интерес к обследованию подземного пространства возрастает с развитием технологий лазерного сканирования и применением беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих видеосъемку. Комбинация методов лазерного сканирования и видеосъемки позволяет повысить информативность полученных данных. Вместе с тем при видеосъемке с применением беспилотных летательных аппаратов существенное снижение качества видеоданных, вызванное сложной средой подземных выработок – недостаточным освещением, запыленностью, задымленностью и высокой влажностью, представляет собой ключевую проблему для построения фотограмметрических моделей. Поэтому до настоящего времени обследование подземных пространств связано с непосредственными видеонаблюдениями оператором или постобработкой видеоданных персоналом с получением соответствующих выводов для планирования горных работ. Это определяет необходимость совершенствования имеющихся подходов и создания новых методов построения фотограмметрических моделей на основе видеоданных в условиях плохой освещенности подземных горных выработок.

Анализ этапов и масштабов развития технологий компьютерного зрения и машинного обучения в горной промышленности свидетельствует о возрастающем интересе к данному направлению как важному исследовательскому инструменту. Инновационные решения после внедрения на горных предприятиях быстро становятся повседневными, эффективно дополняя методы и средства измерений маркшейдерских и геомеханических служб. Спектр применения фотограмметрических методов в сфере геологии [1], исследований природных и техногенно нарушенных ландшафтов [2], технологии открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых достаточно широк [3]. Вместе с тем до настоящего времени развитие методов построения фотограмметрических моделей в сложных условиях подземных горных выработок на основе видеодан-

ных недостаточно. Например, в работе Исследовательского центра интеллектуальных транспортных систем в г. Ухани (Китай) указано на недостаток исследований, посвященных подземным горным работам в рассматриваемой области [4].

На основе данных аналитических исследований [5] можно выделить следующие, актуальные для построения фотограмметрических моделей в условиях подземных горных выработок ключевые аспекты. Одной из основных проблем при работе в подземных условиях является сильное ухудшение качества визуальных данных. Причем однозначно определить «низкий уровень освещенности» в подземных горных выработках, например, в системе СИ (Лк) недостаточно. Причины низкого качества видео – это низкая освещенность, усугубленная задымленностью выхлопными газами машин с двигателями внутреннего сгорания, высокой влажностью и парами, запыленностью. Эти факторы приводят к таким эффектам на видеозаписи, как низкая контрастность, узкий динамический диапазон, цветовые искажения и значительный шум, что крайне негативно сказывается на качестве последующей обработки данных и построения 3D-моделей.

Для решения этих задач в области обработки изображений активно развиваются методы улучшения качества изображений. Все их можно разделить на три крупные категории: традиционные методы, методы на основе глубокого обучения и прочие подходы [5].

Традиционные методы включают хорошо зарекомендовавшие себя подходы, работающие в пространственной области. К ним могут быть отнесены различные модификации эквализации (уравнивания) гистограммы [6–9] для повышения контраста, а также метод гамма-коррекции для нелинейного преобразования яркости [10]. Методы, работающие в частотной области, например, гомоморфная фильтрация [11; 12] и вейвлет-преобразование [13; 14] позволяют разделить освещенность и отражательную способность сцены (здесь и далее – конкретное место съемки в пределах определенной локации), что, судя по опубликованным данным, эффективно для компенсации неравномерного освещения и весьма актуально для апробации подобных методов обработки изображений, полученных в ходе видеосъемки подземных горных выработок.

Методы второй категории, появившиеся позднее и охватывающие технологии улучшения качества изображений на основе глубокого обучения, свидетельствуют о более надежных результатах в задачах повышения качества изображений. Так, например, сверточные нейронные сети [15; 16] и генеративно-состязательные сети [17; 18] позволяют обучать модели не только на реальных данных, но и на синтезированных. Данные методы подходят для сложных нелинейных преобразований, эффективно устраняют шумы, корректируют цвета и повышают детализацию даже в крайне сложных условиях [19]. Перенос таких ме-

тодов в практику обработки изображений, полученных в условиях низкого уровня освещенности подземных горных выработок, будет способствовать развитию технологий изучения выработанных пространств различного назначения [20].

Среди прочих методов можно выделить следующие группы. В первую очередь теорию Ретинекса [21–23], которая моделирует человеческое восприятие цвета, разделяя изображение на освещенность и отражательную способность, что особенно полезно для коррекции освещения в том числе в условиях, где уровень освещенности весьма низкий. Методы слияния изображений [24–26] комбинируют информацию из нескольких источников или вариантов обработки одного изображения для получения результата высшего качества. Также в последнее время получили распространение методы удаления дымки или тумана, что весьма актуально для подземных условий проведения видеосъемки [27; 28]. Как правило, они основаны на физических моделях рассеяния света. Такие методы напрямую применимы для борьбы с препятствующими обработке изображений запыленностью и задымленностью в подземных горных выработках.

В целом, успешное построение фотограмметрических моделей в подземных условиях требует комплексного подхода, сочетающего предварительное улучшение видеоданных для подавления шумов, коррекции освещения и цвета, что напрямую влияет на точность и надежность последующего трёхмерного представления элементов горных выработок и их 3D-изображений. Очевидно, что выбор конкретного метода или их комбинации должен определяться спецификой условий съёмки и требуемым балансом между качеством результата и вычислительной эффективностью. В статье приводятся сведения о разработанном комбинированном методе обработки изображений из видеоряда, полученного в ходе полетов беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в подземных горных выработках.

Разработка метода построения фотограмметрических моделей

Видеоряд, полученный в ходе полета БПЛА в подземных горных выработках, подвергался раскадровке. При раскадровке и составлении стереопар оценивалось различие кадров, составляющих стереопару. В современных условиях для решения подобных задач применяются возможности компьютерного зрения. В качестве варианта библиотеки, реализующей алгоритмы компьютерного зрения, использована библиотека OpenCV. На базе данной библиотеки был разработан программный модуль для анализа схожести изображений на базе показателей SSIM и MSE [5; 29].

Среднеквадратическая ошибка (MSE) – это метрика, используемая для оценки различий между двумя изображениями (например, исходным и обработанным). Она вычисляет средний квадрат разницы между соответствующими пикселями. Для двух изображений одинакового размера (A и B) MSE рассчитывается из выражения [5]:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [A(i, j) - B(i, j)]^2, \quad (1)$$

где $M \times N$ – размер изображения (ширина \times высота); $A(i, j)$ – значение пикселя (яркость или цвет) в позиции i, j на первом изображении; $B(i, j)$ – значение пикселя на втором изображении.

Индекс структурного сходства (SSIM) – это метрика, которая оценивает визуальное сходство двух изображений,

учитывая яркость, контрастность и структуру. Она более точна, чем MSE/PSNR, так как учитывает особенности человеческого восприятия.

Для двух изображений одинакового размера (A и B) показатель SSIM вычисляется по формуле [29]:

$$SSIM(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + C_1)(2\sigma_{AB} + C_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2)}, \quad (2)$$

где μ_A, μ_B – средние значения яркости; σ_A, σ_B – стандартные отклонения показателя контрастности; σ_{AB} – ковариация между пикселями сравниваемых изображений; C_1, C_2 – константы для стабилизации.

Разработанный программный модуль для обработки видео для фотограмметрии обеспечивает правильный подбор пороговых значений MSE и SSIM, что позволяет избежать дубликатов и потерь ключевых кадров. Оптимальные значения зависят от скорости движения БПЛА с установленной видеокамерой, частоты кадров и детализации сцены. Накопление различий в смежных кадрах напрямую зависит от скорости движения БПЛА, что определяет динамику изменений численных значений показателей MSE и SSIM. При раскадровке из видеофайла извлекаются все кадры, включая ключевые и промежуточные. Например, для 30-секундного видео с частотой 25 кадров в секунду – это 750 кадров.

В табл. 1 приведена интерпретация числовых значений показателей SSIM и MSE после выполненной раскадровки и обработки кадров. Анализ данных таблицы свидетельствует, что степень сходства варьируется между «почти идентичные изображения» при SSIM = 0,95–1,00 и MSE = 0 и «сильно разные изображения» при SSIM < 0,60 и MSE > 100. В ходе анализа раскадровки для каждой пары смежных кадров в разработанном программном модуле рассчитывается значение соответствующего показателя.

Таблица 1
Интерпретация числовых показателей SSIM и MSE при сравнении пары изображений

Table 1
Interpretation of the SSIM and MSE numerical indicators when comparing a pair of images

Значение SSIM	Значение MSE	Степень сходства
0,95–1,00	0	Почти идентичные изображения
0,90–0,94	1–10	Высокое сходство
0,80–0,89	10–50	Умеренные различия
0,60–0,79	50–100	Заметные искажения
< 0,60	> 100	Сильно разные изображения

Статистические характеристики показателей SSIM и MSE для различных условий фотограмметрической съемки представлены в табл. 2, где приведено попарное сравнение отдельных кадров съемки.

Под классической аэрофотосъемкой понимается рядовая съемка на открытых горных работах в дневное время суток с беспилотного летательного аппарата. Известно, что при подготовке таких съемок одним из этапов является расчет и задание маршрута съемки для БПЛА. Данная операция позволяет установить оптимальное число базисов фотографирования и их взаимное расположение. В результате обеспечивается требуемый объем исходной информации при обработке без потерь качества результирующей фотограмметрической модели.

Таблица 2
Статистические характеристики показателей SSIM и MSE для различных условий фотограмметрической съемки

Наименование показателя	Классическая аэрофотосъемка на открытых горных работах (для сравнения)	Видеосъемка с БПЛА в подземных горных выработках	
		в очистных камерах со светодиодной подсветкой камеры БПЛА	в горно-капитальной выработке с искусственным освещением
Минимум SSIM	0,08	0,8	0,9
Максимум SSIM	0,29	1,00	1,00
Среднее SSIM	0,14	0,88	0,90
Минимум MSE	93,91	0,00	4,00
Максимум MSE	107,82	55,2	31,9
Среднее MSE	101,20	24,3	17,8

Table 2
Statistical characteristics of the SSIM and MSE indicators for various photogrammetric survey conditions

В подземных условиях при обследовании горных выработок заблаговременное выполнение расчета маршрута до настоящего времени представляется затруднительным ввиду отсутствия ГНСС навигации и сложности создания альтернативной навигации на базе инерциальных систем. Кроме того, при съемке выработанных пространств, например очистных, характеризующихся неизвестной конфигурацией, единственным способом сбора исходной информации для построения фотограмметрических моделей является видеофиксация с последующей раскадровкой. Для оценки возможности реализации такого подхода видеосъемка с применением БПЛА проводилась в подземном руднике для двух вариантов сцен. Первый предусматривал видеосъемку в условиях крайне низкой освещенности – осуществлялась светодиодная подсветка обнажений горных выработок непосредственно с БПЛА. Вторая сцена предусматривала видеосъемку в горно-капитальной выработке с искусственным освещением. Методика включала облет подземных горных выработок БПЛА с разными скоростями по различным траекториям и с разных стартовых позиций. Постоянными параметрами эксперимента являлись параметры камеры и внешних условий (освещение).

Анализ данных табл. 2 показывает, что при проведении классической аэрофотосъемки для условий открытых горных работ распределение показателя SSIM и MSE близко к нормальному. Оценка показателей пары изображений – однозначная, например, как в табл. 2, средние показатели составляют 0,14 и 101,2, что позволяет сделать вывод о том, что изображения неидентичны.

Сравнение статистических показателей MSE и SSIM, полученных по всем исследуемым вариантам раскадровки видеофайлов, полученных при полете БПЛА в условиях с низкой освещенностью, показывает наличие асимметрии в распределении значений оцениваемых показателей. Это определяет необходимость дополнительной обработки кадров в виде фильтрации и выбраковки дублирующих изображений, а также их коррекции. При фильтрации кадров исключались кадры с перекрытием более 90%, чтобы не дублировать изображения. За рабочий диапазон принимались кадры с перекрытием 40–80 %. Оптимальное значение при этом составляло 60% – как общепринятое значение в практике построения фотограмметрических моделей.

В ходе коррекции убирались шумы, размытие и другие дефекты, характерные для съемок в подземных условиях. Подбор стереопар осуществлялся по следующему алгоритму. Рассчитывались значения показателей MSE и SSIM для ряда кадров. Полученные значения сравнивались

с пороговыми, указанными в табл. 1. Для построения фотограмметрической модели собирались кадры в стереопары только со степенью сходства «умеренные различия», см. табл. 1. В результате обеспечивалась выбраковка дублирующих кадров при низких скоростях движения («зависания в воздухе») БПЛА либо при резких изменениях его скорости и траектории, что определяет необходимость обработки практически всех кадров, без выбраковки. С учетом итеративной обработки формировалось несколько фотограмметрических моделей, сопоставление которых позволило оценить качество работы алгоритма фильтрации и корректность построения цифрового двойника горной выработки.

Апробация метода построения фотограмметрических моделей

В результате апробации метода построения фотограмметрических моделей на основе данных видеосъемки в условиях низкого уровня освещенности подземных горных выработок была установлена потенциальная возможность и подтверждена эффективность обработки полученного видеоряда с раскадровкой и получением необходимых стереопар. Пример отобранных для построения фотограмметрической модели стереопар с перекрытием кадров около 70% представлен на рис. 1.

Установлено, что в отдельных диапазонах кадров видеоряда показатели MSE и SSIM имеют линейный тренд между положением кадра относительно исходного и значением метрики. Размер выборки кадров зависит от скорости движения беспилотного аппарата в процессе съемки, а следовательно, количества пригодных для построения модели кадров за секунду полета БПЛА. Существенное влияние в условиях слабой освещенности имеет текстура снимаемой поверхности. Наличие ярко выраженных стратиграфических разностей, слоистости и трещиноватости, элементов крепи горных выработок, сколов и заколов, является положительным фактором для построения качественных фотограмметрических моделей очистного пространства и горных выработок. Выявленные закономерности накладывают ограничения на методику проведения видеосъемки в подземных условиях, что выражается в необходимости включения в план полета дублирующих траекторий.

На рис. 2, а, б на примере раскадровки видеоряда длительностью 12 с полета БПЛА приведены результаты расчета и сравнения показателей SSIM и MSE для обеспечения эффективного поиска кадра, который будет составлять оптимальную стереопару с первым кадром видеоряда при оптимальном перекрытии, близком к 60%. На участках за-

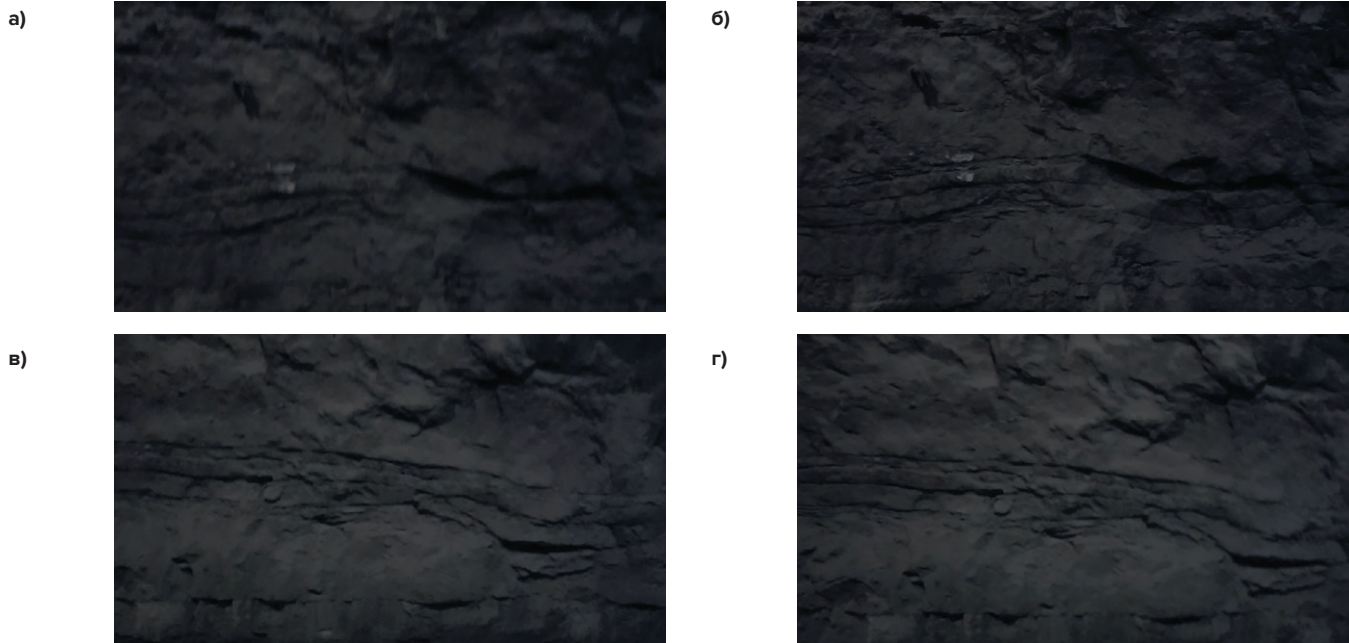


Рис. 1
Пример отобранных для построения фотограмметрической модели стереопар (а, б) и (в, г) с перекрытием кадров около 70%

Fig. 1.
Examples of stereo pairs (a, б) and (в, г) selected for building a photogrammetric model with the frame overlap of about 70%

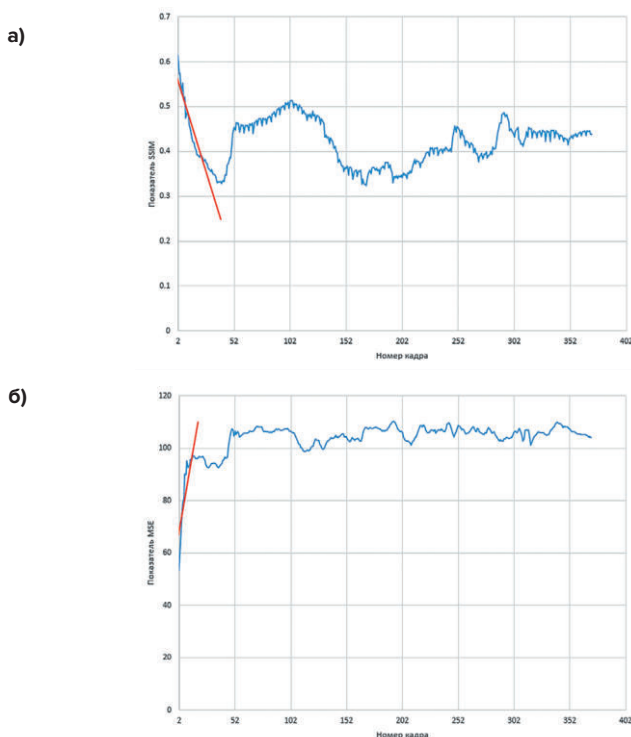


Рис. 2
Сравнение распределения значения SSIM и MSE при сравнении 1 кадра со всем видеопотоком (кадры 2–360)

Fig. 2
A comparison of the SSIM and MSE values distribution when comparing the 1st frame with the entire video sequence (frames 2–360)

висимостей, близких к линейным, определяют размер выборки для поиска оптимального кадра для составления стереопары.

Линия тренда, выделенная красным цветом на рис. 2, а, соответствует рабочему диапазону в 30 кадров. На рис. 2, б выборка ограничивается 17 кадрами. С учетом того что методикой за рабочий диапазон приняты кадры с перекры-

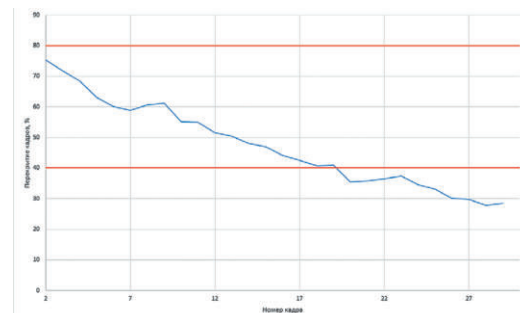


Рис. 3
Оценка распределения перекрытия 1 кадра с 30 последующими кадрами видеопотока, попадающими в рабочий диапазон 40–80 %

Fig. 3
An estimation of the overlap distribution of the 1st frame with the 30 subsequent frames of the video sequence falling within the working range of 40–80%

тием 40–80%, на рис. 3 приведена иллюстрация оценки перекрытия кадров из полученного диапазона.

Данные рис. 3 наглядно свидетельствуют, что из выборки в рабочий диапазон по перекрытию попадают кадры со 2-го по 17-й. Реализация такого подхода по ограничению диапазона выборки для поиска оптимальных кадров позволяет сократить время обработки и снизить ресурсоемкость решаемой задачи.

Первые результаты апробации разработанного метода и программного обеспечения для построения фотограмметрических моделей по результатам видеосъемки очистного пространства приведены на рис. 4.

На полученной фотограмметрической модели видны текстурные особенности участка горного массива, нарушенного в результате проведения буровзрывных работ. Модель позволяет качественно оценить форму и наличие неоднородных участков, заколов, выемок. Качество модели оценивалось прямыми наблюдениями оператором БПЛА при полете в подземном руднике. Анализ полученной фотограмметрической модели подтверждает работоспособ-



Рис. 4
Результат построения
фотограмметрической модели
стенки (а) и торца (б)
горной выработки
в условиях низкой
освещенности (подсветка
видеокамеры БПЛА)

Fig. 4
A result of creating
a photogrammetric model
of the wall (a) and face (b)
of a mine working in low light
conditions (as illuminated
by the UAV video camera)

ность метода. Развитие и внедрение в практику подземных горных работ фотограмметрических методов на основе данных видеосъемки будет способствовать решению таких задач, как автономный мониторинг состояния крепи горных выработок, уточнение контуров очистного пространства в динамике выпуска рудной массы, планирование очистной выемки в соседних камерах после проведения

закладочных работ, обнаружение опасностей, анализ геологической среды с уточнением, например, параметров систем трещин в горных массивах и многих других.

Закключение

Создание фотограмметрической модели на основе видео в сложных условиях требует тщательной подготовки данных, коррекции изображений и подбора стереопар. Поиск оптимальных стереопар может быть более эффективным при соответствующем разбитии видеоряда и параллельных вычислениях. В зависимости от условий, определяющих сцену (освещение, текстура, структура массива), зависит выбор показателей, который наиболее адекватно ограничивает диапазон выборки для определения оптимального кадра. Установленное наличие линейных трендов однозначно позволяет привлечь для решения задач фотограмметрии в подземных горных выработках технологии компьютерного зрения и нейросети. Их применение может значительно улучшить качество и точность модели. Дальнейшее развитие предложенного метода состоит в наработке методик и опыта количественной оценки неоднородностей массива и описания формы элементов горной выработки на различных участках – в кровле, почве и боках. Также весьма перспективна и рассматривается в настоящее время возможность применения технологии улучшения качества изображения на основе глубокого обучения. Отдельный интерес представляет построение 3D-моделей, которые могут и должны быть дополнением к цифровым двойникам, отстраиваемым в настоящее время с применением SLAM технологий. Причем речь идет как о горно-капитальных выработках, так и очистных камерах на различных этапах выпуска рудной массы.

Список литературы / References

- Guo J., Wu L., Zhang M., Liu S., Sun X. Towards automatic discontinuity trace extraction from rock mass point cloud without triangulation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;112:226–237. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.023>
- Kong D., Saroglou C., Wu F., Sha P., Li B. Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;141:104729. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104729>
- 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>
- Zhang J., Xu W., Lu Y., Chen Z., Yang D. Multi-view adaptive image enhancement with hierarchical attention for complex underground mining scenes. *Expert Systems with Applications*. 2025;294:128761. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128761>
- Lepcha D.C., Goyal B., Dogra A., Sharma K.P., Gupta D.N. A deep journey into image enhancement: A survey of current and emerging trends. *Information Fusion*. 2023;93:36–76. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.12.012>
- Lee S., Kim N., Paik J. Adaptively partitioned block-based contrast enhancement and its application to low light-level video surveillance. *SpringerPlus*. 2015;4:431. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1226-x>
- Gupta P., Kumare J., Singh U., Singh R. Histogram based image enhancement techniques: a survey. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2017;5(6):177–182. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27062.11845>
- Panse V., Gupta R. Medical image enhancement with brightness preserving based on local contrast stretching and global dynamic histogram equalization. In: *2021 IEEE 10th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Bhopal, India, 18–19 June 2021*. IEEE; 2021, pp. 164–170. <https://doi.org/10.1109/CSNT51715.2021.9509670>
- Ulutas G., Ustubioglu B. Underwater image enhancement using contrast limited adaptive histogram equalization and layered difference representation. *Multimedia Tools and Applications*. 2021;80(10):15067–15091. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10426-2>
- Huang S-C., Cheng F-C., Chiu Y-S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013;22(3):1032–1041. <https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2226047>
- Yu H., Li X., Lou Q., Yan L. Underwater image enhancement based on color-line model and homomorphic filtering. *Signal, Image and Video Processing*. 2022;16(1):83–91. <https://doi.org/10.1007/s11760-021-01960-z>

12. Yugander P., Tejaswini C.H., Meenakshi J., Samapath K., Suresh Varma B.V.N., Jagannath M. MR Image enhancement using adaptive weighted mean filtering and homomorphic filtering. *Procedia Computer Science*. 2020;167:677–685. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.334>
13. Loza A., Bull D.R., Hill P.R., Achim A.M. Automatic contrast enhancement of low-light images based on local statistics of wavelet coefficients. *Digital Signal Processing*. 2013;23(6):1856–1866. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.06.002>
14. Iqbal M.Z., Ghafoor A., Siddiqui A.M. Satellite image resolution enhancement using dual-tree complex wavelet transform and nonlocal means. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2013;10(3):451–455. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2208616>
15. Wang Y., Zhang J., Cao Y., Wang Z. A deep CNN method for underwater image enhancement. In: *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, 17-20 September 2017*. IEEE; 2017, pp. 1382–1386. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296508>
16. Li C., Guo C., Ren W., Cong R., Hou J., Kwong S. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2020;29:4376–4389. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2955241>
17. Fabbri C., Islam M.J., Sattar J. Enhancing Underwater imagery using generative adversarial networks. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, Australia, 21–25 May 2018*. IEEE; 2018, pp. 7159–7165. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460552>
18. Guo Y., Li H., Zhuang P. Underwater image enhancement using a multiscale dense generative adversarial network. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2020;45(3):862–870. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2911447>
19. Jiang Y., Gong X., Liu D., Cheng Y., Fang C., Shen X. EnlightenGAN: Deep light enhancement without paired supervision. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2021;30:2340–2349. <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3051462>
20. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2016;(5):28–33. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.02>
21. Li J., Feng X., Hua Z. Low-light image enhancement via progressive-recursive network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2021;31(11):4227–4240. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3049940>
22. Wei C., Wang W., Yang W., Liu J. Deep retinex decomposition for low-light enhancement. arXiv:1808.04560. 14 August 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.04560>
23. Guo X., Li Y., Ling H. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017;26(2):982–993. <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2639450>
24. Ancuti C., Ancuti C.O., Haber T., Bekaert P. Enhancing underwater images and videos by fusion. In: *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Providence, RI, USA, 16–21 June 2012*. IEEE; 2012, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6247661>
25. Wang B., Wei B., Kang Z., Hu L., Li C. Fast color balance and multi-path fusion for sandstorm image enhancement. *Signal, Image and Video Processing*. 2021;15(3):637–644. <https://doi.org/10.1007/s11760-020-01786-1>
26. Fu X., Zeng D., Huang Y., Liao Y., Ding X., Paisley J. A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images. *Signal Processing*. 2016;129:82–96. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.031>
27. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011;33(12):2341–2353. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.168>
28. Xie K., Pan W., Xu S. An underwater image enhancement algorithm for environment recognition and robot navigation. *Robotics*. 2018;7(1):14. <https://doi.org/10.3390/robotics7010014>
29. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004;13(4):600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>

Информация об авторах

Федотенко Виктор Сергеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2082-6040>

Кирков Алексей Евгеньевич – главный маркшейдер, научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Радченко Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретических основ проектирования горно-технических систем, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1821-3840>; e-mail: mining_expert@mail.ru

Аверин Андрей Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.08.2025

Поступила после рецензирования: 27.10.2025

Принята к публикации: 10.11.2025

Information about the authors

Viktor S. Fedotenko – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Department of Design Theory and Geotechnology for Integrated Subsurface Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2082-6040>

Aleksey E. Kirkov – Chief Mine Surveyor, Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Dmitry N. Radchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Theoretical Fundamentals for Mining Systems Design, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1821-3840>; e-mail: mining_expert@mail.ru

Andrey P. Averin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 29.08.2025

Revised: 27.10.2025

Accepted: 10.11.2025