

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА

Ф. М. Голубев✉, В. П. Сажнев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская Федерация

✉ f_golubev@list.ru

Аннотация: На основании экспериментальных данных определены оптимальные подходы к формированию трехмерных моделей объектов поверхности различных размеров. Установлены граничные условия применения в качестве опорных точек полиуретановых отражателей и тахеометрических призм. Представленные результаты исследований позволяют оптимизировать позиционирование облаков точек в зависимости от масштаба сканируемого объекта, что существенно ускоряет создание трехмерных моделей горных выработок и подработанных зданий.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, облако точек, интенсивность отраженного сигнала, фасадная съемка, опорные точки

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования проводились в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания (№ FRSR-2023-0002).

Для цитирования: Голубев ФМ, Сажнев ВП. Оптимизация формирования трехмерных моделей объектов поверхности с использованием наземного лазерного сканера. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):16-20. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-16-20>.

OPTIMIZATION OF THE FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF SURFACE OBJECTS USING A TERRESTRIAL LASER SCANNER

F. M. Golubev✉, V. P. Sazhnev

Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», Donetsk, Russian Federation

✉ f_golubev@list.ru

Abstract: Based on experimental data, the article defines optimal approaches to the formation of three-dimensional models of surface objects of various sizes. Boundary conditions for the use of polyurethane reflectors and tachymetric prisms as reference points are established. The presented research results allow us to optimize the positioning of point clouds depending on the scale of the scanned object, which significantly accelerates the creation of three-dimensional models of mine workings and undermining buildings.

Keywords: terrestrial laser scanning, point cloud, reflected signal intensity, facade survey, reference points

Acknowledgments, funding, financial Support: The research was conducted at the Federal State Budgetary Scientific Institution «RANIMI» within the framework of the state assignment (No. FRSR-2023-0002).

For citation: Golubev F M, Sazhnev VP. Optimization of the formation of three-dimensional models of surface objects using a terrestrial laser scanner. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-16-20>.

Введение

Геомеханическое обеспечение открытой добычи полезных ископаемых, определение критериев устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов, а также обеспечение безопасной эксплуатации подрабатываемых объектов поверхности подразумевают постоянное маркшейдерско-геодезическое сопровождение. В условиях дефицита квалифицированных инженерных кадров, невозможности применения беспилотных летательных аппаратов и постоянно возникающих задач, связанных с мониторингом промышленных и гражданских объектов, описанных в нормативном документе «Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03)», актуальным вопросом становится оптимизация геодезических и маркшейдерских работ.

Перспективным направлением для решения описанных задач является применение наземного лазерного сканирования и создание трехмерных моделей, что позволяет решать технические задачи как при добыче полезных ископаемых открытым способом, так и при восстановлении поврежденного жилого фонда.

Согласно [1], обработка результатов наземного лазерного сканирования состоит из следующих этапов:

- позиционирования облаков точек;
- трансформации облаков точек в необходимую систему координат;
- создания поверхностей или solid-моделей (при необходимости).

Одним из наиболее трудоемких процессов при создании трехмерных моделей объектов поверхности является формирование единого облака точек из облаков, снятых с различных пунктов стояния сканера.

Автор [2] рассматривает несколько способов объединения облаков точек:

- визуальный способ;
- по характерным точкам;
- по опорным знакам.

Стоит отметить, что применение первых двух методов зачастую не позволяет достичь удовлетворительной точности. Аналогичные сложности возникают и при использовании наземных лазерных сканеров для фасадной съемки [3].

Согласно описанному в [4, 5] опыту обработки результатов лазерного сканирования, применение различного программного обеспечения для обработки облаков точек в автоматическом режиме не позволяет их корректно позиционировать без должного геодезического обоснования. Для создания такого обоснования и ориентирования получаемых в результате работы лазерной сканирующей системы снимков относительно друг друга необходимо, чтобы на каждом из них было как минимум три точки, присутствующие на предыдущем и последующем снимках. Это требование существенно повышает трудозатраты, делая необходимым создание масштабной сети марок (опорных точек).

Гораздо более рациональным подходом является определение координат марок в глобальной системе координат с последующим ориентированием снимков уже не относительно друг друга, а относительно единой системы. Такой подход позволяет оптимизировать работы по ориентированию снимков и снизить количество необходимых опорных точек в два раза, однако требования к светоотражающим свойствам

опорных точек многократно возрастают. Взаимосвязь между интенсивностью (I) отраженного сигнала и коэффициентом r отражающей поверхности в геометрической оптике определяется выражением Ламберта [3].

Известно, что измерения объектов из материалов с высоким коэффициентом отражения в результате дают более надежные и точные результаты [6–9].

С учетом вышесказанного и описанных в [10–20] возможностях наземного лазерного сканирования становится очевидна актуальность совершенствования методики проведения съемочных работ.

Цель работы: оптимизация формирования трехмерных моделей объектов поверхности с использованием наземного лазерного сканера.

Материал и методы исследований

Наиболее распространенным видом отражателей, применяемых в качестве опорных точек, являются полиуретановые марки. Видимость светоотражающих полиуретановых поверхностей требует крайне высокой плотности сканирования.

Для обеспечения видимости таких марок необходимо соблюдение следующей зависимости:

$$\Delta\varphi_{MAX} \leq 2 \arctg \left(\frac{l}{2 \cdot R} \right),$$

где $\Delta\varphi_{MAX}$ – максимальный допустимый угловой шаг сканирования, градус; l – размер марки внешнего ориентирования, м; R – удаление марки внешнего ориентирования от лазерной сканирующей системы, м.

Результаты исследований и их обсуждение

Интенсивность отраженного сигнала полиуретановых марок существенно снижается с увеличением расстояния между ними и точкой расположения наземного лазерного сканера (рис. 1).

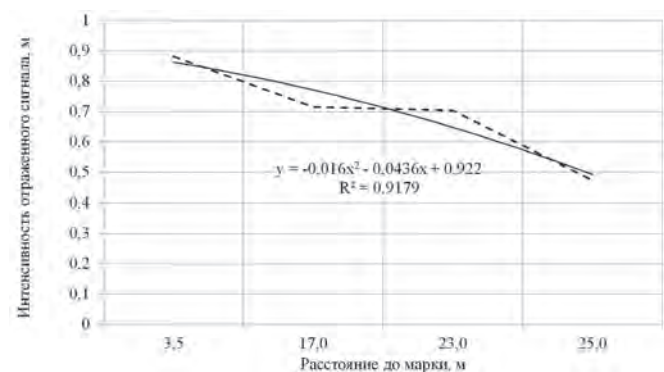


Рис. 1. Результаты исследования интенсивности отраженного сигнала полиуретановых марок /
Fig. 1. Results of the study of the intensity of the reflected signal of polyurethane marks

Анализ приведенной на рисунке 1 зависимости показывает, что уже на расстоянии 25 м от сканера интенсивность отраженного сигнала полиуретановых марок падает более чем в два раза. При увеличении расстояния до 50 м интенсивность отраженного сигнала снижается до показателей уровня снимаемых объектов поверхности и марки становятся неопределимыми.

Подобные свойства позволяют эффективно использовать марки при проведении фасадных съемок зданий (рис. 2).



Рис. 2. Модель главного фасада девятиэтажного дома с нанесенным градиентом отклонения панелей от вертикали /
Fig. 2. Model of the main facade of a nine-story building with a gradient of panel deviation from the vertical applied

Для получения адекватной модели результаты сканирования следует сравнивать с результатами теодолитной съемки углов здания. Пример такого сравнения приведен на рисунке 3.

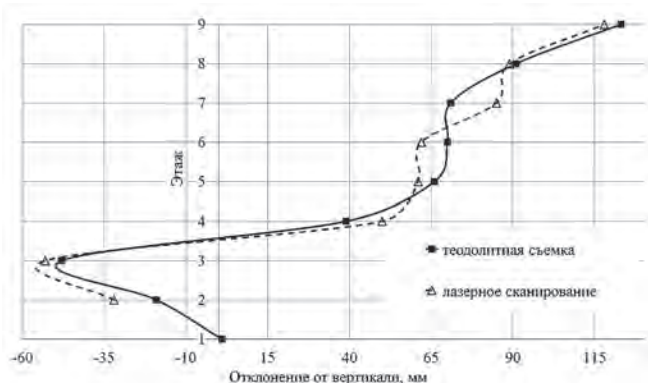


Рис. 3. Сравнение результатов наземного лазерного сканирования с теодолитной съемкой /
Fig. 3. Comparison of the results of terrestrial laser scanning with theodolite survey

Учитывая, что светоотражающие полиуретановые марки не идентифицируются на снимках уже на расстояниях 50–100 м, их использование нецелесообразно при применении мощных наземных лазерных сканеров и сканировании масштабных объектов. Помимо необходимости использования сотен марок для формирования трехмерных геодезических моделей крупных объектов, таких как карьеры или участки со сложной структурой рельефа, использование полиуретановых марок делает необходимым избыточное количество точек стояния сканера, что увеличивает трудозатраты в десятки раз.

Стоит отметить, что опыт применения наземного лазерного сканера RIEGL LMS420i на Каранском гранитном карьере позволяет сделать вывод об удовлетворительной видимости его бортов, вплоть до расстояния 700–800 м. Пример результатов сканирования наземным лазерным сканером приведен на рисунке 4.

Для оптимизации ведения работ по съемке и высокоточному позиционированию облаков точек была разработана методика применения тахеометрических призм в качестве опорных точек при позиционировании снимков, полученных при наземном лазерном сканировании.

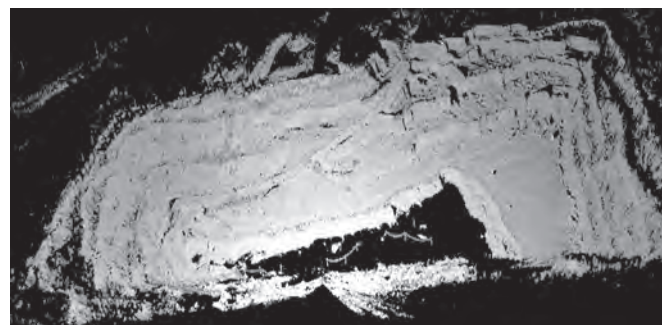


Рис. 4. Результаты съемки участка Каранского карьера наземным лазерным сканером RIEGL LMS420i с одной точки стояния /
Fig. 4. Results of surveying the Karansky quarry area with a RIEGL LMS420i ground laser scanner from one standpoint

Экспериментальным путем установлено, что высокая интенсивность отраженного сигнала, свойственная для тахеометрических призм, позволяет их идентифицировать на снимках с расстояния 600–700 м (рис. 5).

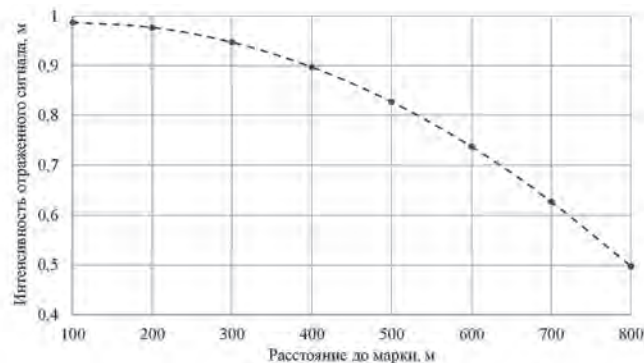


Рис. 5. Результаты исследования интенсивности отраженного сигнала тахеометрических светоотражающих призм /
Fig. 5. Results of the study of the intensity of the reflected signal of tacheometric reflective prisms

Анализ интенсивности отраженного сигнала снимка, включающего более миллиона точек, при ее определении в интервале от 0 до 1 приведен в таблице.

Таблица / Table

Процентный состав точек с различной интенсивностью отраженного сигнала /
Percentage composition of points with different reflected signal intensity

Интервал интенсивности отраженного сигнала / Reflected signal intensity range	Процент от общего количества точек / Percentage of total points
Менее чем 0,10	23,50
От 0,10 до 0,20	28,20
От 0,20 до 0,30	29,00
От 0,30 до 0,40	18,50
От 0,40 до 0,60	1,10
Более 0,46	0,01

Приведенные в таблице данные позволяют не только констатировать, что около 99 % зафиксированных лазерным сканером точек имеют интенсивность отражения в пределах 0,1–0,4, но и выделить пределы интенсивности отраженного сигнала светоотражающих призм, расположенных на расстоянии 500–600 м от точки стояния сканера, которые в зависимости от погодных условий варьировались в интервале 0,46–0,78.

Выводы

1. Анализ полученных в ходе проведенного исследования данных позволяет констатировать факт целесообразности применения полиуретановых светоотражателей при сканировании объектов относительно небольших размеров (не более 250 м²). Объекты большего масштаба рационально сканировать с применением в качестве опорных точек тахеометрических призм. За счет возможности идентификации светоотражающих призм с любой точки стояния наземного лазерного сканера на порядок сокращается количество необходимых опорных точек, что в свою очередь снижает затраты времени на создание геодезического обоснования для формирования трехмерной модели месторождения.

2. Кроме того, использование тахеометрических призм в качестве опорных точек при сканировании позволяет повысить качество позиционирования снимков. Каждая призма устанавливается на отцентрированный штатив за счет чего возможно точное определение координат отражателей. Определение координат расположения призм, установленных на

штативах, возможно с применением GNSS-приемников, что отменяет необходимость проведения полигонометрии.

3. Важным условием успешной съемки является правильный выбор места установки сканера. Необходимо чтобы между сканером и опорной точкой была прямая видимость исследуемого участка, отсутствовала крупная растительность (кусты, деревья).

4. Применение данного подхода позволяет оптимизировать процесс создания трехмерных моделей объектов поверхности и горных выработок с применением наземного лазерного сканера, что дает возможность формировать модели любого масштаба за три-четыре рабочих дня при задействовании штата из четырех-пяти специалистов.

5. Результаты проведенного анализа позволили разработать предложения по оптимизации применения наземного лазерного сканера при маркшейдерско-геодезическом обеспечении предприятий горной промышленности и обеспечении безопасной эксплуатации подработанных зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баринаева ТА, Катрич АЕ. Наземное лазерное сканирование. *Научные достижения и открытия современной молодежи: сб. ст. победителей Межд. науч.-практ. конф.* Пенза, 2017;(1):1569-71. [Barinova TA, Katrich AE. Ground-based laser scanning. *Scientific achievements and discoveries of modern youth: A collection of articles by the winners of the International Scientific and Practical Conference.* Penza, 2017;(1):1569-71 (In Russ.)]
2. Щенявская ЛА, Шалая ЛА. Технология объединения пространственных данных, полученных по результатам наземного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъемки и ручного лазерного сканирования. *Молодежная наука: сб. лучших научных работ молодых ученых.* Краснодар, 2024: 509-15. [Shchenyavskaya LA, Shalaya AA. Technology of combining spatial data obtained from the results of terrestrial laser scanning, digital aerial photography and manual laser scanning. *Youth science: A collection of the best scientific works of young scientists.* Krasnodar, 2024; 509-15 (In Russ.)]
3. Меньшикова СН, Мармилов АН, Кондрашин КГ. Съемка фасадов зданий методами наземного лазерного сканирования. *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования.* Астрахань, 2022: 191-94. [Menshchikova SN, Marmilov AN, Kondrashin KG. Surveying building facades using terrestrial laser scanning methods. *The potential of intellectually gifted youth – for the development of science and education.* Astrakhan, 2022; 191-4 (In Russ.)]
4. Комиссаров АВ. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование. Новосибирск, 2020: 58. [Komissarov AV. Laser scanning and three-dimensional modeling. Novosibirsk, 2020: 58 (In Russ.)]
5. Середович ВА, Комиссаров АВ, Широкова ТА. Наземное лазерное сканирование: монография. Новосибирск, 2009: 259. [Seredovich VA, Komissarov AV, Komissarov DV, et al. Terrestrial laser scanning: monograph. Novosibirsk, 2009 (In Russ.)]
6. Пат. 2736506 C1 Российская Федерация, МПК G01C 11/06, G01S 17/89, G01S 17/87. Способ автоматического локального повышения точности данных воздушного лазерного сканирования с использованием данных наземного лазерного сканирования: / Баденко В.Л., Федотов А.А., Зотов Д.К., Волгин Ю.Д., Муромцева Н.С.; заявитель ФГАОУ ВО «СПбПУ». – № 2019145104; заявл. 30.12.2019; опубл. 17.11.2020. 11 с. [Badenko VL, Fedotov AA, Zotov DK, et al. Method for automatic local improvement of airborne laser scanning data accuracy using terrestrial laser scanning data. Russian Federation patent 2736506 C1. 17 November 2020 (In Russ.)]
7. Неволин АГ, Медведская ТМ. Обработка результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отражения сигнала. *Вестник Сибирской государственной геодезической академии.* Новосибирск, 2014;1(25):47-53. [Nevolin AG, Medvedskaya TM. Processing of the results of terrestrial laser scanning taking into account the signal reflection coefficient. *Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy.* Novosibirsk, 2014; 1(25):47-53 (In Russ.)]
8. Грищенко НН, Голубев ФМ, Сажнев ВП. Основы методики создания цифровых моделей искусственно измененных участков рельефа. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр. Донецк,* 2024;1(39):109-20. [Grishchenkov NN, Golubev FM, Sazhnev VP. Fundamentals of the methodology for creating digital models of artificially modified relief areas. *Proceedings of RANIMI.* Donetsk, 2024; 1(39):109-20 (In Russ.)]
9. Голубев ФМ, Сушко ЕТ, Жуковский ГВ и др. Методика инструментального определения отклонения внешних несущих конструктивных элементов панельных зданий от вертикали. *9-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса»: сб. науч. тр. Донецк,* 2023: 47-54. [Golubev FM, Sushko ET, Zhulkovsky GV, et al. Methodology for instrumental determination of deviation of external load-bearing structural elements of panel buildings from the vertical. *Innovative Prospects of Donbass. 9th International Scientific and Practical Conference.* Donetsk, 2023; 47-54 (In Russ.)]
10. Chen M, Tang F, Pan J. Using Polar Grid for Building Extraction in Terrestrial Laser Scanning Data. IGARSS 2020. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* Waikoloa, 2020; 1632-34. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324001.
11. Brovkina O, Novotný J, Navrátilová B, et al. Comparison of Tree Attribute Estimates from Airborne and Terrestrial Laser Scanning and Field Data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.* Brussels, 2021;8065-8. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553082.
12. Xu Y, Stilla U. Toward Building and Civil Infrastructure Reconstruction From Point Clouds: A Review on Data and Key Techniques. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2021;(14):2857-85. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3060568.
13. Xu Y, Li S, You H, et al. Retrieval of Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning Data Based on the Monte Carlo Method. *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2022;(19):1-5. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3061540.
14. Wu Y, Li S, Xu Y, et al. A Laser Point Area Model for Canopy Gap Fraction Retrieval Based on Terrestrial Laser Scanning Data. *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2024;(21):1-5. DOI: 10.1109/LGRS.2023.3348120.

15. Горбань НН, Васильев ГГ, Сальников АП и др. Разработка схемы размещения сканерных станций при наземном лазерном сканировании резервуаров с учетом требований к погрешности результатов измерений. *Нефтяное хозяйство*. 2020;2:74-8. [Gorban NN, Vasiliev GG, Salnikov AP, et al. Development of a layout scheme for scanner stations during ground-based laser scanning of tanks, taking into account the requirements for the error of measurement results. *Oil industry*. 2020; (2):74-8 (In Russ.)]
16. Заброда ОС, Гура ДА, Дражецкий ЕА. Использование технологии лазерного сканирования в области градостроительства. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2021;4:86-90. [Zabroda OS, Gura DA, Drazhetsky DA, et al. Use of laser scanning technology in urban planning. *Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2021(4):86-90 (In Russ.)]
17. Грибкова ИС, Кузьмин, Щенявская ЛА. Современные методы и приборы геодезического мониторинга зданий и сооружений. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2023;2:44-7. [Gribkova IS, Kuzmin RO, Shchenyavskaya LA. Modern methods and devices for geodetic monitoring of buildings and structures. *Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2023; (2):44-7 (In Russ.)]
18. Панютищева АА, Беркова ЕД, Гура ДА. Применение современных методов сбора геоданных для целей мониторинга территорий. *Астраханский вестник экологического образования*. 2023;6(78):58-63. [Panyutischeva AA, Berkova ED, Gura DA, et al. Application of modern methods of collecting geodata for the purposes of monitoring territories. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2023;6(78):58-63 (In Russ.)]. DOI: 10.36698/2304-5957-2023-6-58-63.
19. Вальков ВА, Валькова ЕО, Мустафин МГ. Методика уточнения цифровых моделей рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023;3(125):40-52. [Valkov VA, Valkova EO, Mustafin MG. Methodology for refining digital relief models of open mine workings based on laser scanning and aerial photography. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023;3(125):40-52 (In Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_40_52.
20. Гусев ВН, Филиппов АА. Оптимизация процесса классификации данных лазерного сканирования для преодоления избыточности. *Маркшейдерия и недропользование*. – 2024;1(129):80-9. [Gusev VN, Filippov AA. Optimization of the laser scanning data classification process to overcome redundancy. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;1(129):80-9 (In Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_80_89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филипп Максимович Голубев –

канд. техн. наук, заведующий отделом, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, Российская Федерация, e-mail: f_golubev@list.ru

Вячеслав Петрович Сажнев –

доцент, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, Российская Федерация, e-mail: vyacheslav.p.sazhnev@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Filipp M. Golubev –

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», 283086, Donetsk, Russian Federation, e-mail: f_golubev@list.ru

Vyacheslav P. Sazhnev –

Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», 283086, Donetsk, Russian Federation, e-mail: vyacheslav.p.sazhnev@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Ф. М. Голубев – постановка задачи исследования, проведение эксперимента, анализ результатов исследования, написание текста статьи; В. П. Сажнев – проведение эксперимента, выполнение работы по систематизации материала, получение и подготовка данных для анализа, написание текста статьи. / F.M. Golubev – setting the research problem, conducting the experiment, analyzing the research results, writing the text of the article; V. P. Sazhnev – Conducting an experiment, performing work on systematizing the material, obtaining and preparing data for analysis, writing the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.03.2025.

Поступила после рецензирования: 20.05.2025.

Принята к публикации: 22.05.2025.

Article info

Received: 24.03.2025.

Revised: 20.05.2025.

Accepted: 22.05.2025.