

# Выявление значений фрактальной размерности Минковского для частиц пыли, образованной в результате массовых взрывов на угольном разрезе\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-72-76>

## СТРЕЛЕЦКИЙ А.А.

Ведущий инженер ИПКОН РАН,  
111020, г. Москва, Россия,  
e-mail: Seaman1079@yandex.ru

## КУБРИН С.С.

Доктор техн. наук, профессор,  
ученый секретарь ИПКОН РАН  
111020, г. Москва, Россия,  
e-mail: s\_kubrin@mail.ru

В статье описан метод выделения контура изображений частиц пыли, полученных методом сканирующей электронной микроскопии и последующего расчета фрактальной размерности. Приведены результаты исследований размерности Минковского для частиц пыли, образованной в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе.

**Ключевые слова:** размерность Минковского, фрактальная размерность, угольный разрез, пылегазовое облако, сканирующая электронная микроскопия.  
**Для цитирования:** Стрелецкий А.А., Кубрин С.С. Выявление значений фрактальной размерности Минковского для частиц пыли, образованной в результате массовых взрывов на угольном разрезе // Уголь. 2023. №11. С. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-72-76.

## ВВЕДЕНИЕ

Частицы пыли, образованные в результате массовых взрывов на угольных разрезах, являются фактором, крайне негативно влияющим на окружающую среду и в частности на здоровье человека. Мелкодисперсные частицы, в особенности PM<sub>2,5</sub> проникают в дыхательные пути человека, способствуя возникновению различных пневмопатологий, таких как: силикоз, пневмокониоз [1, 2]. Помимо этого, следует отметить, что данные частицы способны проникать в кровеносную систему человека из-за своего небольшого размера и в последствии также вызывать ряд заболеваний сердечно-сосудистой системы [3, 4], а также способствуют возникновению новообразований в организме [5, 6]. Исходя из этого можно сделать вывод, что проникающая способность пыли и степень ее негативного влияния напрямую зависят от ее морфологических характеристик, таких как размер и шероховатость поверхности.

Горнодобывающие предприятия – одни из крупнейших источников загрязнения окружающей среды, являющиеся первичным очагом возникновения мелкодисперсной пыли.



\* Исследования проведены в рамках мероприятия № 1 Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 года № 1144-р, и соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1185 от 28 сентября 2022 года.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для проведения исследования морфологических характеристик пыли, образованной в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, отбор проб производился на аэрозольные фильтры. Затем пробы были подвергнуты ситовому анализу. По результатам проведенного ситового анализа наименьшая фракция (менее 0,005 мм) была исследована методом электронной микроскопии. С помощью электронного микроскопа было получено 110 изображений различных частиц пыли. Данные изображения были классифицированы относительно длины измерительной шкалы микроскопа (в мкр).

В табл. 1 представлены результаты классификации изображений.

Таблица 1

**Классификация изображений различных частиц пыли относительно длины измерительной шкалы микроскопа**

Classifications of images of different dust particles with relation to the length of the microscope measuring scale

| 1 мкр | 2 мкр | 5 мкр | 10 мкр |
|-------|-------|-------|--------|
| 4     | 44    | 53    | 9      |

Исходя из распределения частиц по размеру, можно сделать вывод о том, что размерности 2 мкр и 5 мкр включают в себе наибольшее количество частиц пыли.

На рис. 1 представлены полученные с помощью электронного микроскопа изображения частиц пыли.

Последующая обработка изображений, а также расчет фрактальной размерности Минковского производились с помощью оригинального программного кода, реализованного на языке Python. В результате обработки изображения путем использования библиотеки OpenCV, являющейся совокупностью алгоритмов компьютерного зрения, обработка изображений, машинного обучения, формируется копия изображенного объекта, площадь которого ограничена черным контуром. Пример работы алгоритма представлен на рис. 2.

Впоследствии фрактальная размерность Минковского была рассчитана для изображения, ограниченного контуром, с помощью метода квадратов [7].

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Исходя из результатов расчетов размерности Минковского, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что размерность частиц заключена в пределах от 1.164 до 1.416.

Опасность мелкодисперсных частиц пыли для организма человека доказана множеством научных исследований, как зарубежных, так и отечественных [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

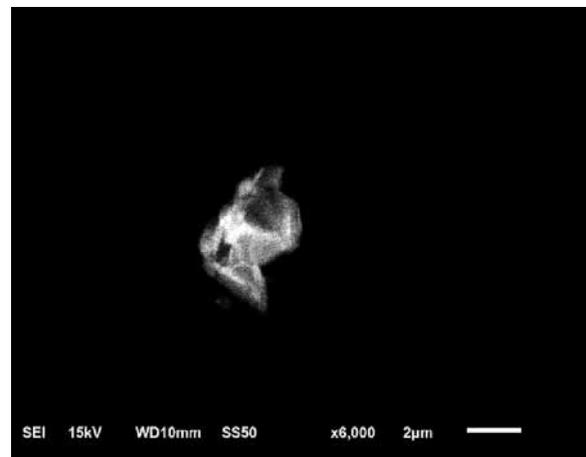
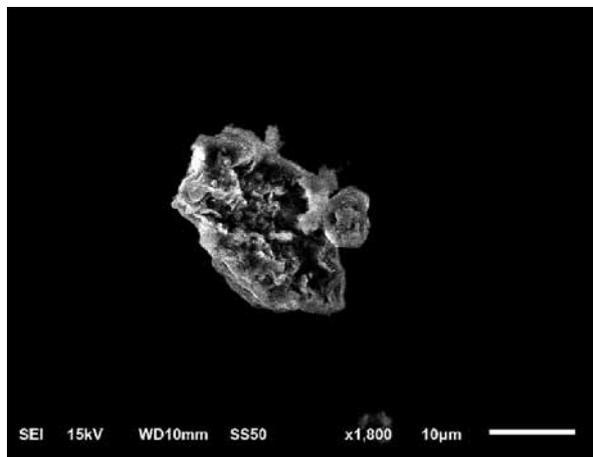
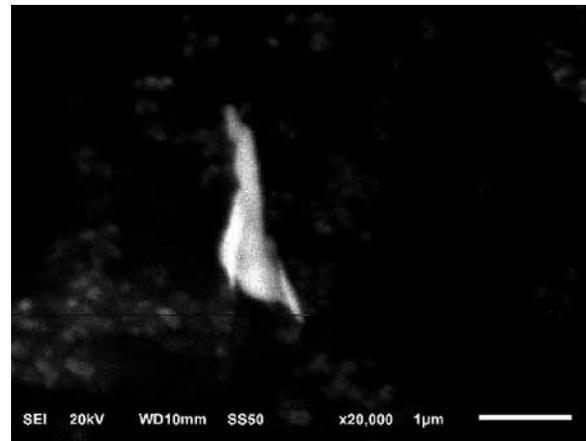
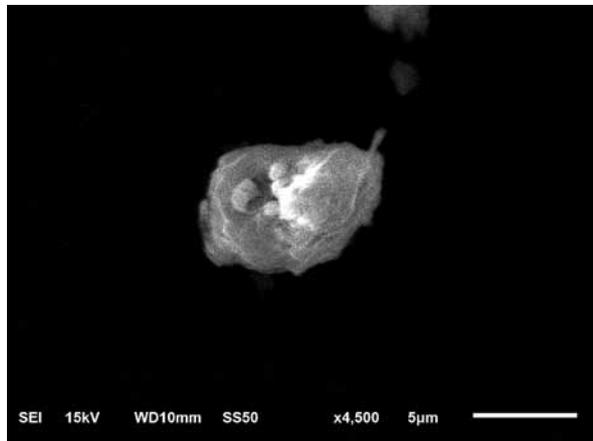


Рис. 1. Изображения частиц пыли, полученные с помощью электронного микроскопа

Fig. 1. Electron microscope images of dust particles

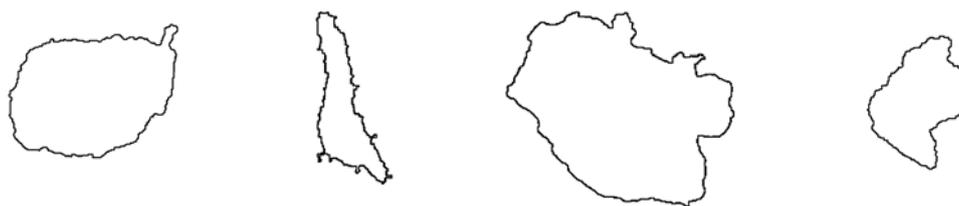


Рис. 2. Копия изображенного объекта, площадь которого ограничена черным контуром  
 Fig. 2. A copy of the represented object, the area of which is limited with a black outline

Таблица 2

**Результаты расчета фрактальной размерности Минковского, рассчитанной с помощью метода квадратов для изображения, ограниченного контуром**

Results of the Minkowski fractal dimension calculated using the box-counting method for an outline-limited image

|       |  |
|-------|--|
| 1 um  | 1.31868304307495; 1.28629055499146; 1.26492434652107; 1.27666687056815   |
| 2 um  | 1.34980739269480; 1.21598596598440; 1.24853444510498; 1.18452889063744; 1.16415223977489; 1.34156753666739; 1.32878642944771; 1.17834007608357; 1.33302269820733; 1.18394736926217; 1.30224816300007; 1.23120315394330; 1.21928258556511; 1.20534080162839; 1.20791743460796; 1.25070463248590; 1.24338962884984; 1.31514207860208; 1.33189889989266; 1.31368039246535; 1.23953565358668; 1.23199895224521; 1.25912564163954; 1.27043327952080; 1.18872853519110; 1.39214744381136; 1.18607746246875; 1.16778953085862; 1.20548543664017; 1.21800103484003; 1.16517049545311; 1.23652628322023; 1.16993432732998; 1.19928314276362; 1.28293862164748; 1.28539287409156; 1.27351020931994; 1.17664514493441; 1.24693889121912; 1.19406701707343; 1.41624291033822; 1.20900638441206; 1.34328390218461; 1.17356423194522   |
| 5 um  | 1.35574084013513; 1.31912411642859; 1.26953077726383; 1.26179694191454; 1.17621697436656; 1.17669863580852; 1.29406348264228; 1.19309225469923; 1.35740345488107; 1.30626893597439; 1.28511543546876; 1.36167625281901; 1.33536017941035; 1.17725263475521; 1.27467845101210; 1.16496306303885; 1.17171388781007; 1.23429177667840; 1.26114037091690; 1.21897205482436; 1.24654623823840; 1.16467801841041; 1.29199628288729; 1.18336097686992; 1.20771679046682; 1.18128086329268; 1.30874511329776; 1.33609965407809; 1.16625392511480; 1.18262920116550; 1.18209046299842; 1.27433453388485; 1.19380189154003; 1.17116547505209; 1.31328038412779; 1.22352556075055; 1.27320203080300; 1.21967746712032; 1.26868906088943; 1.19131174127066; 1.25743812480569; 1.20074422565965; 1.18545865433911; 1.18442510737928; 1.22868550974005; 1.22892899083664; 1.28099373801087; 1.19374631296147; 1.21402795426781; 1.17219655812349; 1.19169001567320; 1.24528363974128; 1.28378945875142 |
| 10 um | 1.17987395164382; 1.17232982228866; 1.17021931786715; 1.28220133420692; 1.20805828013783; 1.17815815221868; 1.17030427482876; 1.18011545199992; 1.21539778649004   |

По ранее полученным данным рентгенофлуоресцентного анализа было установлено что преобладающим веществом в образцах отобранной пыли является  $\text{SiO}_2$ , другие соединения присутствуют в меньшем количестве. Подобные результаты описаны в работе [15]. Преобладание в пробах двуокиси кремния является одним из факторов, влияющих на форму частиц пыли [16]. Также ранее было установлено что помимо  $\text{SiO}_2$  в образцах присутствуют Cu, Zn, Zr, Rn, Sr. Некоторые из представленных элементов являются токсичными для живых организмов и человека в частности.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Фрактальная размерность Минковского, рассчитанная для частиц пыли, образованных в результате проведения массовых взрывов на угольном разрезе, позволяет заключить, что бо́льшая проекционная площадь поверхности может усиливать негативное воздействие на организм человека в том числе и на его ДНК [17]. В работах [11, 12, 13] установлено, что наряду с элементным составом и формой размер и площадь частиц – один из ключевых негативных факторов.

**Список литературы**

1. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children / L.T.M. Luong, T.N. Dang, N.T. Thanh Huong et al. // Environ. Pollut. 2020. Vol. 257. 113424. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113424.
2. Ambient PM2.5 and PM10 Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka / S. Priyankara, M. Senarathna, R. Jayaratne et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. No 18. P. 9617. DOI: 10.3390/ijerph18189617.
3. Levels and Health Risk Assessment of PM10 Aerosol in Brno, Czech Republic / P. Bulejko, V. Adamec, R. Skéřil et al. // Cent. Eur. J. Public Health. 2017. No 25. P. 129-134. DOI: 10.21101/cejph.a4495.
4. Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke / P.L.S. Ljungman, N. Andersson, L. Stockfelt et al. // Environ. Health Perspect. 2019. No 127. P. 107012. DOI: 10.1289/EHP4757.
5. Roy D., Singh G., Seo Y.-C. Carcinogenic and NonCarcinogenic Risks from PM10 and PM2.5 Bound Metals in a Critically Polluted Coal Mining Area // Atmos. Pollut. Res. 2019. No 10. P. 1964-1975. DOI: 10.1016/j.apr.2019.09.002.

6. Mortality and Morbidity in Populations in the Vicinity of Coal Mining: A Systematic Review / J. Cortes-Ramirez, S. Naish, P. Sly et al. // *BMC Public Health*. 2018. No 18. P. 721. DOI: 10.1186/s12889-018-5505-7.
7. Есиков О.В., Нехаев И.В., Чернышков А.И. Оценка эффективности применения фрактальной размерности изображений контуров объектов для формирования дополнительной их характеристики в многоканальных системах распознавания образов // Труды РНТОРЭС им. Попова. Серия: Научные сессии Тульской областной организации. Выпуск XXXVI. Тула. 2018. С.185-191.
8. Методическое пособие по расчёту, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (дополненное и переработанное). СПб., 2012.
9. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М., 2004.
10. Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis of 545 U.S. Counties for the Period from 2000 to 2007 / Correia Andrew W., Pope C. Arden III, Dockery Douglas W. et al. // *Epidemiology*. 2013. Vol. 24. Is. 1. P. 23-31. DOI: 0.1097/EDE.0b013e3182770237.
11. Airborne Particulate Concentrations and Numbers in the United Kingdom (phase 2) / S. Beccaceci, D. Muhunthan, D. Sarantaridis et al. // *Annual Report*. 2010.
12. Kassomenos P.A., Dimitriou K., Paschalidou A.K. Human health damage caused by particulate matter PM (10) and ozone in urban environments: the case of Athens. Greece: *Environ Monit Assess*, 2013.
13. Particulate matter, PM 10 & PM 2.5 levels, and airborne mutagenicity in Chiang Mai, Thailand / Usanee U. Vinitketkumnuen, Kittiwon K. Kalyanamitra, Teera T. Chewonarin et al. // *Mutat Res*. 2002. Vol. 519. P. 121-131.
14. Wilson R., Spengler J. *Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects*. Cambridge: MA: Distributed by Harvard University Press, 1996.
15. Chemical Composition and Toxicity of PM10 and PM0.1 Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations / A. Larionov, V. Volobaev, A. Zverev et al. // *Life*. 2022. No 12. P. 1047. DOI: 10.3390/life12071047.
16. Морфологические характеристики, размер и Масса пыли PM0,1 около угольных карьеров / У.Д. Казанцева, О.С. Яковенко, М.К. Лешукова и др. // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 2. С. 90-95. DOI: 10.17513/use.38003.
17. Fractional Composition and Toxicity Coal-Rock of PM10-PM0.1 Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station / T. Leshukov, K. Legoshchin, O. Yakovenko et al. // *Sustainability*. 2022. No 14. P. 16594. DOI: 10.3390/su142416594.

Original Paper

UDC 622.85:622.235 © A.A. Streletskij, S.S. Kubrin, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 11, pp. 72-76  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-72-76>

#### Title

**DEFINING THE VALUES OF THE MINKOWSKI FRACTAL DIMENSION FOR DUST PARTICLES GENERATED AS A RESULT OF LARGE-SCALE BLASTING IN A COAL STRIP MINE**

#### Authors

Streletskij A.A.<sup>1</sup>, Kubrin S.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of problems of comprehensive exploitation of mineral resources of RAS, Moscow, 111020, Russian Federation

#### Authors Information

**Streletskij A.A.**, Leading Engineer, e-mail: Seaman1079@yandex.ru  
**Kubrin S.S.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academic Secretary, e-mail: s\_kubrin@mail.ru

#### Abstract

The paper describes a method to define the outline of dust particle images obtained using scanning electron microscopy and the subsequent calculation of the fractal dimensions. The results are presented of studying the Minkowski dimension for dust particles generated as a result of large-scale blasting in a coal strip mine.

#### Keywords

Minkowski dimensions, Fractal dimensions, Coal strip mine, Dust and gas cloud, Scanning electron microscopy.

#### References

1. Luong L.T.M., Dang T.N., Thanh Huong N.T., Phung D., Tran L.K., Van Dung D. & Thai P.K. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children. *Environ. Pollut.*, 2020, (257), 113424. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113424.
2. Priyankara S., Senarathna M., Jayaratne R., Morawska L., Abeysundara S., Weerasooriya R., Knibbs L.D., Dharmage S.C., Yasaratne D. & Bowatte G. Ambient PM2.5 and PM10 Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, (18), pp. 9617. DOI: 10.3390/ijerph18189617.
3. Bulejko P., Adamec V., Skeřil R., Schüllerová B. & Bencko V. Levels and Health Risk Assessment of PM10 Aerosol in Brno, Czech Republic. *Cent. Eur. J. Public Health*, 2017, (25), pp. 129–134. DOI: 10.21101/cejph.a4495.
4. Ljungman P.L.S., Andersson N., Stockfelt L. et al. Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke. *Environ. Health Perspect*, 2019, (127), pp. 107012. DOI: 10.1289/EHP4757.
5. Roy D., Singh G. & Seo Y.-C. Carcinogenic and NonCarcinogenic Risks from PM10 and PM2.5 Bound Metals in a Critically Polluted Coal Mining Area. *Atmos. Pollut. Res.*, 2019, 10, pp. 1964–1975. DOI: 10.1016/j.apr.2019.09.002.
6. Cortes-Ramirez J., Naish S., Sly P. & Jagals P. Mortality and Morbidity in Populations in the Vicinity of Coal Mining: A Systematic Review. *BMC Public Health*, 2018, (18), pp. 721. DOI: 10.1186/s12889-018-5505-7.
7. Yesikov O.V., Nekhaev I.V. & Chernyshkov A.I. Assessing the efficiency of using fractal dimensions of the object outline images to generate their additional characteristics in a multichannel pattern recognition systems / Proceedings of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications (RNTORES) named after A.S. Popov, Series: Academic sessions of the Tula Regional Organization. Issue XXXVI. Tula, 2018, Pp.185-191. (In Russ.).
8. Methodological guide on calculation, standardization and control of pollutant emissions into the atmospheric air, St.Petersburg, 2012. (In Russ.).
9. Р 2.1.10.1920-04. Guidelines for assessment of public health risk due to exposure to chemical substances polluting the environment, Moscow, 2004. (In Russ.).
10. Correia Andrew W., Pope C. Arden III, Dockery Douglas W. et al. Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis

SURFACE MINING

of 545 U.S. Counties for the Period from 2000 to 2007. *Epidemiology*, 2013, Vol. 24, (1), pp. 23-31. DOI: 0.1097/EDE.0b013e3182770237.

11. Beccaceci S., Muhunthan D., Sarantaridis D., Tompkins J., Butterfield D., Quincey P., Brown R., Green D., Grieve A., Fuller G. & Jones A. Airborne Particulate Concentrations and Numbers in the United Kingdom (phase 2). Annual Report, 2010.

12. Kassomenos P.A., Dimitriou K. & Paschalidou A.K. Human health damage caused by particulate matter PM (10) and ozone in urban environments: the case of Athens. Greece, *Environ Monit Assess*, 2013.

13. Usanee U., Vinitketkumnuen, Kittiwat K., Kalayanamitra, Teera T., Chewonarin & Richard R. Kamens. Particulate matter, PM 10 & PM 2.5 levels, and airborne mutagenicity in Chiang Mai, Thailand. *Mutat Res.*, 2002, (519), pp. 121-131.

14. Wilson R. & Spengler J. Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects. Cambridge, MA: Distributed by Harvard University Press, 1996.

15. Larionov A., Volobaev V., Zverev A., Vdovina E., Bach S., Schetnikova E., Leshukov T., Legoshchin K. & Ereemeeva G. Chemical Composition and Toxicity of PM10 and PM0.1 Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations. *Life*, 2022, (12), 1047. DOI: 10.3390/life12071047.

16. Kazantseva U.D., Yakovenko O.S., Leshukova M.K. et al. Morphological characteristics, size and weight of PM0.1 dust particles near coal pits. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*, 2023, (2), pp. 90-95. (In Russ.). DOI 10.17513/use.38003.

17. Leshukov T., Legoshchin K., Yakovenko O. et al. Fractional Composition and Toxicity Coal-Rock of PM10-PM0.1 Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station. *Sustainability*, 2022, (14), pp. 16594. DOI: 10.3390/su142416594.

#### Acknowledgements

The research was performed as part of Activity No.1 of the Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation as of May 11, 2022, and Agreement No. 075-15-2022-1185 as of September 28, 2022, on providing grants from the federal budget in the form of subsidies in accordance with Item 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation.

#### For citation

Streletskij A.A. & Kubrin S.S. Defining the values of the Minkowski fractal dimension for dust particles generated as a result of large-scale blasting in a coal strip mine. *Ugol*, 2023, (11), pp. 72-76. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-72-76.

#### Paper info

Received July 10, 2023

Reviewed October 13, 2023

Accepted October 26, 2023

Оригинальная статья

УДК 622.271.332 © И.Ю. Боос, И.В. Патачаков, Д.В. Редькин, А.А. Черпакова, Ю.П. Юронен, 2023

# Повышение безопасности открытых горных работ на основе новых знаний о сдвиговых характеристиках и геометрии разрабатываемых недр

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-76-80>

#### БООС И.Ю.

Ассистент

Сибирского федерального университета,  
660025, г. Красноярск, Россия

#### ПАТАЧАКОВ И.В.

Канд. техн. наук,

доцент Сибирского  
федерального университета,  
660025, г. Красноярск, Россия  
e-mail: sibniigim@mail.ru

#### РЕДЬКИН Д.В.

Аспирант

Сибирского федерального университета,  
660025, г. Красноярск, Россия

В массивах горных пород клиновидные деформации происходят по поверхностям скольжения, образованным несколькими диагональными системами трещин, которые могут иметь различный генезис и, соответственно, различные сдвиговые характеристики по ним. Метод обратных расчетов позволяет дифференцированно определять сдвиговые характеристики по каждой системе трещин путем анализа множества фактических клиновидных вывалов, зафиксированных и геометризованных на уступах в условиях карьерной выемки. Это осуществляется путем составления системы трансцендентных уравнений на основе формулы коэффициента запаса устойчивости породных клинов и последовательного решения ее методом наименьших квадратов для всех зафиксированных клиновидных деформаций. Произведена практическая апробация метода и найдены сдвиговые характеристики поверхностей трещин для карьера «Эльдорадо», что явилось в итоге основой для повышения производства горных работ.

**Ключевые слова:** открытые горные работы, геометрия недр, сдвигание горных пород, обратные расчеты, трещиноватость, системы трещин, устойчивость, сцепление, угол трения.