

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.

Для цитирования: Повышение безопасности открытых горных работ на основе новых знаний о сдвиговых характеристиках и геометрии разрабатываемых недр / И.Ю. Боос, И.В. Патачаков, Д.В. Редькин и др. // Уголь. 2023. № 11. С. 76-80. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-76-80.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная разработка и экономическая эффективность разработки месторождений требуют обеспечения устойчивости горных выработок. Большую часть в горнодобывающей отрасли занимают глубокие карьеры, разрабатываемые в скальных и полускальных породах. Такие породы неизбежно имеют различного рода структурные дефекты, имеющие низкую прочность на растяжение, трещины, разломы, плоскости напластования и сланцеватости, от которых в большей степени зависит устойчивость горных выработок.

Поэтому для проектирования горных работ необходимы надежные способы получения исходных данных о пространственной ориентации и сдвиговых характеристиках поверхностей ослабления. В настоящее время появилось множество современных методов для полуавтоматической, быстрой и точной съемки трещиноватости массивов. Однако проблема определения сдвиговых параметров Кулона-Мора по поверхностям трещин (угол трения φ' и сцепление C'), необходимых для расчета устойчивости откосов, рассматривается достаточно редко, и методы их определения по-прежнему имеют множество ограничений. При ведении горных работ прикладным исследованиям устойчивости элементов горных выработок уделяется большое внимание, о чем свидетельствуют результаты работ по геомеханике, представленные в краткой подборке тематических научных трудов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Авторами данной работы предлагается усовершенствование представленного метода путем перехода от графического решения к автоматизированному аналитическому решению с разделением физикомеханических свойств по разным поверхностям ослабления, по которым произошло обрушение. Это достигается путем составления системы трансцендентных уравнений (1) и решения ее относительно четырех клиновидных обрушений:

$$F(C'_1, C'_2, \varphi'_1, \varphi'_2) = \begin{cases} \frac{\text{ctg}\psi_1(a_1 \text{tg}\varphi'_1 + b_1 \text{tg}\varphi'_2)}{a_1 + b_1} + \frac{3[(a_1 + b_1) - \text{ctg}\psi_1(a_1 \text{tg}\varphi'_1 + b_1 \text{tg}\varphi'_2)]}{\gamma h_1 \sin(\beta_{1_1} + \beta_{2_1})(\text{ctg}\psi'_1 - \text{ctg}\alpha'_1)} - n_x = 0 \\ \frac{\text{ctg}\psi_2(a_2 \text{tg}\varphi'_1 + b_2 \text{tg}\varphi'_2)}{a_2 + b_2} + \frac{3[(a_2 + b_2) - \text{ctg}\psi_2(a_2 \text{tg}\varphi'_1 + b_2 \text{tg}\varphi'_2)]}{\gamma h_2 \sin(\beta_{1_2} + \beta_{2_2})(\text{ctg}\psi'_2 - \text{ctg}\alpha'_2)} - n_x = 0 \\ \frac{\text{ctg}\psi_3(a_3 \text{tg}\varphi'_1 + b_3 \text{tg}\varphi'_2)}{a_3 + b_3} + \frac{3[(a_3 + b_3) - \text{ctg}\psi_3(a_3 \text{tg}\varphi'_1 + b_3 \text{tg}\varphi'_2)]}{\gamma h_3 \sin(\beta_{1_3} + \beta_{2_3})(\text{ctg}\psi'_3 - \text{ctg}\alpha'_3)} - n_x = 0 \\ \frac{\text{ctg}\psi_4(a_4 \text{tg}\varphi'_1 + b_4 \text{tg}\varphi'_2)}{a_4 + b_4} + \frac{3[(a_4 + b_4) - \text{ctg}\psi_4(a_4 \text{tg}\varphi'_1 + b_4 \text{tg}\varphi'_2)]}{\gamma h_4 \sin(\beta_{1_4} + \beta_{2_4})(\text{ctg}\psi'_4 - \text{ctg}\alpha'_4)} - n_x = 0 \\ a_i = \frac{C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \beta_{2_i}}{\sin \delta_{1_i} \sin(\psi_i - \varphi'_1)}, \text{ где } i = \overline{1, 4} \\ b_i = \frac{C'_2 \cos \varphi'_2 \sin \beta_{1_i}}{\sin \delta_{2_i} \sin(\psi_i - \varphi'_2)}, \text{ где } i = \overline{1, 4} \end{cases} \quad (1)$$

ЧЕРПАКОВА А.А.

Аспирант
Сибирского федерального университета,
660025, г. Красноярск, Россия,

ЮРОНЕН Ю.П.

Канд. техн. наук,
доцент Сибирского
государственного университета
науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнёва,
660049, г. Красноярск, Россия

где γ – плотность пород, т/м³;

β_1, β_2 – углы разворота диагональных трещин относительно откоса, град;

δ_1, δ_2 – углы падения трещин, град;

α – угол наклона, град;

ψ – угол наклона линии скрещения поверхностей ослабления, град;

ψ' – угол наклона линии скрещения поверхностей ослабления в плоскости перпендикулярной плоскости откоса, град;

β_1, β_2 – углы разворота диагональных трещин относительно откоса, град;

C_1', C_2' – сцепление по поверхностям трещин, т/м²;

φ_1', φ_2' – углы трения по первой и второй поверхностям трещин, град;

n_x – коэффициент запаса устойчивости, при котором произошло разрушение.

Следует отметить, что не все клиновидные обрушения происходят при коэффициенте запаса устойчивости $n \approx 1$, так клины, обрушившиеся сразу после подсечения, могли иметь коэффициент запаса меньше 1 ($n < 1$), а клины, на которые было оказано дополнительное воздействие (например, взрывные работы) могли обрушиться и при коэффициенте запаса немногим более 1 ($n > 1$). Таким образом, коэффициент n_x не может быть известен заранее, однако при должном учете всех клиновидных деформаций в карьере, составлении на каждого из них паспорта деформаций и сортировке по времени и условиям происхождения, проведя системный анализ можно сделать предположение о его величине. Так, например, однотипные клиновидные деформации, произошедшие через некоторое время стояния, а не сразу после подсечения, при условии отсутствия на них значительного внешнего воздействия обрушаются в момент превышения удерживающих сил наддвигающими, таким образом, с высокой степенью доверия можно принять $n_x \rightarrow 0,99$. Анализ по сортирован-

ным таким образом клиновидным деформациям может дать достаточно ценные данные, превышающие точность данных лабораторных исследований на малых образцах.

Решение представленной системы уравнений (1) аналитически является достаточно трудоемкой задачей, поэтому система уравнений была описана алгоритмом в математическом пакете Scilab. Практическая апробация представленного метода была произведена в условиях карьера «Эльдорадо», для этого при помощи беспилотного летательного аппарата была произведена съемка всех имеющихся клиновидных деформаций, определены элементы залегания поверхностей ослабления [5]. Таким образом, было выбрано семь клиновидных деформаций (см. таблицу) схожих по условиям происхождения и для которых можно сделать предположение о том, что в момент обрушения коэффициент запаса устойчивости был $n_x \rightarrow 1$.

Количество возможных систем уравнений зависит от количества выбранных к обратному анализу клиновидных деформаций и в нашем случае равно 35. Используя полученный нами программный алгоритм, решаем систему уравнений 35 раз для разного набора обрушений в системе, задавшись условиями $C > 0, \varphi < \psi$.

Через данное условие прошло 22 из 35 возможных решений. Проведя статистическую обработку (см. рисунок), получены наиболее вероятные значения сцепления и угла трения по трещинам: $C_1 = 0,13$ т/м², $\varphi_1 = 46^\circ$, $C_2 = 0,21$ т/м², $\varphi_2 = 41^\circ$.

С помощью полученных характеристик можно значительно повысить точность расчета устойчивых параметров элементов борта карьера при проектировании.

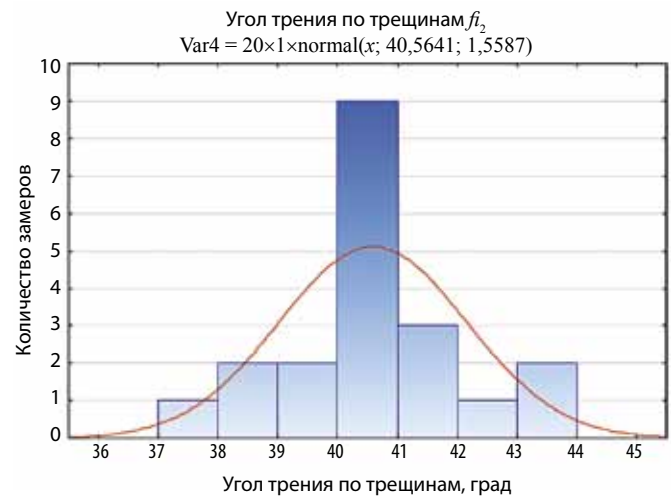
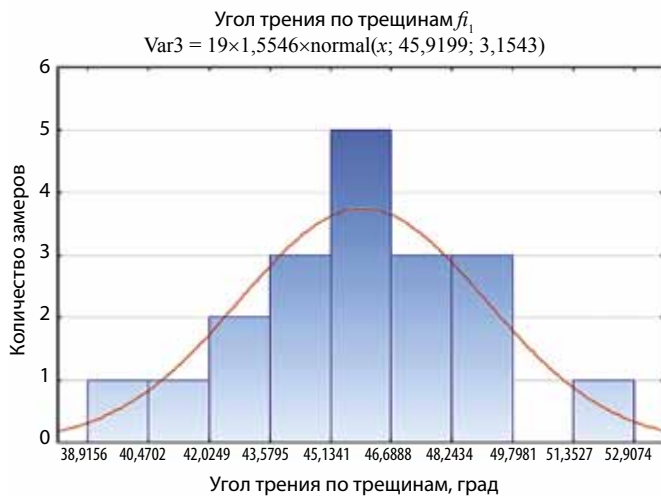
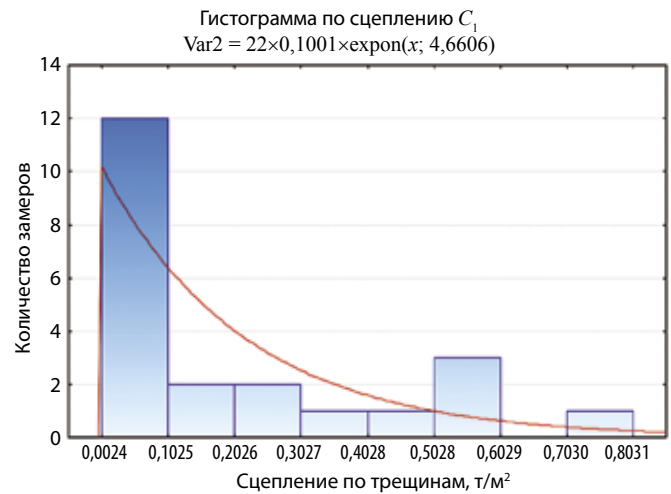
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод позволяет в полуавтоматическом режиме определять обратными расчетами сдвиговые характеристики по трещинам в массиве, по каждой

Выборка клиновидных деформаций в карьере «Эльдорадо»

Selection of wedge-shaped deformations in the Eldorado open-pit mine

Обрушение 1		Обрушение 2		Обрушение 3		Обрушение 4	
β_1 , град	21	β_1 , град	43	β_1 , град	39	β_1 , град	47
β_2 , град	40	β_2 , град	21	β_2 , град	20	β_2 , град	26
α , град	55,8	α , град	52,8	α , град	59,5	α , град	55,4
δ_1 , град	51,2	δ_1 , град	55,3	δ_1 , град	62	δ_1 , град	47,2
δ_2 , град	56,6	δ_2 , град	46,4	δ_2 , град	44,7	δ_2 , град	46,6
h , м	11,3	h , м	13,6	h , м	13,2	h , м	12,6
γ , т/м ²	2,65	γ , т/м ²	2,65	γ , т/м ²	2,65	γ , т/м ²	2,65
Обрушение 5		Обрушение 6		Обрушение 7			
β_1 , град	32	β_1 , град	77	β_1 , град	38		
β_2 , град	24	β_2 , град	18	β_2 , град	17		
α , град	64	α , град	65	α , град	60,9		
δ_1 , град	64,4	δ_1 , град	86,2	δ_1 , град	54,5		
δ_2 , град	49,7	δ_2 , град	53,4	δ_2 , град	63,4		
h , м	10,4	h , м	10,8	h , м	5,9		
γ , т/м ²	2,65	γ , т/м ²	2,65	γ , т/м ²	2,65		



Графики распределения значений C_1 , C_2 , φ_1 , φ_2
 Value distribution plots C_1 , C_2 , φ_1 , φ_2

трещине отдельно, учитывая всю совокупность горно-геологических условий месторождения, что значительно повышает точность определения относительно лабораторных испытаний образцов. Особая ценность метода заключается в потенциальной возможности определения сдвиговых характеристик крупных тектонических нарушений, если они формирует одну из поверхностей скольжения клиновидной деформации. Учет особенностей геометрии недр позволит на стадии проектирования параметров бортов карьеров, а также в работающих карьерах существенно повысить безопасность производства открытых горных работ.

Список литературы

1. Супрун В.И., Левченко Я. В., Колотовкин А.С., Ворошилин К.С. Влияние масштабного фактора на прочность горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 10. С. 5-19.
2. Ананенко Е.В., Бахаева С.П. Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал – основание» // Горный информационно-

- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 9. С. 5-21.
3. Кузин Е.А., Халкечев К.В. Математическая модель определения формы устойчивого целика поликристаллической структуры в углевещающих породах // Уголь. 2020. № 2. С. 22-25. DOI: 10.18796/0041- 5790-2020-2-22-25.
4. Демин В.Ф., Шонтаев Д.С., Балгабеков Т.К. и др. Напряженно-деформированное состояние приконтурно-углепородного массива // Уголь. 2020. № 5.С. 63-67. DOI: 10.18796/0041-5790- 2020-5-63-67.
5. Изучение структурных особенностей прибортового массива по 3D-модели откоса, построенной с применением мультикоптера / И.Ю. Боос, Ю.Л. Юнаков, И.В. Патачаков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 12. С. 19–30.
6. Adeyemi Emman Aladejare, Musa Adebayo Idris. Performance analysis of empirical models for predicting rock mass deformation modulus using regression and Bayesian methods // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2020. Vol. 12. Is. 6. P. 1263-1271.
7. A consecutive joint shear strength model considering the 3D roughness of real contact joint surface / Ban Liren, Tao Zhigang,

- Du Weisheng et al. // International Journal of Mining Science and Technology. 2023. Vol. 33. Is. 5. P. 617-624.
8. A New Methodology for Rockfall Hazard Assessment in Rocky Slopes / L.R.C. Silveira, M.S. Lana, P. Alameda-Hernández et al. // Mining. 2022. No 2. P. 791-808.
 9. Geotechnical Issues in Decommissioning Surface Lignite Mines – The Case of Amyntaion Mine in Greece / M. Kavvas, C. Roumpos, A. Servou et al. // Mining. 2022. No 2. P. 278-296.
 10. Navid Bahrani, Peter K. Kaiser. Influence of degree of interlock on confined strength of jointed hard rock masses // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2020. Vol. 12. Is. 6. P. 1152-1170.

SURFACE MINING

Original Paper

UDC 622.271.332 © I.Yu. Boos, I.V. Patachakov, D.V. Redkin, A.A. Cherpakova, Yu.P. Yuronen, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 11, pp. 76-80
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-11-76-80>

Title
ENHANCING THE SAFETY OF SURFACE MINING OPERATIONS BASED ON NEW KNOWLEDGE OF SHEAR CHARACTERISTICS AND GEOMETRY OF MINED MINERAL RESOURCES

Authors

Boos I.Yu.¹, Patachakov I.V.¹, Redkin D.V.¹, Cherpakova A.A.¹, Yuronen Yu.P.²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Authors Information

Boos I.Yu., Assistant

Patachakov I.V., PhD (Engineering), Associate Professor

Redkin D.V., Postgraduate student

Cherpakova A.A., Postgraduate student

Yuronen Yu.P., PhD (Economic), Associate Professor

Abstract

Wedge-shaped deformations in the rock masses occur along the sliding surfaces formed by several diagonal fracture systems, which may have different genesis and, accordingly, different shear characteristics along them. The method of backward calculations makes it possible to differentially determine the shear characteristics for each fracture system by analyzing a set of actual wedge-shaped in-rushes recorded and geometrically defined in the benches of open-pit mines. This is done by formulating a system of transcendental equations based on the equation of rock wedge safety factor and solving it sequentially using the least square method for all the recorded wedge-shaped deformations. A practical validation of this method was performed and the shear properties of the fracture surfaces were found for the Eldorado open pit mine, which eventually provided a basis for increasing production of the mining operations.

Keywords

Open pit mining, Subsurface geometry, Rock displacement, Backward calculations, Fracturing, Fracture systems, Stability, Cohesion, Fracture systems.

References

1. Suprun V.I., Levchenko Ya.V., Kolotovkin A.S. & Voroshilin K.S. Effect of the scale factor on the rock strength // *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2023, (10), pp. 5-19. (In Russ.).
2. Ananenko E.V. & Bakhayeva S.P. Analysis of deformation development risks and geomechanical monitoring for the 'dump - foundation' natural and engineering systems. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2023, (9), pp. 5-21. (In Russ.).
3. Kuzin E.A. & Khalkechev K.V. Mathematical model for determining the shape of a stable pillar of a polycrystalline structure in carbon-bearing rocks.

Ugol', 2020, (2), pp. 22-25. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-22-25.

4. Demin V.F., Shontayev D.S., Balgabekov T.K., Shontayev A.D. & Kongkybayeva A.N. Stressed-deformed state of the boundary-carbon array. *Ugol'*, 2020, (5), pp. 63-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-63-67.

5. Boos I.Yu., Yunakov Yu.L., Patachakov I.V. & Grishin A.A. Structural analysis of pit wall rock mass on 3D slope model constructed using a multicopter. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2021, (12), pp. 19-30. (In Russ.).

6. Adeyemi Emman Aladejare & Musa Adebayo Idris. Performance analysis of empirical models for predicting rock mass deformation modulus using regression and Bayesian methods. *J. Rock Mech. Geotech., Eng.*, 2020, Vol. 12, (6), pp. 1263-1271.

7. Liren Ban, Zhigang Tao, Weisheng Du & Yuhang Hou. A consecutive joint shear strength model considering the 3D roughness of real contact joint surface. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, Vol. 33, (5), pp. 617-624.

8. Silveira L.R.C., Lana M.S., Alameda-Hernández P. & Santos T.B. A New Methodology for Rockfall Hazard Assessment in Rocky Slopes. *Mining*, 2022, (2), pp. 791-808.

9. Kavvas M., Roumpos, C., Servou A. & Paraskevis N. Geotechnical Issues in Decommissioning Surface Lignite Mines – The Case of Amyntaion Mine in Greece, *Mining*, 2022, (2), pp. 278-296.

10. Navid Bahrani & Peter K. Kaiser. Influence of degree of interlock on confined strength of jointed hard rock masses. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2020, Vol. 12, (6), pp. 1152-1170.

For citation

Boos I.Yu., Patachakov I.V., Redkin D.V., Cherpakova A.A. & Yuronen Yu.P. Enhancing the safety of surface mining operations based on new knowledge of shear characteristics and geometry of mined mineral resources. *Ugol'*, 2023, (11), pp. 76-80. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-76-80.

Paper info

Received September 27, 2023

Reviewed October 13, 2023

Accepted October 26, 2023