

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ УСТУПА И ОБЪЕМА ОБЛОМКОВ КАМНЕПАДА НА ЕГО МАКСИМАЛЬНУЮ КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ПРИБЛИЖЕННОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

О. Д. Белов✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049,

г. Москва, Российская Федерация

✉ below2idknet@inbox.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния геометрии уступа борта карьера и объема обломка камнепада на его кинетическую энергию. На основании результатов численного моделирования в программном комплексе RAMMS: Rockfall получены регрессионные модели, описывающие зависимость кинетической энергии обломка от его объема для различных комбинаций высот и углов наклона уступа. Выявлено, что зависимость энергии обломка от геометрии уступа носит различный характер для объемов от 0,5 до 4 м³ и от 4 до 16 м³. Регрессионные модели показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, что позволит в дальнейшем использовать их для расчета оптимальных характеристик специальных противокаменепадных конструкций, как для месторождений уже введенных в эксплуатацию, так и для месторождений на этапе проектирования.

Ключевые слова: камнепад, форма обломка, перемещение, высота отскока, скорость, кинетическая энергия, компьютерное моделирование, топография, Python

Для цитирования: Белов ОД. Определение влияния геометрии уступа и объема обломков камнепада на его максимальную кинетическую энергию путем создания приближенной регрессионной модели. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(1):С. 76-81. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-76-81>.

DETERMINING THE INFLUENCE OF BENCH GEOMETRY AND ROCKFALL DEBRIS VOLUME ON ITS MAXIMUM KINETIC ENERGY BY CREATING AN APPROXIMATE REGRESSION MODEL

O. D. Belov✉

National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russian Federation

✉ below2idknet@inbox.ru

Abstract. In this paper, we study the influence of the quarry bench geometry and the volume of rockfall debris on its kinetic energy. Based on the results of numerical modeling in the RAMMS: ROCKFALL software package, regression models were obtained that describe the dependence of the kinetic energy of the debris on its volume for various combinations of bench heights and angles.

It was revealed that the dependence of the debris energy on the bench geometry is different for volumes from 0.5 to 4 m³ and from 4 to 16 m³. The regression models showed high convergence with the results of numerical modeling, which will allow them to be used in the future to calculate the optimal characteristics of special anti-rockfall structures, both for deposits already put into operation and for deposits at the design stage.

Keywords: rockfall, fragment shape, movement, rebound height, speed, kinetic energy, computer modeling, topography, Python

For citation: Belov OD. Determining the influence of bench geometry and rockfall debris volume on its maximum kinetic energy by creating an approximate regression model. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(1):76-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-76-81>.

Введение

На сегодняшний день камнепады являются одним из наиболее опасных явлений при ведении открытых горных работ. Камнепады представляют собой перемещение объема горных масс с большой скоростью и на большие расстояния. Для минимизации потенциального материального ущерба и человеческих жертв следует лучше понимать процесс образования камнепада, а также параметры, которые влияют на конечную разрушающую силу.

Основными способами борьбы с камнепадами являются специализированные сдерживающие барьеры, которые классифицируются по максимальной энергии, которую может поглотить барьер без разрушения. Для подбора оптимального технического решения по установке барьера следует определить влияние различных параметров горных выработок на кинетическую энергию обломков камнепада.

В современных работах, посвященных исследованию камнепадных процессов, выявлено, что основными параметрами, влияющими на кинетическую энергию обломка, являются: форма обломка [1–5], угол наклона уступа [4–9], высота уступа [5–15] и объем обломка [4–13].

В данной работе проведен расчет в специализированном программном комплексе RAMMS: Rockfall для различных углов наклона и высот уступов, а также объемов обломков.

Цель исследований: определение влияние геометрии уступа и объема обломков камнепада на его максимальную кинетическую энергию путем создания приближенной регрессионной модели.

Материал и методы исследования

Для проведения численного моделирования движения обломка было создано несколько трехмерных моделей, имитирующих борт карьера, состоящих из двух уступов высотой $h = 15$ м, 40 м и 45 м с углами наклона $\alpha = 50^\circ$, 60° и 70° , шириной бермы $b = 8$ м и площадкой в основании модели, которая выступает в роли дна карьера. Основные параметры модели представлены на рисунке 1.

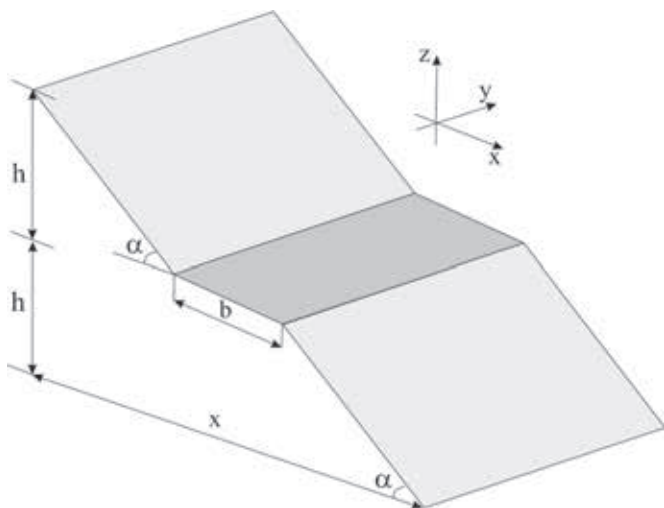


Рис. 1. Основные параметры модели: h – высота уступа; b – ширина бермы; α – угол наклона уступа

Fig. 1. Main parameters of the model: h – bench height, b – berm width, α – bench angle

Модель представляет собой жесткую неподверженную деформациям и разрушениям поверхность, что идентично по

свойствам скальным горным породам с высокими значениями физико-механических характеристик.

Для каждого набора входных данных было проведено моделирование обломков объемом от 0,5 до 16 м³. Плотность породы обломков принята равной 2 700 кг/м³.

Результаты и их обсуждение

Окно создания обломка горной массы эквивалентной формы представлено на рисунке 2.

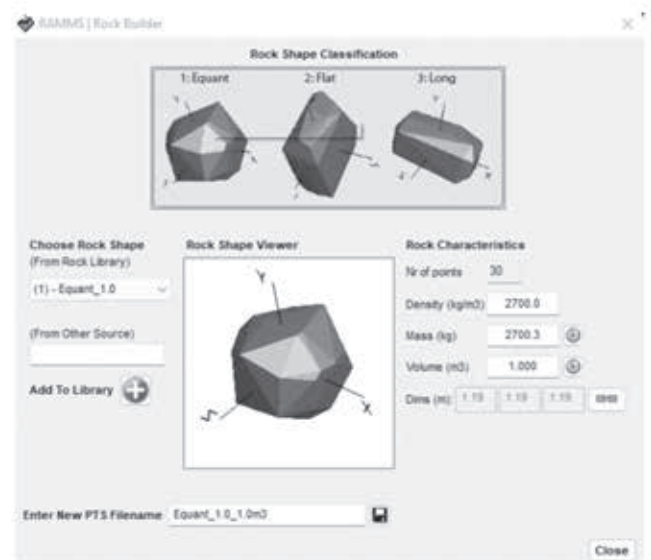


Рис. 2. Окно задания характеристик обломка эквивалентной формы
Fig. 2. Window for specifying the characteristics of a fragment of equivalent shape

В результате проведения моделирования различных объемов обломков для моделей с углами наклона 50° , 60° и 70° , шириной бермы 8 м и высотой уступа 30 м были получены значения максимальной кинетической энергии обломков, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1
Зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема и угла наклона уступа /
Dependence of the maximum kinetic energy of a fragment on its volume and the angle of the ledge

Объем обломка, м ³ / Volume of debris, m ³	Кинетическая энергия обломка при разных углах наклона уступа, кДж / Kinetic energy of debris, kJ		
	50°	60°	70°
0,5	317	353	389
1	650	716	801
2	1 309	1 443	1 664
3	2 012	2 185	2 680
4	2 908	3 105	3 684
8	8 289	8 395	8 760
16	17 569	19 213	20 385

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона представлен на рисунке 3.

Вычислим среднюю кинетическую энергию, приходящуюся на 1 м³ обломка, для каждого угла наклона путем де-

ления соответствующего значения максимальной кинетической энергии на его объем.

Полученные значения представлены в таблице 2.

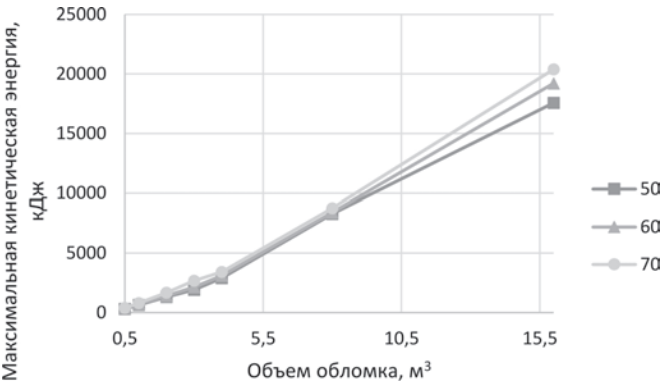


Рис. 3. График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для различных углов наклона уступа / Fig. 3. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of the fragment on the volume for different angles of the bench

Таблица 2 / Table 2

Значения средней кинетической энергии одного метра кубического обломка для различных объемов и углов наклона уступа / Values of average kinetic energy of one meter of cubic debris for different volumes and bench angles

Объем обломка, м³ / Volume of debris, m³	Кинетическая энергия обломка, кДж / Kinetic energy of debris, kJ			Среднее значение энергии по объему обломка, кДж / Average energy value per debris volume, kJ
	50°	60°	70°	
0,5	634	706	778	716
1	650	716	801	722
2	655	722	832	731
3	671	728	893	749
4	727	776	921	785
8	1 036	1 049	1 095	1 060
16	1 098	1 201	1 274	1 191
Среднее значение энергии по углу наклона, кДж / Average energy value by angle of incidence, kJ	777	843	932	-

По результатам, представленным в таблице 2, можно сделать вывод, что кинетическая энергия, приходящаяся на один 1 м³, растет с увеличением объема обломка. Кроме того, увеличение угла наклона ведет к росту средней кинетической энергии одного метра кубического обломка.

На основании анализа графика, представленного на рисунке 3, можно сделать вывод, что зависимость кинетической энергии для обломков до 4 м³ и свыше носит разный характер.

Разделим данный график на две части: объемом до 4 м³ и свыше 4 м³, а также подберем для каждого из графиков уравнение регрессии.

График зависимости максимальной кинетической энергии обломков объемом до 4 м³ включительно для угла наклона 50° представлен на рисунке 4, для угла наклона 60° – на рисунке 5, для угла наклона 70° – на рисунке 6.

График зависимости максимальной кинетической энер-

гии обломков объемом свыше 4 м³ для угла наклона 50° представлен на рисунке 7, для угла наклона 60° – на рисунке 8, для угла наклона 70° – на рисунке 9.

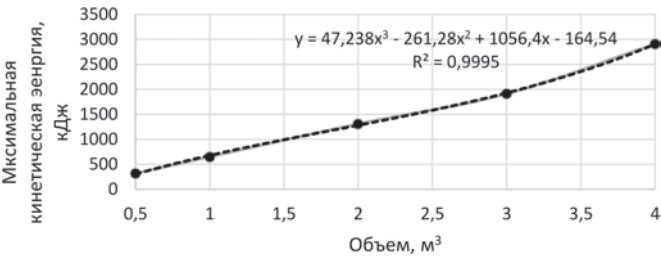


Рис. 4. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков объемом от 0,5 до 4 м³ включительно для угла наклона уступа 50° / Fig. 4. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 0.5 to 4 m³ inclusive for a bench angle of 50°

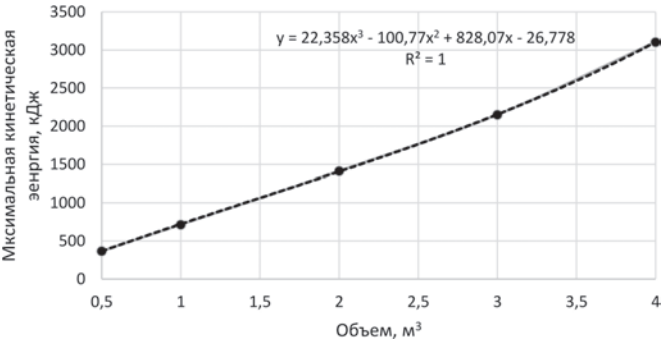


Рис. 5. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков от 0,5 до 4 м³ включительно для угла наклона уступа 60° / Fig. 5. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 0.5 to 4 m³ inclusive for a bench angle of 60°

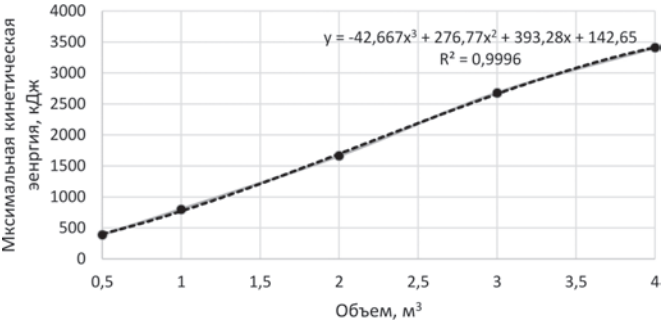


Рис. 6. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков от 0,5 до 4 м³ включительно для угла наклона уступа 70° / Fig. 6. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 0.5 to 4 m³ inclusive for a bench angle of 70°

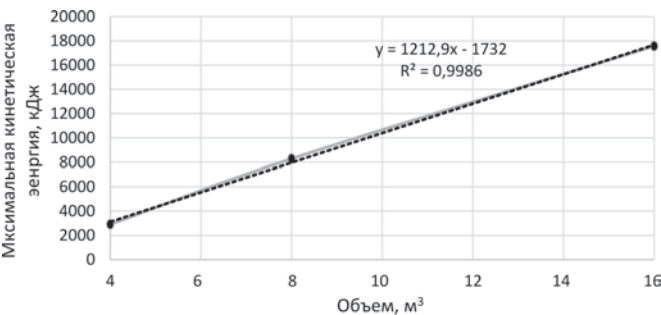


Рис. 7. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков объемом от 0,5 до 4 м³ включительно для угла наклона уступа 50° / Fig. 7. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 0.5 to 4 m³ inclusive for a bench angle of 50°

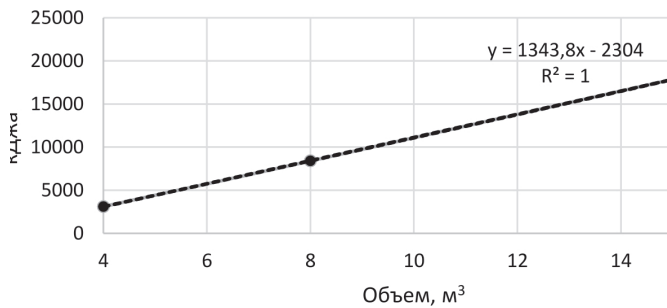


Рис. 8. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков объемом от 4 до 16 м³ для угла наклона уступа 60° /

Fig. 8. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 4 to 16 m³ for a bench angle of 60°

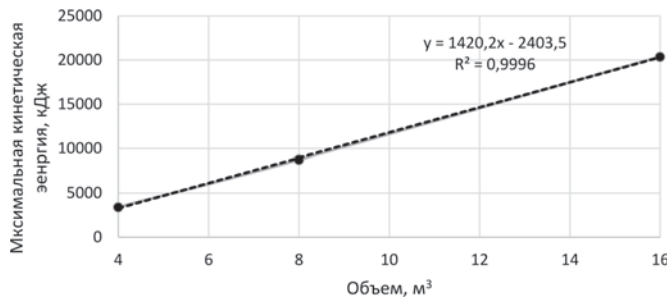


Рис. 9. График зависимости максимальной кинетической энергии обломков объемом от 4 до 16 м³ включительно для угла наклона уступа 70° /

Fig. 9. Graph of the dependence of the maximum kinetic energy of debris with a volume of 4 to 16 m³ inclusive for a bench angle of 70°

Согласно полученным значениям, зависимость кинетической энергии обломка при объемах до 4 м³ описывается полиномом третьей степени, больше 4 м³ – принимает линейный характер. В качестве подтверждения данной гипотезы произведем расчет кинетической энергии по представленным уравнениям регрессии для каждого графика и сравним с результатами моделирования соответствующих объемов. Данную операцию выполним для объемов 2,5 м³ и 12 м³, которые являются промежуточными на данных графиках. В каждом случае значение коэффициента детерминации превышает 0,99, что свидетельствует о том, что модель подобрана верно.

Сравнение расчетных значений кинетической энергии на основе регрессионной модели и значений, полученных в ходе численного моделирования, представлено в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Сравнение расчетных значений и результатов моделирования / Comparison of calculated values and simulation results

Объем, м³ / Volume, m³	Кинетическая энергия обломка, кДж / Kinetic energy of the debris, kJ					
	Расчетные значения / Calculated values			Результаты моделирования / Simulation results		
	50°	60°	70°	50°	60°	70°
2,5	1 581	1 763	2 189	1 448	1 697	2 082
12	12 823	13 822	14 639	12 246	13 076	13 998

Сходимость расчетных значений кинетической энергии и значений, полученных в ходе численного моделирования, представлена в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Сходимость расчетных значений
и результатов моделирования /
Convergence of calculated values and simulation results

Объем, м³ / Volume, m³	Сходимость / Convergence		
	50°	60°	70°
2,5	91,59	96,26	95,11
12	95,50	94,60	95,62
Среднее по углу наклона / Average by angle	93,54	95,43	95,37
Среднее / Average	94,78		

Средняя сходимость результатов моделирования и расчетных значений составила 94,78 %, что показывает высокую точность подобранных уравнений регрессии и целесообразность разделения закономерностей поведения на две части.

Произведем аналогичный расчет для высот уступов 15 и 45 метров.

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона с высотой уступа 15 метров представлен на рисунке 10.

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона с высотой уступа 45 метров представлен на рисунке 11.

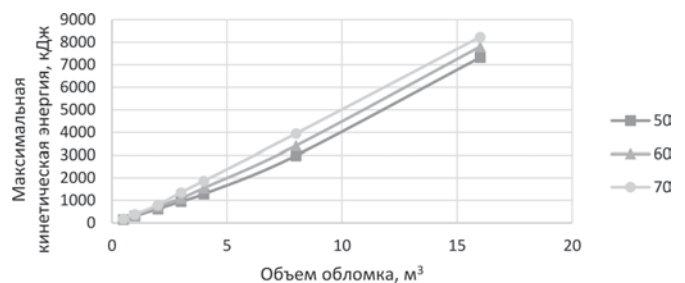


Рис. 10. График зависимости кинетической энергии от объема обломка для уступа высотой 15 м /

Fig. 10. Graph of the dependence of kinetic energy on the volume of debris for a 15-meter high ledge

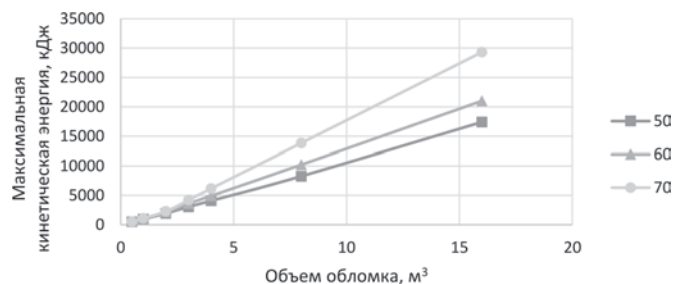


Рис. 11. График зависимости кинетической энергии от объема обломка для уступа высотой 45 м /

Fig. 11. Graph of kinetic energy versus volume of debris for a 45-meter high ledge

Результаты моделирования для уступа высотой 15 метров с различными углами наклона представлены в таблице 5, для уступа высотой 45 метров – в таблице 6.

Таблица 5 / Table 5

Значения кинетической энергии одного метра кубического для различных объемов обломков с высотой уступа 15 метров и углов наклона уступа 50, 60 и 70° /
Values of kinetic energy of one cubic meter for different volumes of debris with a bench height of 15 meters and bench angles of 50, 60 and 70°

Объем обломка, м³ / Volume of debris, m³	Кинетическая энергия обломка, кДж / Kinetic energy of debris, kJ			Среднее значение энергии по объему обломка, кДж / Average energy value per debris volume, kJ
	50°	60°	70°	
0,5	304	334	354	331
1	308	352	383	348
2	311	368	400	359
3	317	362	451	377
4	360	387	466	391
8	373	426	493	431
16	458	488	515	487
Среднее по углу наклона / Average by angle	347	388	437	-

Таблица 6 / Table 6

Значения кинетической энергии одного метра кубического для различных объемов обломков с высотой уступа 45 метров и углов наклона уступа 50, 60 и 70° /
Values of kinetic energy of one cubic meter for different volumes of debris with a bench height of 45 meters and bench angles of 50, 60 and 70°

Объем обломка, м³ / Volume of debris, m³	Кинетическая энергия обломка, кДж / Kinetic energy of debris, kJ			Среднее значение энергии по объему обломка, кДж / Average energy value per debris volume, kJ
	50°	60°	70°	
0,5	936	1004	1048	996
1	954	1067	1098	1 040
2	971	1076	1136	1 061
3	1014	1197	1395	1 202
4	1021	1228	1539	1 263

Продолжение таблицы 6 / Continuation of table 6

Объем обломка, м³ / Volume of debris, m³	Кинетическая энергия обломка, кДж / Kinetic energy of debris, kJ			Среднее значение энергии по объему обломка, кДж / Average energy value per debris volume, kJ
	50°	60°	70°	
8	1032	1276	1731	1 347
16	1088	1313	1832	1 411
Среднее по углу наклона / Average by angle	1002	1166	1397	-

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований определения влияния геометрии уступа и объема обломка камнепада на его кинетическую энергию.

2. Определено влияние геометрии уступа (высоты и угла наклона), а также объема обломка камнепада на его кинетическую энергию.

3. Установлено, что увеличение высоты уступа прямо пропорционально росту максимальной кинетической энергии обломка; увеличение угла наклона уступа ведет к росту средней кинетической энергии одного кубического метра обломка; а увеличение объема ведет к росту максимальной и средней кинетической энергии одного кубического метра обломка.

4. Выявлено, что зависимость энергии обломка от геометрии уступа носит различный характер для объемов от 0,5 до 4 м³ и от 4 до 16 м³.

5. На основании полученных данных можно вывести уравнения регрессии, которые описывают зависимость максимальной кинетической энергии обломка для различных высот уступов и углов наклона со сходимостью порядка 95 %, что является достаточным для первичной оценки значений.

6. Результаты проведенного исследования могут быть полезны при подборе оптимальных характеристик противокамнепадных барьеров без применения специализированных программ для численного моделирования движения обломков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Krautblatter M, Moore JR. Rock slope instability and erosion: toward improved process understanding. *Earth Surf. Process. Landform.* 2014;39:1273-278.
- D'Amato J, Guerin A, Hantz D, et al. Engineering Geology for Society and Territory. *Professional Ethics and Public Recognition of Engineering Geology.* 2014;2:1919-23.
- Blott SJ, Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology.* 2008;55:31-63.
- Zhang Y, Xie L, He B, Zhao P. Research on the Impact Force of Rockfall Impacting Sand Cushions with Different Shapes. *Applied Sciences.* 2022;12(7):3540. doi: 10.3390/app12073540.
- Yi G, Xiang-Rong H, Xi-Qiang Y, et al. Analysis of Rockfall Hazards Stopping position and Energy dissipation based on Orthogonal experiment. *E3S Web Conf.* 2021;261:01004. doi: 10.1051/e3sconf/202126101004.
- Zheng L, Zhu Z, Wei Q, et al. Stochastic Rockfall Model Related to Random Ground Roughness Based on Three-Dimensional Discontinuous Deformation Analysis. *Front. Earth Sci.* 2021;9:819751. doi: 10.3389/feart.2021.819751.
- Wang Y, Jiang W, Cheng S, et al. Effects of the impact angle on the coefficient of restitution in rockfall analysis based on a medium-scale laboratory test. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018;18(11):3045-61. doi: 10.5194/nhess-18-3045-2018, 2018.
- Bourgeois J, Warren S, Armstrong J. Utilization of statistical analysis to identify influential slope parameters associated with rockfall at open pit mines. *Min. Metall. Explor.* 2023;40(4):1101-12. doi: 10.1007/s42461-023-00776-4.
- Bourgeois J, Warren S, Armstrong J. Utilization of Statistical Analysis to Identify Influential Slope Parameters Associated with Rockfall at Open Pit Mines. *Mining. Metallurgy & Exploration.* 2023;40(4):1101-12. Doi: 10.1007/s42461-023-00776-4.
- Duan S, Yang X, Xu B, et al. The Influence of Gravel Particle Diameter and Slope Angle on a Rockfall-Cushion Layer Collision. *Geotech. Geol. Eng.* 2022;40:5127-38. doi: 10.1007/s10706-022-02207-5.

11. Duan S, Yu H, Xu B. Numerical simulation of a rockfall impacting a gravel cushion with varying initial angular velocity and particle sizes. *Granular Matter*. 2023;25(33). doi: 10.1007/s10035-023-01320-3
12. Hernández-Gutiérrez LE, Miranda A, Ferrer M. Rockfall Hazard Assessment in Volcanic Regions Based on ISVS and IRVS Geomechanical Indices. *Geosciences*. 2020;10(6):220. doi: 10.3390/geosciences10060220.
13. Luo G, Zhao Y, Shen W, et al. An analytical method for the impact force of a cubic rock boulder colliding onto a rigid barrier. *Nat. Hazards*. 2022;112:603-18. doi: 10.1007/s11069-021-05196-5.
14. Umili G, Taboni B, Ferrero AM. Influence of uncertainties: A focus on block volume and shape assessment for rockfall analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(9):2250-63. doi: 10.1016/j.jrmge.2023.03.016.
15. Torsello G, Vallero G, Castelli M. The role of block shape and slenderness in the preliminary estimation of rockfall propagation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021:833. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012177>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Олег Дмитриевич Белов –
 аспирант кафедры физических процессов горного
 производства и геоконтроля, Национальный
 исследовательский технологический университет
 «МИСИС», 119049, г. Москва, Российская Федерация,
 e-mail: below2idknet@inbox.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0129-9484>

ABOUT THE AUTHOR

Oleg D. Belov –
 postgraduate student of the Department of Physical Processes
 of Mining Production and Geocontrol of National University
 of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russian
 Federation, e-mail: below2idknet@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0129-9484>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.01.2025.

Поступила после рецензирования: 28.01.2025.

Принята к публикации: 30.01.2025.

Article info

Received: 13.01.2025.

Revised: 28.01.2025.

Accepted: 30.01.2025.