



**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АО “КОЛЬСКАЯ ГМК”)
В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО И ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ**

А. В. Земцовский, Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru,
ул. Ферсмана 24, г. Апатиты 184209, Россия*

Представлены результаты исследований свойств горных пород Ждановского медно-никелевого месторождения, которое находится в Печенгском районе Мурманской области. Установлен характер накопления упругой энергии в образцах изучаемых пород и дана оценка их склонности к динамическому неуправляемому разрушению. На основании экспериментальных исследований определены механические свойства и энергетические параметры образцов при одноосном и трехосном сжатии. Показано, что изучаемые породы относятся к прочным скальным, склонным к динамическому разрушению, что является одним из условий отнесения месторождений к опасным по горным ударам.

Ждановское месторождение, хрупкость, упругая энергия, динамическое разрушение, лабораторные испытания, горные породы

**STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES AND ROCK FAILURE CHARACTER
OF ZHDANOVSKY DEPOSIT (JSC KOLA MMC)
IN CONDITIONS OF UNIAXIAL AND TRIAXIAL COMPRESSION**

A. V. Zemtsovsky, N. N. Kuznetsov, and A. K. Pak

*Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences,
E-mail: zemtsovskiy@yandex.ru, ul. Fersmana 24, Apatity 184209, Russia*

The study results of rock properties of Zhdanovsky copper-nickel deposit are presented in the article. The deposit is located in Pechenga district of the Murmansk region. The main purpose of the work was to determine the nature of the elastic energy accumulation in the rock samples studied and to assess their proneness to dynamic uncontrolled failure. Based on the performed experimental studies, the mechanical properties and energy parameters of the samples under uniaxial and triaxial compression conditions were determined. The analysis of the results has shown that the studied rocks belong to the hard rocks which are prone to dynamic failure. It is one of the conditions for classifying the deposits as rockburst hazardous.

Zhdanovsky deposit, brittleness, elastic energy, dynamic fracture, laboratory tests, rocks

Ждановское месторождение медно-никелевых руд располагается в северо-западной части Кольского полуострова в Печенгском районе и содержит одни из крупнейших запасов медно-никелевых руд в России [1–3]. В настоящее время оно разрабатывается подземным рудником “Северный”, входящим в состав АО “Кольская ГМК”.

Месторождение представлено несколькими рудными телами, имеющими пластообразную форму с раздувами и пережимами. Средняя мощность рудных тел составляет 23 м, средний угол падения 40°. Руда и вмещающие породы разбиты дизъюнктивными нарушениями и межпласто-

выми тектоническими зонами, однако массив вполне устойчив при ведении горных работ. До недавнего времени запасы Ждановского месторождения отрабатывались карьером. В настоящее время осуществлен переход от открытого способа разработки к подземному [4, 5].

Цель исследований, проводившихся Горным институтом в последние годы на Ждановском месторождении, — оценка удароопасности массива месторождения [6]. Для этого необходимо было определить свойства горных пород в условиях одноосного и трехосного сжатия, их способность хрупко разрушаться с выделением большого количества энергии, т. е. склонность к динамическому разрушению, а также оценить величину действующих в массиве напряжений. На основании этих данных все месторождение или его часть могут быть отнесены к склонным или опасным по горным ударам [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения комплексных лабораторных исследований горных пород Ждановского месторождения отобраны штUFFы четырех литологических разностей Центрального рудного тела (ЦРТ): туфогенно-осадочная порода, диабаз, сплошная медно-никелевая руда и серпентинизированный перидотит; а также четырех разностей Юго-Западного рудного тела (ЮЗРТ): туфогенно-осадочная порода, габбро, сплошная медно-никелевая руда и серпентинизированный перидотит. Из штUFFов размером 150×150×150 мм изготавливали образцы в форме цилиндров и кубиков. Подготовленные цилиндры имели отношение высоты к диаметру 2 : 1 (90×45 мм). Сторона образцов кубической формы составляла 45 мм, количество образцов для каждого вида испытаний — не менее 6 шт.

Изучение механических свойств образцов проводилось с помощью сервогидравлической установки MTS 816 Rock Test System. В режиме одноосного нагружения находили величины пределов прочности при сжатии и растяжении, а также модулей упругости и коэффициентов Пуассона. В режиме трехосного нагружения определяли характер изменения прочности образцов с увеличением бокового давления от 10 до 30 МПа. Методика испытаний в условиях трехосного сжатия представлена в [8].

На основе полученных данных значения коэффициентов хрупкости K_b и критической удельной энергии деформирования образцов исследуемых горных пород при одноосном $W_{сж}$ и трехосном $W_{3сж}$ сжатии вычислялись по следующим формулам:

$$K_b = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}},$$

$$W_{сж} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E},$$

$$W_{3сж} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}{2E},$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при одноосном сжатии, МПа; σ_p — предел прочности при одноосном растяжении, МПа; σ_1 , σ_2 , σ_3 — максимальное, среднее и минимальное главные напряжения соответственно, МПа; E — модуль упругости, МПа; ν — коэффициент Пуассона.

Результаты определения основных механических свойств и энергетических параметров горных пород ЦРТ и ЮЗРТ Ждановского месторождения представлены в табл. 1. Видно, что из пород ЦРТ наибольшие значения прочности при сжатии и модуля упругости имеет сплошная медно-никелевая руда, менее прочная и упругая туфогенно-осадочная порода и серпентинизированный перидотит, наименее — диабаз. В ходе исследования выявлена обратная тенденция: наименьшие значения — для сплошной руды и туфогенно-осадочной породы, а наибольшие — для перидотита и диабаза. Поскольку для идеально хрупких пород $K_b = 0$ [9], можно сделать вывод, что в большей степени хрупкими будут руда и туфогенно-осадочная порода, в меньшей — остальные две литологические разности.

ТАБЛИЦА 1. Результаты определений механических свойств и энергетических параметров горных пород Центрального и Юго-Западного рудных тел Ждановского месторождения

Горные породы	Плотность, г/см ³	σ_{ucs} , МПа	σ_t , МПа	E , 10 ⁴ , МПа	ν	K_b	Критическая удельная энергия деформирования, МДж/м ³
Туфогенно-осадочная порода ЦРТ	2.80	140	12.7	8.29	0.24	0.09	0.12
Диабаз ЦРТ	2.85	75	15.3	6.66	0.27	0.20	0.04
Сплошные руды ЦРТ	2.92	185	12.8	8.42	0.26	0.07	0.20
Перидотит ЦРТ	2.95	95	14.0	8.28	0.28	0.15	0.05
Туфогенно-осадочная порода ЮЗРТ	2.78	85	13.8	8.46	0.25	0.16	0.04
Габбро ЮЗРТ	3.01	100	18.0	6.47	0.28	0.18	0.08
Сплошные руды ЮЗРТ	4.55	160	12.6	8.48	0.26	0.08	0.15
Перидотит ЮЗРТ	2.85	165	16.4	8.52	0.25	0.10	0.16

Установленные значения критической удельной энергии деформирования для образцов исследуемых пород являются показателями энергии, которая накапливается при достижении предела прочности образцов и освобождается при их разрушении. При этом чем больше величина накопленной энергии, тем более интенсивно (динамично) происходит разрушение образца. Такого рода разрушения в обрабатываемом массиве будут аналогами различных динамических форм проявления горного давления от шелушения и стреляния до горных ударов и техногенных землетрясений.

Для пород ЦРТ наибольшее значение критической удельной энергии деформирования при одноосном сжатии имеет сплошная руда. В работе [10] обозначено, что чем больше критическая энергия будет превышать порог в 0.1 МДж/м³, тем более склонна горная порода к динамическому разрушению. Следовательно, разрушение сплошной руды должно происходить в ярко выраженной динамической форме, что подтверждено лабораторными испытаниями. В меньшей степени динамично разрушались образцы туфогенно-осадочной породы и перидотита ЦРТ. Для некоторых образцов диабаза характер разрушения был близок к условно статическому в виде проседания под нагрузкой без разлета осколков. Для данной горной породы значение критической удельной энергии деформирования минимально. Наибольшие значения прочности при сжатии и модуля упругости среди пород ЮЗРТ выявлены для сплошной медно-никелевой руды и серпентинизированного перидотита, менее прочные и упругие — габбро и туфогенно-осадочная порода.

При сопоставлении величин коэффициентов хрупкости исследуемых пород ЮЗРТ установлено, что наиболее хрупкие — сплошная руда и перидотит, менее хрупкие — габбро и туфогенно-осадочная порода. В свою очередь, по значениям критической удельной энергии деформирования в большей степени склонными к динамическому разрушению будут руда и перидотит, в меньшей — вторые две литологические разности. При этом для некоторых образцов туфогенно-осадочной породы характер разрушения был близок к условно статическому.

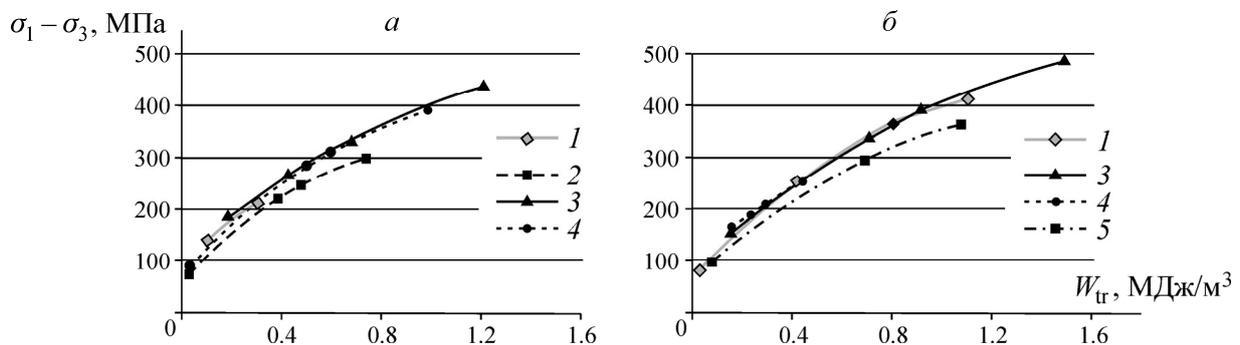
На основании сопоставления результатов исследований для пород ЦРТ и ЮЗРТ показано, что наиболее хрупкими и склонными к динамическому разрушению являются сплошные медно-никелевые руды, наименее — диабаз ЦРТ и туфогенно-осадочная порода ЮЗРТ. Все остальные породы занимают промежуточное положение по данным характеристикам.

По результатам выполненных испытаний образцов горных пород ЦРТ в условиях трехосного сжатия определены значения их прочностных и энергетических параметров (табл. 2). Наибольшее возрастание прочности с увеличением бокового давления произошло для сплошной медно-никелевой руды. Следует отметить, что прочность диабаза ЦРТ резко увеличилась в условиях трехосного сжатия, тогда как для более прочной туфогенно-осадочной породы ЦРТ такого эффекта не наблюдается. В свою очередь, менее прочная туфогенно-осадочная порода ЮЗРТ показала быстрое увеличение значений прочности при трехосном сжатии.

ТАБЛИЦА 2. Результаты определений прочностных и энергетических параметров горных пород Центрального и Юго-Западного рудных тел при трехосном сжатии

Горная порода	Прочность при трехосном сжатии, МПа			Критическая удельная энергия деформирования, МДж/м ³		
	$\sigma_2 = \sigma_3 = 10$	$\sigma_2 = \sigma_3 = 20$	$\sigma_2 = \sigma_3 = 30$	$\sigma_2 = \sigma_3 = 10$	$\sigma_2 = \sigma_3 = 20$	$\sigma_2 = \sigma_3 = 30$
Туфогенно-осадочная порода ЦРТ	155	216	242	0.14	0.26	0.32
Диабаз ЦРТ	233	264	330	0.39	0.49	0.75
Сплошные руды ЦРТ	277	351	468	0.44	0.69	1.22
Перидотит ЦРТ	298	329	423	0.52	0.61	1.00
Туфогенно-осадочная порода ЮЗРТ	271	377	442	0.42	0.80	1.08
Габбро ЮЗРТ	301	380	388	0.68	1.05	1.07
Сплошные руды ЮЗРТ	351	398	513	0.71	0.89	1.47
Перидотит ЮЗРТ	204	228	286	0.23	0.28	0.44

Характер изменения величин критической удельной энергии деформирования образцов горных пород ЦРТ и ЮЗРТ при трехосном сжатии представлен на рисунке, из которого видно, что больше всего упругой энергии при трехосном нагружении накапливается в образцах сплошной руды. Эта порода при разрушении в таких условиях будет выделять наибольшее количество энергии в окружающий массив, что может спровоцировать различные динамические проявления горного давления. Наименьший темп роста критических величин энергии выявлен для образцов туфогенно-осадочной породы ЦРТ и серпентинизированного перидотита ЮЗРТ. Разрушение указанных пород в условиях трехосного сжатия происходит с меньшей динамикой по сравнению с остальными исследуемыми литологическими разностями.



Изменение критической удельной энергии деформирования горных пород Центрального (а) и Юго-Западного (б) рудных тел в условиях трехосного сжатия: 1 — туфогенно-осадочная порода; 2 — диабаз; 3 — сплошная медно-никелевая руда; 4 — серпентинизированный перидотит; 5 — габбро

При сопоставлении значений критической удельной энергии деформирования пород ЦРТ при одноосном и трехосном сжатии и при боковом давлении 30 МПа установлено, что в последнем случае энергия возросла для туфогенно-осадочной породы в 3 раза, для руды — в 6 раз, для диабаза и перидотита — в 18 раз. Наибольшее увеличение критической энергии при трехосном сжатии зафиксировано для тех пород, прочность и энергия которых при одноосном сжатии были невысокими по сравнению с остальными породами данного рудного тела. Это, в свою очередь, может быть связано со структурными особенностями образцов, такими как размеры зерен, их спайность, плотность и т. д. При тех условиях для пород ЮЗРТ получили, что при трехосном сжатии энергия для перидотита возросла в 3 раза, для руды — в 10, для габбро — в 14, для туфогенно-осадочной породы — в 25 раз. Как и в случае с ЦРТ наибольшее возрастание зафиксировано для пород с меньшими прочностными и энергетическими характеристиками при

одноосном сжатии — туфогенно-осадочной породы и габбро, минимальное — для образцов перидотита, прочность и критическая энергия которого при одноосном сжатии одни из самых высоких.

ВЫВОДЫ

В ходе экспериментальных исследований образцов горных пород Ждановского месторождения определены их механические свойства и энергетические параметры. Анализ коэффициентов хрупкости и критической удельной энергии деформирования изучаемых пород показал, что наиболее хрупкими и склонными к динамическому разрушению являются сплошные медно-никелевые руды, в меньшей степени — серпентинизированный перидотит ЮЗРТ и туфогенно-осадочная порода ЦРТ, наименьшую хрупкость и близость к статическому разрушению при нагружении в условиях одноосного сжатия проявили диабаз ЦРТ и туфогенно-осадочная порода ЮЗРТ.

По результатам испытаний образцов горных пород Ждановского месторождения в условиях трехосного сжатия установлено, что изменение прочности и критической удельной энергии деформирования пород с увеличением бокового давления может происходить неодинаково за счет их структурных особенностей. Так, в менее прочных и в меньшей степени склонных к динамическому разрушению в условиях одноосного сжатия горных породах (диабазе и перидотите ЦРТ, туфогенно-осадочной породе и габбро ЮЗРТ) в условиях трехосного сжатия обнаружен значительный рост прочностных и энергетических характеристик, а следовательно они стали более склонны к динамическому разрушению. И наоборот, более прочные и склонные к таким видам разрушения породы (туфогенно-осадочная порода ЦРТ и серпентинизированный перидотит ЮЗРТ) при трехосном нагружении показали невысокие темпы увеличения прочности и критической удельной энергии деформирования. В связи с этим при оценке удароопасности горных пород необходимо проводить определение механических свойств и энергетических параметров горных пород не только в условиях одноосного, но и трехосного сжатия.

Установлено, что изучаемые горные породы Ждановского месторождения являются хрупкими скальными и в большинстве своем склонными к динамическому разрушению и могут быть отнесены к склонным и опасным по горным ударам.

Авторы благодарят профессора, д.т.н. А. А. Козырева и д.т.н. Э. В. Каспарьяна за ценные замечания и помощь в подготовке статьи, а также главного маркшейдера С. В. Временкова и главного геолога Р. Р. Фаизова АО “Кольская ГМК” за помощь в отборе проб горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Skuf'in P. K., and Bayanova T. B. Early Proterozoic central-type volcano in the Pechenga Structure and its relation to the ore-bearing gabbro-wehrlite complex of the Kola Peninsula, *Petrology*, 2006, vol. 14, pp. 609–627.
2. Skuf'in P. K. and Theart H. F. J. Geochemical and tectono-magmatic evolution of the volcano-sedimentary rocks of Pechenga and other greenstone fragments of the Kola Greenstone Belt, *Precambrian Research*, 2005, vol. 141, pp. 1–48.
3. Smol'kin V. F., Skuf'in P. K., Mitrofanov F. P., and Mokrousov V. A. Stratigraphy and volcanism in the Early Proterozoic Pechenga structure (Kola Peninsula), *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1996, vol. 4, issue 1, pp. 78–94.
4. Smirnov A. A., Vorob'yov V. L., and Anokhin M. A. The Development of the Zhdanovsky Deposit by “Severnoy-Glubokoy” mine, *Tsvetnye metally*, 2004, no. 12, pp. 22–24. [Смирнов А. А., Воробьев В. Л., Анухин М. А. Освоение запасов Ждановского месторождения рудником “Северный-глубокий” // Цветные металлы. — 2004. — №. 12. — С. 22–24.]

5. **Savich I. N., Volkov V. N., Atanov V. V., Udalov A. E., and Pavlov A. A.** Optimization of structural and technological solutions in underground mining of Zhdanovskoe copper-nickel deposit, *Gornyi zhurnal*, 2001, no. 11, pp. 33–35. [**Савич И. Н., Волков В. Н., Атанов В. В., Удалов А. Е., Павлов А. А.** Оптимизация конструктивных и технологических решений при подземной разработке медно-никелевых руд Ждановского месторождения // *Горн. журнал*. — 2011. — № 11. — С. 33–35]
6. **Kozyrev A. A., Semenova I. E., and Zemtsovsky A. V.** About rock-burst assessment of Zhdanovskoe deposit rock mass. Proceedings of the 15th scientific conference “Fersman’s scientific session”, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 300–303. [**Козырев А. А., Семенова И. Э., Земцовский А. В.** Об оценке удароопасности массива горных пород Ждановского месторождения // *Ферсмановская научная сессия: труды XIV Всерос. конф. с Междунар. участием*. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — С. 300–303.]
7. **Federal Rules and Regulations on Industrial Safety: Safe Mining at Rockburst-Hazardous Deposits**, Approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision as of December 2, 2013, no. 576). [**Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам”** (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2013 г., № 576).]
8. **Lodus E. V., Pak A. K., and Kuznetsov N. N.** Analysis of rock strength characteristics under three-axial axisymmetric compression, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2014, no. 6, pp. 233–242. [**Лодус Е. В., Пак А. К., Кузнецов Н. Н.** Анализ прочностных характеристик скальных горных пород в условиях трехосного осесимметричного сжатия // *ГИАБ*. — 2014. — № 6. — С. 233–242.]
9. **Shashenko D. A.** Influence of rock structure on the strength of rib pillars, *Geotechnical mechanics*, 2008, vol. 78, pp. 109–112. [**Шашенко Д. А.** Влияние структуры горных пород на прочность ленточных целиков // *Геотехническая механика*. — 2008. — Вып. 78. — С. 109–112.]
10. **Kuznetsov N. N., Fedotova I. V., Pak A. K.** Strain and energy parameters of burst-prone rocks: study and analysis, Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications, June 2018, pp. 281–284.