

УДК 622.831

Исследование физико-механических свойств горных пород нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения для прогноза его потенциальной удароопасности

© Е.Л. Сосновская^а, Батжаргал Долгурсурэн^б^аИнститут горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия^бИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

В ходе исследований геомеханических условий нижних горизонтов Зун-Холбинского золоторудного месторождения определены показатели физико-механических свойств горных пород, проведена петрографическая диагностика испытуемых пород с целью выяснения возможной зависимости физико-механических свойств пород и руд от их петрографического состава, структуры и текстуры. Выявлено, что породы характеризуются высокими упругими характеристиками. Проведена оценка склонности пород к хрупкому разрушению. Установлено, что потенциально удароопасными породами на нижних горизонтах являются диориты, гранодиориты, гнейсы, неудароопасными – известняки, алевролитопесчаники.

Ключевые слова: физико-механические свойства горных пород, геомеханические условия, потенциальная удароопасность, устойчивость горных выработок

Study of the Physicomechanical Properties of Rocks in the Lower Horizons of the Zun-Kholbinskoye Deposit to Predict Its Potential Impact Hazard

© Elena L. Sosnovskayaa^а, Batjargal Dolgorsuren^б^аInstitute of Mining of the Ural Division of Russian Academy of Sciences

(IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Yekaterinburg, Russia

^бIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

In the course of research on the geomechanical conditions of the lower horizons of the Zun-Kholbinskoye gold deposit, indicators of the physical and mechanical properties of rocks are determined, petrographic diagnostics of the test rocks is carried out in order to ascertain the possible dependence of the physical and mechanical properties of the rocks and ores on their petrographic composition, structure and texture. It is revealed that the rocks are characterized by high elastic characteristics. It is established that potentially shock rocks on the lower horizons are diorites, granodiorites, gneisses, and limestones and silt sandstones are not hazardous.

Keywords: physical and mechanical properties of rocks, geomechanical conditions, potential impact hazard, stability of mine workings

Зун-Холбинское золоторудное месторождение представлено крутопадающими жилами. Глубина разработки достигла 1000–1200 м. На больших глубинах действуют высокие гравитационно-тектонические напряжения и вызывают вредные проявления горного давления в виде отслоения и обрушения блоков пород висячего и лежачего блоков жил [1]. С целью обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ авторы проводили исследования геомеханических условий на месторождении [1–5].

В соответствии с «Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [6], на разведываемых, подготавливаемых к отработке и разрабатываемых месторождениях твердых полезных ископаемых должны быть выполнены работы по выявлению склонности пород к горным ударам и газо-геодинамическим проявлениям. С этой целью в лаборатории геомеханики и физики горных пород ИРННТУ были проведены исследования массива горных пород нижних горизонтов Зун-Холбинского золоторудного месторождения.

В процессе исследований в августе 2017 г. на месторождении отобрано 7 образцов горных пород. Образцы были отобраны из kernового материала скважин РС-1032, РС-1373 (рудное тело Вавиловское, буровая камера БК-5, гор. 1290 м). Специалистами ИРННТУ в

лаборатории геомеханики и физики горных пород были произведены испытания физико-механических свойств отобранных образцов с целью прогноза степени их удароопасности.

Определение показателей физико-механических свойств горных пород производилось в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации на методы испытаний горных пород. Определены следующие свойства образцов горных пород: плотность, пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении, сцепление, угол внутреннего трения пород, коэффициент крепости по М.М. Протодряконову, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, категория крепости пород. Основные свойства горных пород определялись в сухом и водонасыщенном состоянии образцов. Установлена степень размягчаемости пород при их водонасыщении. Произведена оценка склонности пород к хрупкому разрушению.

Плотность и влажность горных пород определяли в соответствии с ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Определение предела прочности горных пород при одноосном растяжении выполнено в соответствии с ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении». Предел прочности горных пород при одноосном сжатии определяли в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Деформационные показатели (модуль деформации, модуль упругости и коэффициент Пуассона) определялись в соответствии с ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии» одновременно с определением прочности при одноосном сжатии. Деформационные характеристики определялись в диапазоне осевых напряжений от 5 до 50 % от величины предела прочности при одноосном сжатии.

Дополнительно упругие свойства горных пород уточнялись неразрушающими методами с помощью ультразвуковых исследований. Для оценки потенциальной удароопасности горных пород произведена оценка склонности пород к хрупкому разрушению двумя базовыми способами [7–9]. Первый способ (Г.Н. Кузнецова) заключается в определении отношения предела прочности пород на одноосное сжатие к пределу прочности на одноосное растяжение.

Породы склонны к хрупкому разрушению, если соблюдается условие [7]

$$K_{xp} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} > 6,$$

где K_{xp} – коэффициент хрупкости; $\sigma_{сж}$ – предел прочности горных пород при одноосном сжатии; σ_p – предел прочности горных пород при одноосном растяжении.

Второй способ базируется на оценке деформационных характеристик при предельном деформировании образца.

Испытания по определению коэффициента удароопасности проведены в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам» [9].

По графику деформирования образца, полученному при испытании деформационных характеристик, на восходящей ветви диаграммы определяют модуль упругости, на ниспадающей – модуль спада (рисунок).

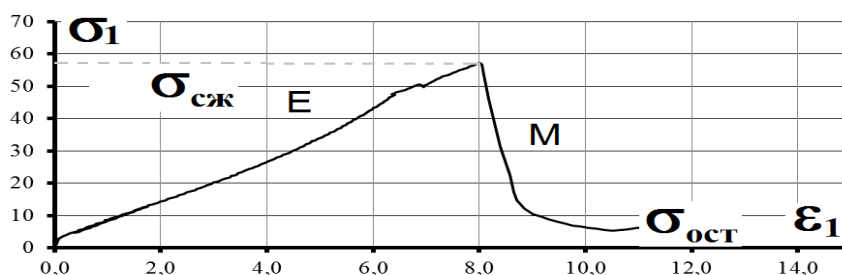


Диаграмма «напряжение – деформация» при одноосном сжатии известняков Зун-Холбинского месторождения:

σ_1 – осевое давление на образец, МПа; ϵ_1 – продольная деформация образца, $\times 10^{-4}$;
 E – модуль упругости образца, МПа; M – модуль спада образца, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{ост}$ – предел остаточной прочности, МПа

При $E / M < 1$ порода считается удароопасной; при $E / M > 1$ – неудароопасной.

Параллельно с лабораторными испытаниями образцов были изготовлены шлифы, по которым проведена петрографическая диагностика испытуемых пород с целью выяснения возможной зависимости физико-механических свойств пород и руд от их петрографического состава, структуры и текстуры.

По результатам анализа установлено, что представленные породы затронуты наложенным гидротермальным импрегнационно-жильным процессом в количестве от 5 до 40 % (табл. 1). Гидротермальная минерализация представлена следующими минералами: эпидот, кальцит, эпидот, серицит-мусковит, серицит-хлорит. Гидротермальная минерализация цементирует основные исходные породы.

Таблица 1

Петрографическая характеристика горных пород

Наименование породы	Структура	Текстура	Минеральный состав	Размер зерен, мм	Гидротермальная минерализация, %
Известняк	Разнозернистая	Однородная	Кальцит	0,1–1	5
	Разнозернистая обломочная	Линзовидная	Хлорит, кварц, мусковит	До 2 и более	
Алевритопесчаник	Разнозернистая, алевритопсаммитовая, микрочешуйчатая, обломочная	Линзовидная, в линзах однородная	Кварц, плагиоклаз, кальцит, хлорит, серицит, эпидот		До 2 и более
Гнейс	Гранобластовая	Гнейсовидная, полосчатая	Кварц, полевой шпат	До 2	40
Диорит	Обломочная	Однородная		0,1–1,5	15
Гнейсо-гранит	Чешуйчато-кристаллическая	Директивная (направленная), неотчетливо линзовидная	Полевой шпат, кварц, биотит	0,1–3 и более	20
Плагиогранит	Мелко-среднезернистая	Однородная	Кварц, плагиоклаз, калишпат	До 2	15

Структура пород в основном мелко- и среднезернистая, обломочная, затронутая тектоническими процессами. Размеры зерен – 0,1–3 мм и более. Текстура пород однородная, полосчатая, линзовидная, в линзах – однородная. Основные минералы – кварц, кальцит, полевой шпат, калишпат, плагиоклаз, хлорит, биотит, мусковит. Представленные образцы, на основании петрографического анализа будут характеризоваться высокими упругим и деформационными свойствами (небольшой размер зерен, гидротермальная цементация), по всей видимости, склонны к хрупкому разрушению (наличие хрупких минералов – кварц, кальцит, обломочная структура, затронутость тектоническими процессами). Под воздействием воды прочностные свойства и склонность к хрупкому разрушению будут снижаться вследствие обломочной и разнозернистой структуры при наличии размягчаемого цемента (кальцит).

В результате проведенных исследований физико-механических свойств горных пород установлено, что горные породы обладают средней плотностью 2,75 т/м³, относятся к категории средней крепости (табл. 2). Коэффициент крепости по М.М. Протождяконову изменяется в диапазоне от 4 до 10 и составляет в среднем 7. Предел прочности пород на сжатие в сухом состоянии равен 69,63 МПа, во влажном состоянии – 53,25 МПа. Пределы прочности на растяжение составят 11,3 и 11,5 МПа соответственно. Угол внутреннего трения пород в сухом состоянии составляет в среднем 28°, во влажном состоянии – 24°. Сцепление пород в сухом состоянии – 20,3 МПа, во влажном состоянии – 16,6 МПа. Остаточная прочность образцов равна 9,75 МПа. Степень размягчаемости варьируется в широких пределах от 0 до 60 %.

Физико-механические свойства горных пород Зун-Холбинского месторождения

Наименование породы	ρ , г/см ³	В воздушно-сухом состоянии				В водонасыщенном состоянии				f	K_{sat}
		$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	τ , МПа	φ , град.	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	τ , МПа	φ , град.		
Известняк	2,8	68,29	10,61	19,39	32	46,81	15,55	17,31	16	7	0,46
	2,68	23,95	8,79	9,29	14	15,93	6,36	6,32	13	4	0,5
Алевролитопесчаник	2,71	40,28	11,37	13,98	20	40,31	8,85	12,59	26	5	0
Гнейс	2,72	61,97	12,03	18,75	28	59,6	11,77	18,04	28	7	0,04
Диорит	2,84	93,68	11,13	25,81	35	58,61	12,37	18,21	26	9	0,6
Гранодиорит	2,78	114,7	14,14	31,63	35	80,2	14,52	23,74	29	10	0,43
Плагиогранит	2,69	84,51	11	23,43	34	71,3	10,97	20,25	32	8	0,19
Среднее	2,75	69,63	11,3	20,33	28	53,25	11,48	16,64	24	7	0,31

Примечание: ρ – средняя плотность; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии; σ_p – предел прочности при растяжении; τ – сцепление; φ – угол внутреннего трения; f – коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову; K_{sat} – коэффициент размягчаемости.

Исследуемые породы характеризуются высокими упругими характеристиками (табл. 3). Статический модуль Юнга пород составляет 49,3–50,1 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,18, статический модуль деформации – 43,3–56,5 ГПа, коэффициент поперечной деформации – 0,15. Средний модуль спада – 104,3 ГПа.

Таблица 3

Упругие характеристики горных пород

Наименование породы	μ	E_d , МПа 10^4	E , ГПа	M , МПа 10^4	$\sigma_{ост}$, МПа
Известняк (образец 1)	–	3,89	36,8	12,38	6,31
Известняк (образец 2)	0,22	2,95	38	2,09	3,6
Алевролитопесчаник	0,14	3,63	44,5	8,31	13,68
Гнейс	–	4,32	55,4	10,42	20,7
Диорит	0,38	6,2	63,5	15,28	6,84
Гранодиорит	-	4,99	57,3	14,1	7,37
Среднее	0,25	4,33	49,3	10,43	9,75

Примечание: μ – коэффициент Пуассона; E_d – модуль общей деформации; E – модуль упругости; M – модуль спада; $\sigma_{ост}$ – остаточный предел прочности при сжатии.

Оценка хрупкости пород по критерию Г.П. Кузнецова установила отношение $\sigma_{сж}/\sigma_p > 6$ для диоритов, гранодиоритов, и плагиогранитов в естественно-сухом состоянии (табл. 4). Алевролитопесчаники и один образец известняка оказались не склонными хрупко разрушаться, второй образец известняка показал небольшую склонность к хрупкому разрушению. В водонасыщенном состоянии в результате размягчения пород все представленные породы кроме плагиогранита не показали склонности к хрупкому разрушению.

Таким образом, можно сделать вывод, что диориты, гранодиориты, плагиограниты являются склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой, известняки и алевролитопесчаники – несклонными. Коэффициент хрупкости изменяется для естественно-сухих пород в пределах от 2,7 до 8,4 и составляет в среднем для сухих пород 5,8, для водонасыщенных – 4,6, что отвечает категории массива горных пород – неудароопасный. В результате водонасыщения пород потенциальная удароопасность горного массива значительно снижается. Для исследуемых образцов склонность к хрупкому разрушению в водонасыщенном состоянии сохранил только один образец плагиогранита.

Оценка потенциальной удароопасности по критерию запредельного деформирования пород в естественно-сухом состоянии показала, что склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой являются диориты, гранодиориты, гнейсы, один образец известняка. Второй образец известняка и алевролитопесчаники показали категорию «неудароопасно». В среднем по всем представленным образцам коэффициент удароопасности равен 0,47, что меньше критерия удароопасности $E/M = 1$ и отвечает характеристике массива «неудароопасный».

Комплексная оценка склонности горных пород к хрупкому разрушению

Наименование породы	Критерий $\sigma_{сж} / \sigma_p$				Критерий E / M	
	В естественно-сухом состоянии		В водонасыщенном состоянии		Значение критерия	Оценка склонности к хрупкому разрушению
	Значение критерия	Оценка склонности к хрупкому разрушению	Значение критерия	Оценка склонности к хрупкому разрушению		
Известняк	6,4	Склонный	3	Несклонный	0,315	Склонный
	2,7	Несклонный	2,5		5,396	Несклонный
Алевролитопесчаник	3,5		4,6		1,334	
Гнейс	5,2	Склонный	5,1		0,82	Склонный
Диорит	8,4		4,7		0,438	
Гранодиорит	8,1		5,5		0,462	
Плагиогранит	7,7		6,5	Склонный	–	–

На основании проведенных исследований можно заключить, что горные породы нижних горизонтов Холбинского рудника обладают высокими прочностными и упругими характеристиками, для части материала отмечается склонность к хрупкому разрушению, не исключено размягчение в результате водонасыщения.

Установлено, что потенциально удароопасными породами нижних горизонтов Холбинского рудника являются диориты, гранодиориты, гнейсы, неудароопасными – известняки, алевролитопесчаники. Следует отметить, что вероятность проявлений горного давления в динамических формах в обводненных выработках по отношению к естественно-сухому состоянию прогнозируется существенно ниже.

Результаты лабораторных испытаний свойств горных пород использованы в качестве граничных условий для оценки напряженно-деформированного состояния горных выработок и целиков при отработке глубоких горизонтов Холбинского рудника. Для практического использования на руднике в 2017 г. разработано Заключение об удароопасности и газодинамических проявлениях на Зун-Холбинском золоторудном месторождении.

Библиографический список

1. Павлов А.М., Мильшин Е.А., Сосновский Л.И., Зотеев О.В., Филонюк В.А. Параметры геотехнологии отработки крутопадающих жил в условиях крайне неравномерного распределения запасов металла в недрах на больших глубинах Зун-Холбинского золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 22–27.
2. Сосновский Л.И., Давиденко А.А., Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л. Управление геомеханическими процессами на золоторудных месторождениях // Горному надзору России – 285 лет: материалы регион. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2005. С. 18–24.
3. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. С. 74–85.
4. Сосновская Е.Л., Сосновский Л.И. Прогноз потенциальной удароопасности жильных золоторудных месторождений на стадии строительства рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 5. С. 94–101.
5. Сосновская Е.Л., Махно Д.Е. Перспективные направления совершенствования геотехнологий крутопадающих жил на больших глубинах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12. С. 107–111.
6. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Сер. 03. Вып. 78. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 276 с.
7. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. 66 с.

8. Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Сер. 06. Вып. 7. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 80 с.

9. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Сер. 06. Вып. 8. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. 52 с.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Сосновская Елена Леонидовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Elena L. Sosnovskaya,

Cand. Sci. (Geology and Mineralogy),
Senior Research Worker,
Institute of Mining of the Ural Division of Russian Academy of Sciences
(IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences),
58 Mamina-Sibiryak St., Yekaterinburg, 620075, Russia,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Батжаргал Долгорсурэн,

горный инженер, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: Doogii.do@mail.ru

Batjargal Dolgorsuren,

Mining Engineer, Postgraduate Student of Development of Mineral Deposits Department,
Subsoil Management Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: Doogii.do@mail.ru