

ИЗУЧЕНИЕ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ЗОЛОТОРУДНОГО АЛБЫНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

М. И. Рассказов¹, Д. И. Цой¹, В. Г. Крюков¹, М. И. Потапчук¹, Ю. В. Федотова¹

¹ Институт горного дела — обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация: Представлены горно-геологические и структурные особенности золоторудного Албынского месторождения, а также результаты исследований физико-механических свойств горных пород. В ходе работы были определены следующие параметры горных пород: плотность, предел прочности на одноосное сжатие, предел прочности на одноосное растяжение, упругие свойства горных пород (коэффициент Пуассона и модуль Юнга) в условиях естественной влажности и в водонасыщенном состоянии. Для проведения испытаний были использованы прессы ToniРАСТ II-2091, ToniNORM-2020. По результатам измерений были построены паспорта прочности горных пород, для определения значений углов внутреннего трения и сцепления, проводились определения величины показателя хрупкости. Связано это с тем, что по значению данного показателя можно судить о склонности горных пород к динамическому разрушению. Оценка величин данного показателя осуществлялась двумя способами: графическим и расчетным. Также были рассчитаны рейтинговые показатели для руд и пород. Результаты проведенных исследований выявили наличие высоких значений предела прочности на сжатие для отдельных образцов, это показывает, что в массиве существуют зоны повышенных напряжений в интервалах с крепкими и хрупкими породами. Соответственно, при определенных геомеханических условиях разработки месторождения можно предположить, что данные породы потенциально могут перейти в опасное состояние, вплоть до разрушения в динамической форме на отдельных участках Албынского золоторудного месторождения, а его можно отнести к склонным к горным ударам.

Ключевые слова: физико-механические свойства, рудное золото, горные породы, одноосное сжатие, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, паспорт прочности, коэффициент хрупкости, рейтинг пород и руд.

Для цитирования: Рассказов М. И., Цой Д. И., Крюков В. Г., Потапчук М. И., Федотова Ю. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного Албынского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–2. — С. 146–161. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_146.

Albyn gold deposit: Geological features, physical and mechanical properties

M. I. Rasskazov¹, D. I. Tsoi¹, V. G. Kryukov¹, M. I. Potapchuk¹, Yu. V. Fedotova¹

¹ The Institute of Mining is a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract: The article describes geological structure, as well as physical and mechanical properties of Albyn gold deposit and enclosing rock mass. The studies have determined density, uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength and elastic properties of rocks (Poisson's ratio and Young's modulus) under conditions of natural humidity and in water-saturated state. The lab-scale tests used pressing machines ToniPACT II-2091 and ToniNORM-2020. From the test results, the failure envelopes of rocks are plotted. Internal friction angle and cohesion were found from the estimated brittleness index. The latter points at dynamic fracture ability of rocks. The index of brittleness was evaluated in two ways: using graphic procedure and calculation. The indexes of rock mass classifications and ratings were calculated for ore and enclosing rocks. The studies reveal high values of the compressive strength in some test samples, which means that there are zones of the increased stress in rock mass areas composed of strong and brittle rocks. Accordingly, under certain geomechanical conditions in the course of mining, such rocks can go to hazardous state, up to dynamic fracture in certain areas of Albyn gold deposit, and Albyn rock mass can be assumed as rockburst-hazardous.

Key words: physical and mechanical properties, ore gold, rocks, uniaxial compression, Young's modulus, Poisson's ratio, failure envelope, brittleness factor, rock and ore ratings.

For citation: Rasskazov M. I., Tsoi D. I., Kryukov V. G., Potapchuk M. I., Fedotova Yu. V. Albyn gold deposit: Geological features, physical and mechanical properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):146–161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_146.

Введение

Как показывает практика, обоснование наиболее рациональной системы разработки месторождения возможно только после комплексного и детального изучения геолого-структурных, инженерно-геологических условий района месторождения, а также определения физико-механических свойств горных пород. На стадии освоения месторождения необходимо иметь надёжную информацию о структурных особенностях, свойствах и состоянии массива горных пород, их изменении под влиянием горных работ [1–3]. Изучение физико-механических свойств горных пород имеет важное значение для расчетов требуемых параметров технологических процессов и проектирования конструктивных параметров

транспортно-выемочного комплекса, во всех отраслях производства горной промышленности — от разведки месторождений полезных ископаемых до их обогащения [4–8]. Поскольку Албынское месторождение предполагается разрабатывать не только открытым, но и подземным способом, были выполнены исследования образцов керна и проведен расчет ряда показателей для оценки состояния массива.

Объект исследований

Албынское рудное поле, расположенное в северо-восточной части Амурской области в виде субширотной дугообразно изогнутой полосы, прослеживается на 4,5–5,0 км от р. Харга на западе через верховья ручьев Албын и Маристый на востоке. Ширина

его на западном фланге составляет 350–700 м, в центральной части — до 1800 м, на восточном фланге — до 130 м. Рудное поле, помимо своеобразия структурного рисунка, выделяется в качестве сложной минеральной аномалии. По составу такая аномалия соответствует сложно развивающимся структурам воздымания на фоне общей просадки площади. Рудное поле представлено месторождениями Харгинским и Албынским [9–11].

Албынское месторождение представлено 26 рудными телами, большая часть из которых выходит на поверхность. По отношению к вмещающим породам их можно разделить на две основных разновидности — послонные и секущие. Послонные тела характеризуются северным падением, секущие — южным [12–13]. В пределах месторождения выделены пластообразные субогласные рудные залежи, границы которых устанавливаются в основном опробованием. Основные рудные тела центральной части месторождения с глубиной не выклиниваются. Мощность рудных тел 0,5–32,4 м (средняя — 6,9 м), протяженность по простиранию составляет 40–2050 м, по падению — 5–770 м. Гидрогеологические особенности месторождения обуславливаются сложностью геологоструктурного строения массива пород, представленных преимущественно метаморфическими образованиями, прерванными интрузиями с интенсивной дислоцированностью кристаллического субстрата, нарушенного разрывной тектоникой [14–16].

Методы исследования

Основные физико-механические свойства пород определяли следующими методами.

Истинную плотность горной породы и зерен щебня (гравия) определяли

согласно [17] путем измерения массы единицы объема измельченного, высушенного материала по соответствующей формуле:

$$\rho = \frac{m}{m + m_1 - m_2} \rho_B, \quad (1)$$

где m — масса навески порошка, высушенного до постоянной массы, г; ρ_B — плотность воды, принимаемая равной 1 г/см³; m_1 — масса пикнометра с дистиллированной водой, г; m_2 — масса пикнометра с навеской и дистиллированной водой после удаления пузырьков воздуха, г.

Определение предела прочности пород производили в соответствии с [18] методом одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими образцами. При этом образец размещался между стальными плитами (рис. 1), его ось совмещалась с центром нижней опорной плиты испытательной машины, нагружался он с равномерной скоростью 1–5 МПа/с до разрушения [19–20].

Проводилось испытание цилиндрических образцов с параллельными торцами, у которых отношение высоты к диаметру равно 1,5. В случае, если рекомендуемое отношение, равное двум, не удавалось выдержать

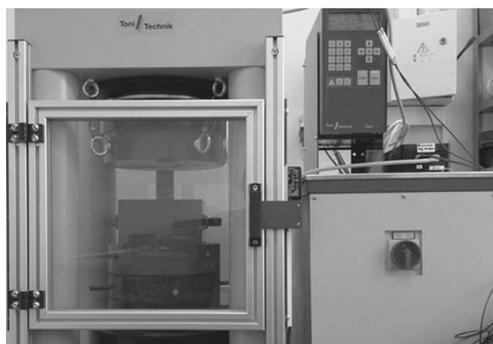


Рис. 1. Размещение образца между плитами испытательной машины ToniPACT II-2091
Fig. 1. Arrangement of sample between plates of pressing machine ToniPACTII-2091

из-за недостаточных размеров кернов, образцы испытывались с отношением высоты к диаметру от 1 до 2 с последующим пересчетом результатов испытаний для приведения к стандартному с помощью корректировочного коэффициента K_h , определяемого по формуле:

$$K_h = 1 - [0,14921(2 - h / d) - 0,024607(2 - h / d)^2 + 0,077359(2 - h / d)^3], \quad (2)$$

где h — высота, d — диаметр образца.

По результатам проведенных испытаний значения предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ в МПа для каждого образца определяли по формуле:

$$\sigma_{сж} = K_h \cdot \frac{P}{S} \cdot 10, \quad (3)$$

где P — разрушающая образец сила, кН; S — площадь поперечного сечения образца, см².

Определение предела прочности пород на одноосное растяжение производили в соответствии с [21] на образцах правильной формы сферическими инденторами. Испытания предела прочности на одноосное растяжение проводилось на установке ToniNORM (рис. 2). При этом образец нагружали до разрушения равномерно со скоростью 1 кН/с. Испытание признавали действительным при разрыве образца на две части по поверхности, проходящей через ось нагружения. Далее определяли величину площади поверхности разрыва образца в квадратных сантиметрах.

Предел прочности при одноосном растяжении σ_p в МПа для каждого образца вычисляли по формуле:

$$\sigma_p = 7,5 \frac{P}{S} K, \quad (4)$$

где P — разрушающая сила, кН; S — площадь поверхности разрушения образца, см²; K — безразмерный масштабный коэффициент, принимаемый равным 1 при $S = (15 \pm 3)$ см². Для других значений S коэффициент K устанавливается по табл. 1.

Основные упругие свойства (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) опре-

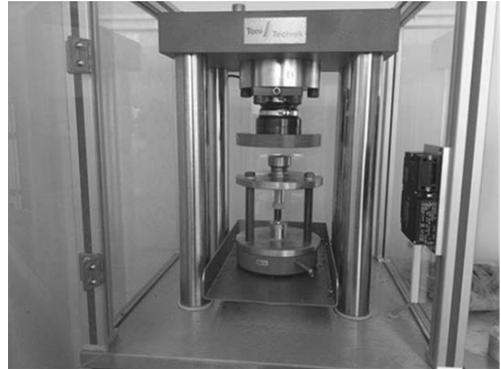


Рис. 2. Размещение образца между сферическими инденторами испытательной машины ToniNORM-2020

Fig. 2. Arrangement of sample between spherical indenters of pressing machine TonicNORM-2020

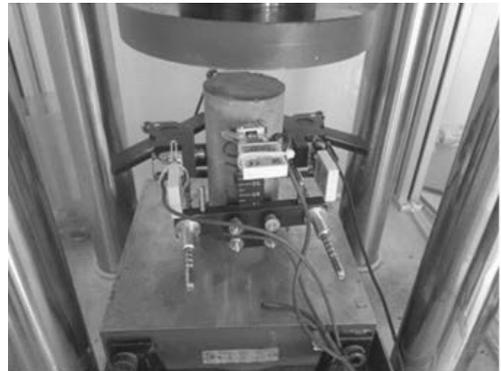


Рис. 3. Устройство с датчиками продольной и поперечной деформации для определения упругих параметров образцов диаметром 40–70 мм на испытательной машине ToniPACT II

Fig. 3. Elasticity measurement device with axial and transverse strain sensors on testing machine ToniPACT II for samples with diameter of 40–70 mm

деляли с применением оборудования, прилагаемого к испытательной машине ToniPACT II, а также программного обеспечения, использующего методику обработки измеренных данных в соответствии с международным стандартом ISO 6784. Образцы цилиндрической формы располагали между плитами испытательной машины ToniPACT II. Осевую нагрузку определяли по датчику давления гидравлической системы пресса. Полупроводниковые тензодатчики деформации германской фирмы Zwick марки DD1 крепили на настраиваемых рамках. (рис. 3).

Образец, помещенный между плитами пресса, нагружали циклически 3 раза. Нижнее усилие пресса обеспечи-

вает напряжение 5 МПа, верхнее — 15 МПа. Устройство управления прессом передает в компьютер все измеренные значения усилий и деформаций с продольных и поперечных датчиков. В расчет принимались значения деформации в третьем цикле нагружения. Для расчета модуля упругости определялись средние за 10 с деформации при выдержке постоянного напряжения при нижнем и верхнем значениях усилия пресса в третьем цикле. На (рис. 4) приведен фрагмент окна программы testxpert, используемой при определении упругих параметров.

В процессе проведения испытаний образцов на прочность также проводились определения величины показателя

Таблица 1

Определение значений коэффициента K
Determining the values of the K coefficient

S, см ²	3	4	5	8	10	15	20
K	0,67	0,72	0,76	0,85	0,90	1,00	1,08
S, см ²	30	35	40	45	50	80	100
K	1,19	1,24	1,28	1,32	1,35	1,52	1,61

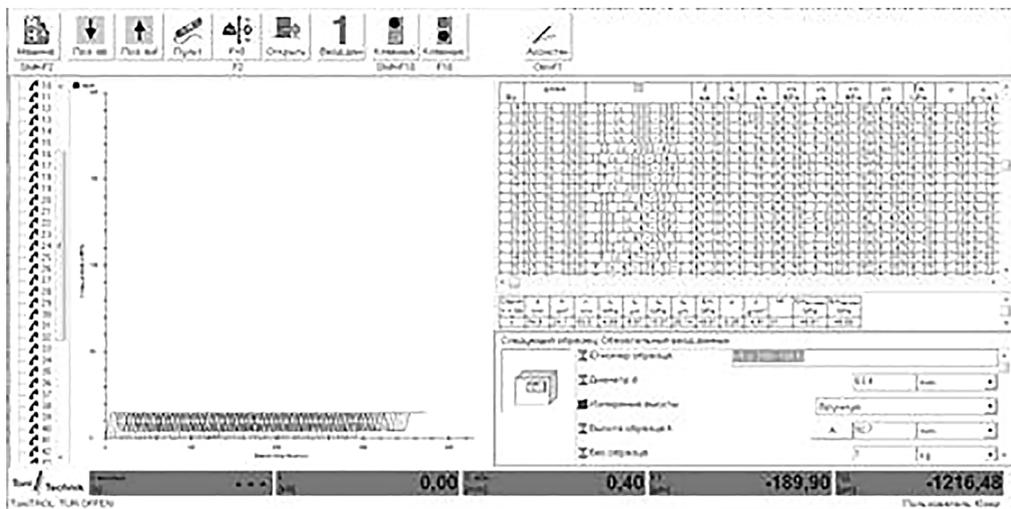


Рис. 4. Окно программы testxpert с выводом на монитор графической информации о деформировании образцов и таблиц с измеренными и рассчитанными параметрами
Fig. 4 Testxpert software window with graphic data display on sample deformation and with tables of calculations and measurements

теля хрупкости по отношению работы упругой деформации к полной. Связано это с тем, что по значению данного показателя можно судить о склонности горных пород к динамическому разрушению. Оценка величин данного показателя проводилась двумя способами: графическим и расчетным.

Оценка работы упругой деформации графическим способом на основании зависимости «Усилие — Ход поршня пресса» проводится по площади 3—2-4, а работы полной деформации — по площади 0—1-2—4 (рис. 5). Начальный участок с малым модулем упругости не учитывается. Коэффициент хрупкости (K) принимаем как отношение вышеуказанных площадей. При этом чем ближе величина показателя к 1, тем более хрупкой (потенциально удароопасной) является порода.

Значения коэффициента хрупкости также рассчитывались по формуле:

$$K_2 = EM^{-1}, \quad (5)$$

где E — модуль упругости; M — модуль спада. Чем ближе значение K_2 к нулю, тем более хрупкой и склонной к разрушению в динамической форме является порода.

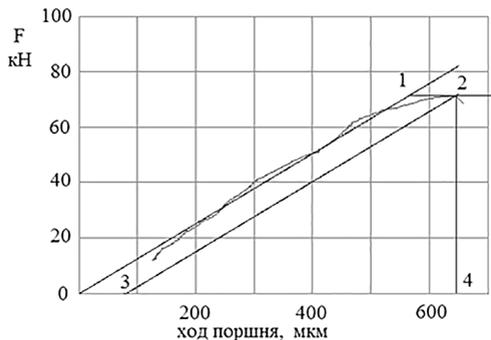


Рис. 5. Зависимость «усилие — ход поршня пресса» при испытаниях образцов на прочность при сжатии

Fig. 5. Press piston force–travel curve in compression tests

Паспорт прочности горных пород рассчитывался согласно [22, п. 3]. Данный метод предусматривает определение координат точек огибающей расчетным путем по эмпирическому уравнению с использованием результатов определения пределов прочности при одноосном сжатии и при одноосном растяжении.

Эмпирическое уравнение огибающей предельных кругов напряжений Мора (τ) принимается в виде:

$$\tau = \tau_{\max} \left(\frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (6)$$

где τ_{\max} — максимальное сопротивление породы срезу (сдвигу) при гипотетически полностью закрывшихся под действием нормального давления трещинах и порах; σ_k — нормальное напряжение относительно начала координат, перенесенного в точку пересечения огибающей с осью абсцисс; a — параметр формы огибающей кривой.

Для оценки свойств и состояния Албынского месторождения, которое предполагается разрабатывать в дальнейшем подземным способом, для нижних горизонтов рассчитан ряд рейтинговых показателей руды и вмещающих пород на основании анализа фотографий керна скважин.

Показатель качества породы Q_1 определяется как отношение произведений качества породы и шероховатости трещин к произведению количества систем трещин и изменения (сцепления) трещин [23].

$$Q_1 = \frac{RQD \cdot J_r \cdot J_w}{J_n \cdot J_a \cdot SRF}, \quad (7)$$

где RQD — показатель качества породы; J_r — показатель шероховатости поверхности трещин; J_n — показатель количества систем трещин; J_a — показатель изменения (сцепления) трещин. Поскольку расчет произво-

дился на основе оценки керна скважин, J_w — показатель, учитывающий влияние воды в выработках, условно принят равным 1 с учетом данных по пределу прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии и разницы в процентном соотношении между величинами напряжений в условиях естественной влажности; SFR — фактор снижения напряжений на контуре выработок (ввиду отсутствия измерений в выработках условно принят равным 1). Для исследуемых руд и вмещающих пород окончательная величина RQD по всем скважинам усреднялась соответственно для руд и пород.

Рейтинг массива горных пород RMR устанавливался как сумма баллов от сложения таких показателей, как прочность породы на одноосное сжатие, качество массива по выходу керна, расстояние между трещинами, характеристика трещин (шероховатость, заполнитель, выветрелость и др.) [24].

$$RMR = JA_1 + JA_2 + JA_3 + JA_4 + JA_5, \quad (8)$$

где JA_1 — прочность породы на одноосное сжатие; JA_2 — качество массива по выходу керна; JA_3 — расстояние между трещинами; JA_4 — характеристика трещин; JA_5 — обводненность пород выработки. JA_5 — показатель обводненности выработки — условно принят с учетом данных по пределу прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии и разницы в процентном соотношении между величинами напряжений в условиях естественной влажности.

Геологический индекс прочности пород GSI рассчитывается по известному соотношению Э. Хука [25–27]:

$$GSI = 1,5(JA_4 + RQD / 2). \quad (9)$$

В целом при расчете рейтингов величины показателя предела прочности определялись по суммам сред-

них значений для руд и пород. В связи с этим полученные величины рейтингов оценки состояния массива пород можно рассматривать только в первом приближении.

Результаты исследований

Для лабораторных исследований было представлено 35 проб (кернов) горных пород, отобранных при бурении геологоразведочных скважин на месторождении. Пробы представлены четырьмя видами пород: 1) сланцы — 8 образцов; 2) измененные сланцы — 7 образцов; 3) метабазиты — 6 образцов; 4) гидротермальные брекчии и породы с жильным кварцем — 14 образцов.

В табл. 2 и 3 приведены средние значения основных параметров, определенных в процессе испытаний образцов керна и последующих расчетов основных показателей.

Максимальная величина отношения средних пределов прочности у сланцев в естественном состоянии, а минимальная — у измененных сланцев в водонасыщенном состоянии.

В табл. 4 представлены результаты определения величин значений коэффициента хрупкости по отношению работы упругой деформации к полной. Жирным шрифтом в таблице выделены значения коэффициента, который равен или больше величины 0,85, — при этих значениях данная порода характеризуется максимальной хрупкостью, и, соответственно, склонна к разрушению в динамической форме.

Как видно из данных, представленных в табл. 3, величины коэффициента хрупкости, близкие или равные 1, полученные в результате определения величин показателя хрупкости данным способом, в 63 % измерений имеют высокие значения, при этом 42 % относятся к хрупким породам, а 21 % — к квазихрупким. Наиболее

Таблица 2

Значения прочностных свойств горных пород Албынского месторождения по данным испытаний образцов керна и расчетов
Strengths of Albyn rocks from core tests and calculations

Наименование пород	Предел прочности, МПа		$\sigma_{сж} / \sigma_p$	Паспорт прочности			
	при растяжении	при сжатии		Методика ГОСТ 21153.8–88		Методика ВНИМИ	
				Сцепление, с МПа	Угол внутреннего трения φ , гр	Сцепление, с МПа	Угол внутреннего трения φ , гр
Сланцы (в естественном состоянии)	0,96	25,15	26,198	3,227	64,5	10,1	41
Сланцы (в водонасыщенном состоянии)	1,25	16,85	13,48	2,611	58,4	5	39
Измененные сланцы (в водонасыщенном состоянии)	0,61	7,10	11,639	1,19	56	2	38
Метабазиты (в естественном состоянии)	2,73	38,30	14,029	5,816	59	11,4	39
Метабазиты (в водонасыщенном состоянии)	2,31	31,87	13,797	4,88	58,8	9,4	39
Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в естественном состоянии)	2,21	41,09	18,593	5,571	62,4	13,6	40
Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в водонасыщенном состоянии)	2,01	32,47	16,154	4,624	60,9	10,1	40

Таблица 3

Значения основных упругих свойств горных пород Албынского месторождения по данным испытаний образцов керна и расчетов
Main elastic properties of Albyn rocks from core tests and calculations

Наименование пород	Модуль Юнга E_m , ГПа	Коеф. Пуассона μ	Средний E_m , ГПа	Средний μ	Кoeffициент вариации, %	
					E_m	μ
Сланцы	16,12	0,19	19,17	0,17	22,5	16,6
	22,21	0,15				
Измененные сланцы	12,55	0,1	12,07	0,14	34,7	52,4
	15,99	0,23				
	7,66	0,1				

Окончание табл. 3

Наименование пород	Модуль Юнга E_m , ГПа	Коеф. Пуассона μ	Средний E_m , ГПа	Средний μ	Коэффициент вариации, %	
					E_m	μ
Метабазиты	19,6	0,11	18,97	0,11	5,9	13,5
	17,66	0,13				
	19,64	0,1				
Гидротермальные брекчии, метасоматиты	28,21	0,18	23,03	0,19	27,6	45,3
	23,88	0,1				
	12,27	0,23				
	19,22	0,19				
	21,22	0,18				
	26,29	0,15				
	18,25	0,33				
	20,84	0,1				
	33,01	0,36				
	14,78	0,24				
	29,78	0,1				
	28,57	0,13				

Таблица 4

Значения показателя хрупкости горных пород
Values of rock brittleness factor

№ п/п	Идентификатор образца	Максимальное напряжение, МПа	К
1 – 1. Сланцы (в естественном состоянии)			
1	ГМ-321 – 104 – 5	16,82	1,0
2	ГМ-321 – 104 – 24	33,49	0,5
1 – 2. Сланцы (в водонасыщенном состоянии)			
3	ГМ-321 – 104 – 7	16,85	0,48
4	ГМ-321 – 104 – 27	16,86	0,53
2 – 1. Измененные сланцы (в естественном состоянии)			
5	ГМ-321 – 104 – 1	4,84	0,53
2 – 2. Измененные сланцы (в водонасыщенном состоянии)			
6	ГМ-321 – 104 – 8	8,80	0,69
7	ГМ-321 – 104 – 25	5,40	0,47
3 – 1. Метабазиты (в естественном состоянии)			
8	ГМ-321 – 104 – 13	54,48	0,83
9	ГМ-321 – 104 – 20	22,12	1,0

Окончание табл. 3

№ п/п	Идентификатор образца	Максимальное напряжение, МПа	К
3–2. Метабазиты (в водонасыщенном состоянии)			
10	ГМ-321–104–14	26,65	0,9
11	ГМ-321–104–34	37,10	0,59
4–1. Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в естественном состоянии)			
12	ГМ-321–104–15	40,77	0,86
13	ГМ-321–104–16	52,90	1,0
14	ГМ-321–104–19	29,51	1,0
15	ГМ-321–104–23	35,43	0,85
16	ГМ-321–104–26	30,88	0,79
17	ГМ-321–104–31	32,89	0,59
18	ГМ-321–104–32	79,92	0,70
19	ГМ-321–104–33	26,42	0,47
4–2. Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в водонасыщенном состоянии)			
20	ГМ-321–104–17	29,50	0,33
21	ГМ-321–104–18	22,26	0,71
22	ГМ-321–104–22	27,82	0,84
23	ГМ-321–104–29	43,74	0,82
24	ГМ-321–104–30	39,04	0,73

Таблица 5

Расчетные величины показателя хрупкости
Calculated brittleness factors

Наименование пород	Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение, $\sigma_{рас}$, МПа	Коэффициент хрупкости, К
1–1. Сланцы (в естественном состоянии)	25,15	0,96	0,04
1–2. Сланцы (в водонасыщенном состоянии)	16,85	1,25	0,07
2–1. Измененные сланцы (в естественном состоянии)	–	–	–
2–2. Измененные сланцы (в водонасыщенном состоянии)	7,10	0,61	0,09

Окончание табл. 5

Наименование пород	Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение, $\sigma_{рас}$, МПа	Коэффициент хрупкости, К
3 – 1. Метабазиты (в естественном состоянии)	38,30	2,73	0,07
3 – 2. Метабазиты (в водонасыщенном состоянии)	31,87	2,31	0,07
4 – 1. Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в естественном состоянии)	41,09	2,21	0,05
4 – 2. Гидротермальные брекчии, метасоматиты (в водонасыщенном состоянии)	32,47	2,01	0,06

подвержены хрупкому разрушению оказались метабазиты, причем как в условиях естественной влажности, так и в водонасыщенном состоянии. Наиболее близкими значениями к ним обладают гидротермальные брекчии, метасоматиты.

Также значения коэффициента хрупкости рассчитывались по отношению модуля упругости к модулю спада. В табл. 5 представлены результаты расчетов значений коэффициента хрупкости, жирным шрифтом выделены значения $K \leq 0,05$.

Таблица 6

Рейтинговые показатели пород и руд Албынского месторождения
Albyn rock and ore ratings

Рейтинговые показатели	Статистические параметры		
	Количество значений в выборке	Среднее значение	Коэффициент вариации, %
<i>Вмещающие породы</i>			
<i>RQD</i>	33	73	52
<i>Q₁</i>	33	20	41
<i>RMR</i>	33	43	46
<i>GSI</i>	33	47	32
<i>Руда</i>			
<i>RQD</i>	33	34	49
<i>Q₁</i>	33	22	38
<i>RMR</i>	33	43	53
<i>GSI</i>	33	44	35

Данные, приведенные в табл. 5, показывают, что значения коэффициента хрупкости варьируются в диапазоне от 0,04 до 0,09. При этом значения от 0 до 0,05 однозначно определяют породы как хрупкие, которые являются потенциально удароопасными. Значения коэффициента от 0,06 до 0,1 определяют породы как квазихрупкие, которые являются склонными к разрушению в динамической форме. Таким образом, к потенциально удароопасным породам можно отнести сланцы и гидротермальные брекчии, метасоматиты в естественном состоянии.

По результатам изучения фотографий керна скважин БП-141 (№№ 141–1, 141–2, 141–3, 141–4, 141–100, 141–101, 141–102, 141–103, С-141–5, С-141–5А, С-141–6А, С-141–8, С-141–9, С-141–10), БП-177 (№№177–26, С-177–17, С-177–18, С-177–22, С-177–23, С-177–24), БП-221 (№№ 221–19, 221–20, 221–22, С-221–24, С-221–26, С-221–28), БП-259 (№№ 269–12, 269–13, 269–14, 269–15, 269–16, 269–17, 269–18) были рассчитаны величины рейтинговых показателей: Q_1 , RQD , RMR и GSI . Полученные значения рейтинговых показателей для месторождения приведены в табл. 6.

Средние значения вмещающих пород и руд ненамного отличаются (величина RQD у пород больше почти в два раза, чем у руд, Q_1 у руд больше на 2 единицы, чем у пород, RMR — равны, а GSI — у пород больше на 3 единицы). При этом в виду значительного разброса исходных величин параметров физико-механических свойств исследуемых пород и руд наблюдаются высокие значения коэффициента вариации.

Тем не менее, наличие высоких значений предела прочности на сжатие для отдельных образцов показы-

вает, что в массиве существуют зоны повышенных напряжений в интервалах с крепкими и хрупкими породами. Соответственно, при определенных геомеханических условиях разработки месторождения можно предположить, что данные породы потенциально могут перейти в опасное состояние, вплоть до разрушения в динамической форме на отдельных участках.

Для уточнения полученных данных необходимо проведение дальнейших исследований физико-механических свойств руд и пород месторождения.

Выводы

1. Детальные исследования физико-механических свойств горных пород Албынского месторождения показали, что объёмная плотность находится в пределах 2,381–3,267 г/см³ — у сланцев; 2,778–3,263 г/см³ — у метабазитов; 2,789–3,300 г/см³ — у гидротермальных брекчий и метасоматитов.

2. Все выделенные группы пород в среднем относятся к мягким породам, предел прочности на одноосное сжатие не превышает 25,2 МПа — у сланцев; 38,3 МПа — у метабазитов; 41,1 — у гидротермальных брекчий, метасоматитов. Тем не менее, испытания некоторых образцов показали максимальные значения предела прочности, значительно выше средних величин (54,5 МПа у метабазитов; 79,9 — у гидротермальных брекчий, метасоматитов).

3. Значения предела прочности на одноосное растяжение также невысокие, и не превышают 0,9 МПа у сланцев; 2,7 МПа у метабазитов; 2,21 МПа у гидротермальных брекчий, метасоматитов. Тем не менее, испытания некоторых образцов показали максимальные значения предела прочности, значительно ниже средних величин (0,5 МПа у сланцев; 0,6 — у гидротермальных брекчий, метасоматитов).

3. Построенные паспорта прочности горных пород позволили установить среднюю величину сцепления горных пород в естественном/водонасыщенном состоянии: 3,2 МПа/2,6 МПа — у сланцев; 5,8 МПа/4,9 МПа — у метабазитов; 5,6 МПа/4,6 МПа — у гидротермальных брекчий, метасоматитов. Угол внутреннего трения в естественном/водонасыщенном состоянии: 64,5/58,4 — у сланцев; 59 /58,8 — у метабазитов; 62,4 /60,9 — у гидротермальных брекчий, метасоматитов. Модуль Юнга

у всех групп пород не превышает 30 ГПа (ближе всех к этому значению у гидротермальных брекчий, метасоматитов), а значения коэффициента Пуассона находятся в пределах 0,1 — 0,23.

4. Результаты определения величин коэффициента хрупкости двумя методами, а также величины рейтинговых оценок исследуемых руд и пород, дают основание относить метабазиты Албынского месторождения к удароопасным, а гидротермальные брекчии, метасоматиты — к склонным к разрушению в динамической форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Куранов А. Д., Багаутдинов И. И., Котиков Д. А., Зуев Б. Ю. Комплексный подход к прогнозу устойчивости предохранительного целика при слоевой системе разработки запасов Яковлевского месторождения // Горный журнал. — 2020. — №1. — С. 115 — 119. DOI 10.17580/gzh.2020.01.23.
2. Rasskazov M. I., Potapchuk M. I., Kursakin G. A., Tsoi D. I. Geomechanical justification of security measures in the development of the South-Khingyan deposit of manganese ore. // E3S Web of Conferences, 2018, Vol 56, 02014. DOI 10.1051/e3sconf/20185602014.
3. Justo J., Castro J. Mechanical properties of 4 rocks at different temperatures and fracture assessment using the strain energy density criterion // Geomechanics for energy and the environment, 2021, Vol. 25, 100212. DOI 10.1016/j.gete.2020.100212.
4. Марчевская В. В., Мухина Т. Н. Физико-механические характеристики малосульфидных руд Кольского полуострова // Обогащение руд. — 2014. — №6 (354). — С. 56 — 60.
5. Рассказов М. И., Потапчук М. И., Цой Д. И., Терешкин А. А., Гладырь А. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен // Проблемы недропользования. — 2020. — № 2 (25). — С. 116 — 126.
6. Niya S., Rezaei M., Selvadurai A. P. S. Modeling the Approach of Non-mated Rock Fracture Surfaces Under Quasi-static Normal Load Cycles // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. DOI 10.1007/s00603-020-02349-z.
7. Чебан А. Ю. Технология разработки крутопадающих рудных тел с применением дистанционно управляемого горного оборудования // Маркшейдерский вестник. — 2019. — №2. — С. 56 — 60.
8. Потапчук М. И., Терешкин А. А., Рассказов М. И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке сложноструктурных рудных тел системой подэтажных штреков с управляемым обрушением кровли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. — № 12. — С. 39 — 45.
9. Пересторонин А. Е., Степанов В. А. Золоторудное месторождение Албын Приамурской провинции // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. — № 4. — С. 22 — 29.
10. Моисеенко В. Г., Эйриш Л. В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток. Дальнаука. 1996. — С. 352 с.

11. *Крюков В. Г.* Металлогенические особенности Нижнего Приамурья / Современные проблемы регионального развития: материалы IV международ. науч. конф. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН. 2012. — С. 68–69.
12. *Неронский Г. И.* Типоморфизм золота месторождений Приамурья. Благовещенск. АмурНЦ. 1998. — С. 320 с.
13. *Юшманов Ю. П.* Структурно-тектонические закономерности размещения золота в Пильда-Лимурийском рудном районе нижнего Приамурья // Тихоокеанская геология. 2014. — № 4. — Т. 33. — С. 99 — 109.
14. *Малышев А. А., Лазарев А. Б.* Роль тектонических дислокаций в формировании Албынского рудного поля // Разведка и охрана недр. 2003. — № 11. — С. 29–34.
15. *Серебрянская Т. С., Ожогоина Е. Г., Ковалевский Э. И.* Особенности гидротермально-метасоматических образований и химического состава золота Харгинского рудного поля // Разведка и охрана недр. 2010. — № 8. — С. 9–14.
16. *Лаврик А. В., Литвинова Н. М., Лаврик Н. А., Рассказова А. В.* О комплексном подходе к выявлению благороднометаллической минерализации / Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения). 2019. — С. 49–51.
17. ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 1998. — С. 109.
18. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — С. 10.
19. *Прохоров К. В., Гладырь А. В., Рассказов М. И.* Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» // Горная промышленность. — 2020. — №4. — С.120 — 126.
20. *Feng Zh, Chen X, Fu Yu.* Acoustic Emission Characteristics and Joint Nonlinear Mechanical Response of Rock Masses under Uniaxial Compression // *Energies*, 2021, Vol. 14 (1), 200. DOI 10.3390/en14010200.
21. ГОСТ 21153.3–85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — С. 11.
22. ГОСТ 21153.8–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — С 17.
23. *Barton N. and Grimstad E.* The Q-system following thirty years of development and application in tunneling projects // Proc. ISRM Symp. EUROCK, 2004, pp 15–18.
24. *Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S.* Quantification of the Geological Strength Index chart, 2013, pp 13–672.
25. *Bieniawski Z. T.* Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, Civil, and Petroleum Engineering // John Wiley & Sons, 1989, pp 251.
26. *Hoek E., Marinos P., Benissi M.* Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation, 1998, pp. 151–160.
27. *Hoek E.* Rock Mass Properties for Underground Mines. Underground Mining Methods: engineering fundamentals and international case studies // edited by *William A. Hustrulid and Richard L. Bullock*, 2001, pp.467–474. [ГИАБ](#)

REFERENCES

1. *Kuranov AD, Bagautdinov II, Kotikov DA, Zuev B. Yu.* An integrated approach to predicting the stability of a safety pillar in a layered system of developing reserves of the Yakovlevskoye field. *Gornyi Zhurnal*. 2020. no. 1. pp. 115–119. DOI 10.17580 / gzh.2020.01.23. [In Russ]

2. Rasskazov M. I., Potapchuk M. I., Kursakin G. A., Tsoi D. I. Geomechanical justification of security measures in the development of the South-Khingyan deposit of manganese ore. *E3S Web of Conferences*, 2018, Vol 56, 02014. DOI 10.1051/e3sconf/20185602014.
3. Justo J., Castro J. Mechanical properties of 4 rocks at different temperatures and fracture assessment using the strain energy density criterion. *Geomechanics for energy and the environment*, 2021, Vol. 25, 100212. DOI 10.1016/j.gete.2020.100212.
4. Marcheyskaya V. V., Mukhina T. N. Physical and mechanical characteristics of low-sulfide ores of the Kola Peninsula. *Obogashchenie rud*. 2014. no. 6 (354). pp. 56–60. [In Russ]
5. Rasskazov M. I., Potapchuk M. I., Tsoi D. I., Tereshkin A. A., Gladyr A. V. Study of mining and geological features and determination of physical and mechanical properties of rocks of the Delken gold deposit. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2020. no. 2 (25). pp. 116–126. [In Russ]
6. Niya S., Rezaei M., Selvadurai A. P. S. Modeling the Approach of Non-mated Rock Fracture Surfaces Under Quasi-static Normal Load Cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021. DOI 10.1007/s00603–020–02349-z.
7. Cheban A. Yu. Technology for the development of steeply dipping ore bodies with the use of remotely controlled mining equipment. *Markshejderskij vestnik*. 2019. no. 2. pp. 56–60. [In Russ]
8. Potapchuk M. I., Tereshkin A. A., Rasskazov M. I. Assessment of the geomechanical state of the rock mass during the development of complex ore bodies by a system of sublevel drifts with controlled roof collapse. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. 12. pp. 39–45. [In Russ]
9. Perestoronin A. E., Stepanov V. A. Albyn gold ore deposit in the Amur province. News of higher educational institutions. *Geologiya i razvedka*. 2015. no. 4. pp. 22–29. [In Russ]
10. Moiseenko V. G., Airish L. V. *Gold deposits of the East of Russia* [Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Rossii]. Vladivostok. Dalnauka. 1996. 352 p. [In Russ]
11. Kryukov V. G. *Metallogenicheskie osobennosti Nizhnego Priamur'ya* [Metallogenic features of the Lower Amur region]. Modern problems of regional development: materials of the IV international. scientific. conf. Birobidzhan: ICARP FEB RAS. 2012. pp. 68–69. [In Russ]
12. Neronsky G. I. *Tipomorfizm zolota mestorozhdenij Priamur'ya* [Typomorphism of gold deposits in the Amur region]. Blagoveshchensk. AmurSC. 1998. 320 p. [In Russ]
13. Yushmanov Yu. P. Structural and tectonic patterns of gold placement in the Pilda-Limuriy ore region of the lower Amur region. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2014. no. 4. T. 33. pp. 99–109. [In Russ]
14. Malyshev A. A., Lazarev A. B. The role of tectonic dislocations in the formation of the Albynsk ore field. *Razvedka i ohrana nedr*. 2003. no. 11. pp. 29–34. [In Russ]
15. Serebryanskaya T. S., Ozhogina E. G., Kovalevsky E. I. Features of hydrothermal-metasomatic formations and the chemical composition of gold in the Kharginsky ore field. *Razvedka i ohrana nedr*. 2010. no. 8. pp. 9–14. [In Russ]
16. Lavrik A. V., Litvinova N. M., Lavrik N. A., Rasskazova A. V. *O kompleksnom podhode k vyavleniyu blagorodnomenal'noj mineralizacii* [On an integrated approach to identifying noble metal mineralization] Problems and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (Plaksin readings). 2019. pp. 49–51. [In Russ]
17. *GOST 8269.0-97*. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Physical and mechanical test methods. Moscow: FGUP “Standartinform”, 1998. P. 109. [In Russ]
18. *GOST 21153.2-84*. Mountain rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial compression. Moscow: Publishing house of standards, 1984. P. 10. [In Russ]
19. Prokhorov K. V., Gladyr A. V., Rasskazov M. I. Center for Shared Use “Center for Research of Mineral Raw Materials”. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij*. 2020. no. 4. pp. 120–126. [In Russ]

20. Feng Zh, Chen X., Fu Yu. Acoustic Emission Characteristics and Joint Nonlinear Mechanical Response of Rock Masses under Uniaxial Compression. *Energies*, 2021, Vol. 14 (1), 200. DOI 10.3390/en14010200.

21. *GOST 21153.3-85*. Mountain rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial tension. Moscow: Publishing house of standards, 1985. P. 11. [In Russ]

22. *GOST 21153.8-88*. Mountain rocks. Method for determining the ultimate strength in volumetric compression. Moscow: Publishing house of standards, 1988. P. 17. [In Russ]

23. Barton N. and Grimstad E. The Q-system following thirty years of development and application in tunneling projects. Proc. ISRM Symp. EUROCK, 2004, pp 15–18.

24. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index chart, 2013, pp 13–672.

25. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, 1989, pp 251.

26. Hoek E., Marinos P., Benissi M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation, 1998, pp. 151–160.

27. Hoek E. Rock Mass Properties for Underground Mines. *Underground Mining Methods: engineering fundamentals and international case studies*. edited by William A. Hustrulid and Richard L. Bullock, 2001, pp. 467–474.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Рассказов Максим Игоревич*¹ — научный сотрудник лаборатории горной геофизики, rasm.max@mail.ru;

*Цой Денис Игоревич*¹ — научный сотрудник лаборатории геомеханики;

*Крюков Виктор Глебович*¹ — канд. геол-минерал. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рационального освоения недр;

*Потапчук Марина Игоревна*¹ — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых методов исследования природно-технических систем;

*Федотова Юлия Викторовна*¹ — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых методов исследования природно-технических систем;

¹ Институт горного дела — обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Rasskazov M. I.*¹, Researcher, Mining Geophysics Laboratory;

*Tsoi D. I.*¹, Researcher, Geomechanics Laboratory;

*Kryukov V. G.*¹, Leading Researcher, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Efficient Subsoil Use Laboratory;

*Potapchuk M. I.*¹, Leading Researcher, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory for Digital Research Methods for Nature and Technology Systems;

*Fedotova Yu. V.*¹, Leading Researcher, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory for Digital Research Methods for Nature and Technology Systems;

¹ The Institute of Mining is a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 24.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 24.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.