

6. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 33-46.
7. Барях А.А., Тенисон Л.О. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей // Горный журнал. – 2021 – № 4. – С. 57-63. – DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08.
8. Указания по защите рудников от затопления в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей / ВНИИГ. – Л.: АгроХим, 1990.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2025.3.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД КОРБАЛИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИ ОБЪЕМНОМ СЖАТИИ

В.С. Кузьминых, И.Ф. Замараев  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

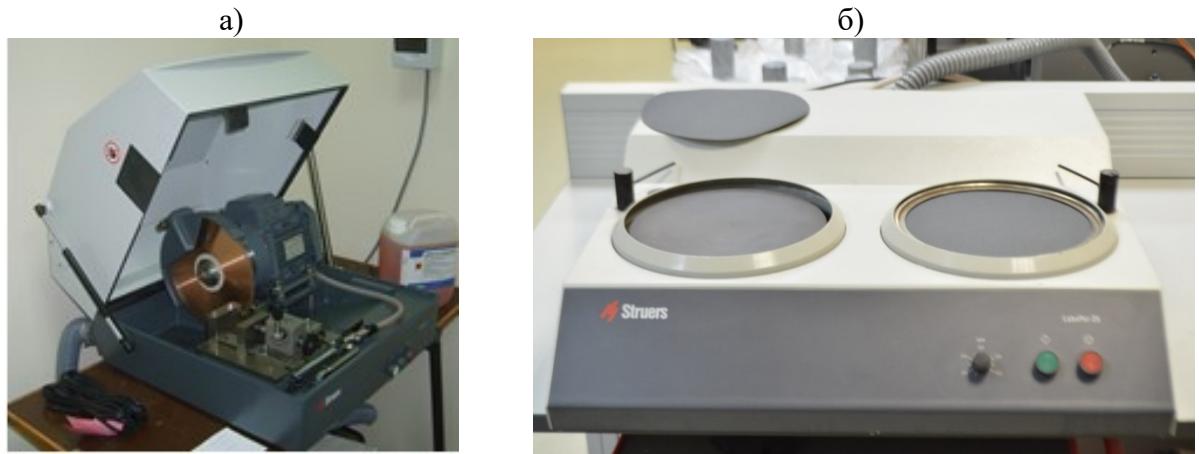
**Аннотация:** Работа посвящена исследованиям, направленным на определение прочностных свойств горных пород Корбалихинского месторождения полиметаллических руд. Эксперименты осуществлялись на испытательной установке Toninorm-5 при фиксированных уровнях бокового давления 5,0 и 15,0 МПа.

**Ключевые слова:** литотип, объемное сжатие, прочностные свойства, паспорт прочности.

Корбалихинское полиметаллическое месторождение находится в южной части Алтайского края и является одним из самых крупных месторождений цинка в России. Полезные ископаемые располагаются на глубине до 1300 метров и по оценочным данным их объем может достигать 24 млн. тонн руды с повышенным содержанием цинка и меди, а также золота и серебра. Освоение запасов ведется с помощью слоевой системы отработки. Данная технология имеет ряд недостатков: низкая производительность, высокая себестоимость добычи, а также большой объем подготовительных работ [1]. Для перехода на новый камерный способ отработки необходима информация о прочностных характеристиках основных типов пород при объемном нагружении, соответствующем условиям нахождения пород в массиве. С целью параметрического обеспечения геомеханических расчетов ведения горных работ были проведены исследования в условиях трехосного сжатия шести литотипов горных пород: туф, лава, алевролит, медно-колчеданная руда, колчеданно-полиметаллическая руда и туфопесчанник.

Для проведения исследований из кернового материала диаметром  $47,0 \pm 1,0$  и  $36,0 \pm 1,0$  мм были изготовлены образцы с соотношением высоты к диаметру, равным 2. Пробоподготовка выполнялась на отрезной машине Labotom-3 (производитель Struers) (рис. 1а). Обработка торцов образцов выполнялась на шлифовально-полировальном станке LaboPol-25 (производитель Struers) (рис. 1б) в соответствии с необходимыми требованиями и рекомендациями [2]. Всего было подготовлено 88 проб.

Эксперименты по определению механических свойств породных литотипов проходили на универсальной испытательной сервогидравлической системе Toninorm-5 (TN2041/5000) (рис. 3а), которая состоит из нагружающей рамы (максимальное осевое усилие – 5000 кН) и ячейки (камеры) объемного сжатия (максимальное давление – 40 МПа). В состав установки входит адаптивное программное обеспечение Test Expert II, которое позволяет задавать необходимые режимы и параметры нагружения, а также контролировать ход эксперимента на всех его этапах.

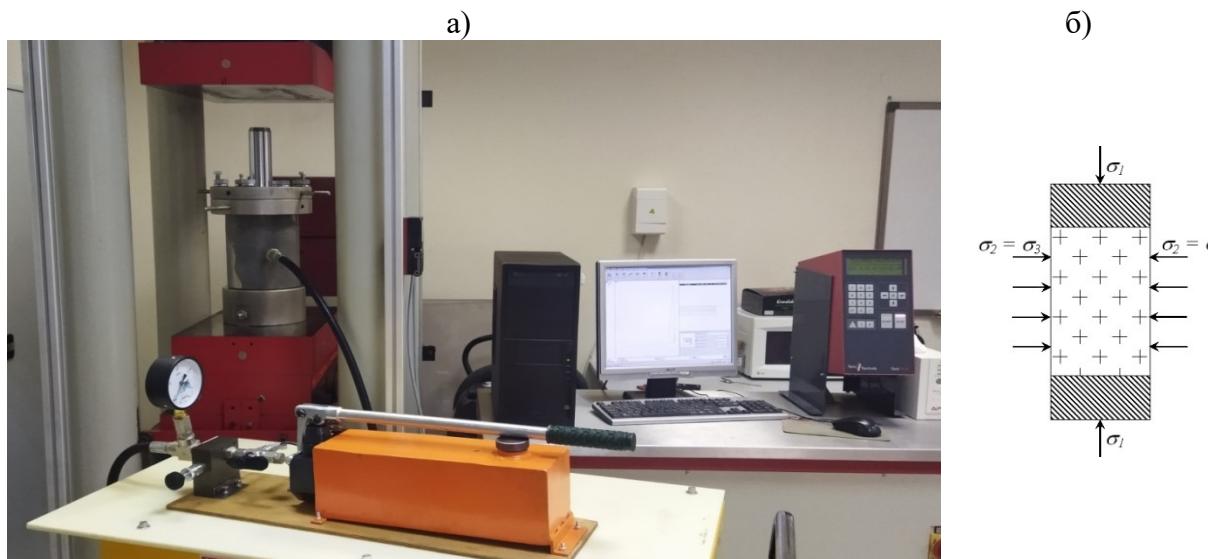


**Рис. 1.** Оборудования для изготовления и подготовки проб:  
а – отрезная машина Labotom-3; б – шлифовально-полировальный станок LaboPol-25

Пример изготовленных образцов для проведения испытаний при трехосном сжатии приведен на рис. 2.



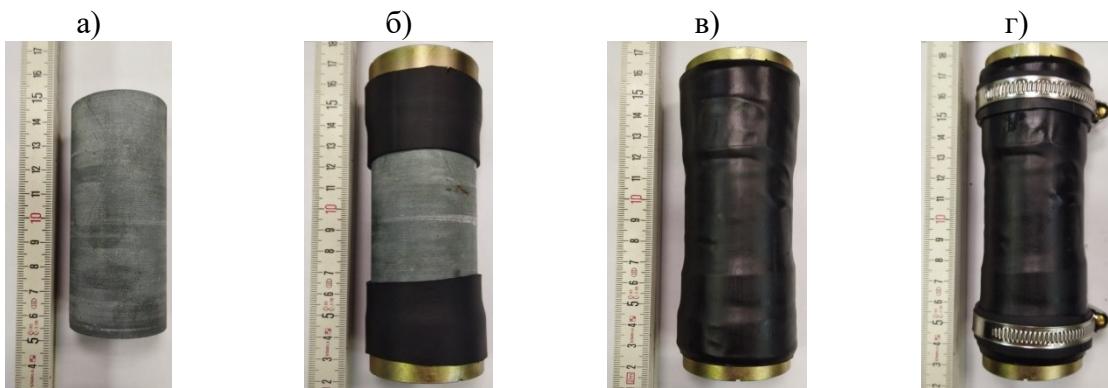
**Рис. 2.** Вид изготовленных образцов:  
а – туф; б – лава; в – алевролит; г – медно-колчеданная руда;  
д – колчеданно-полиметалическая руда; е – туфопесчанник



**Рис. 3.** Испытательная система и схема нагружения при трехосном сжатии:  
а – установка Toninorm-5 с установленной камерой; б – схема Кармана при объемном нагружении

Испытания на трехосное сжатие проводились при заданном боковом давлении по схеме Кармана ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3 \geq 0$ ) (рис. 3б), согласно ГОСТ [3] и ISRM [4] на образцах с соотношением высоты к ширине  $h/d = 2,0$ .

С целью исключения прямого контакта рабочей жидкости (силиконовое масло) с образцом перед проведением эксперимента уделялась особое внимание его герметизации. Процедура обеспечения герметичности образца представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Последовательность подготовки образца к испытаниям при объемном сжатии:

- а – подготовленный литотип;
- б – фиксация специальных металлических оправок на торцах образца;
- в – герметизация термоусадочной трубкой;
- г – дополнительное уплотнение термоусадочной трубы стягивающими хомутами

Процесс испытания подготовленного образца начинался с его размещения в камере, предназначенной для создания объемного сжатия. Затем образец подвергался всестороннему гидростатическому давлению рабочей жидкостью до заданного фиксированного значения. После этого производилось вертикальное нагружение  $\sigma_1$  образца с постоянной скоростью деформирования 0,2 мм/мин. Боковое давление ( $\sigma_6 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) поддерживалось на фиксированных уровнях, составляющих 5 или 15 МПа.

На протяжении всего опыта велась автоматическая регистрация основных параметров испытания: осевого усилия и продольной деформации. Эксперимент проводился до разрушения образца (рис. 5), соответствующего переходу диаграммы на запредельную стадию деформирования.



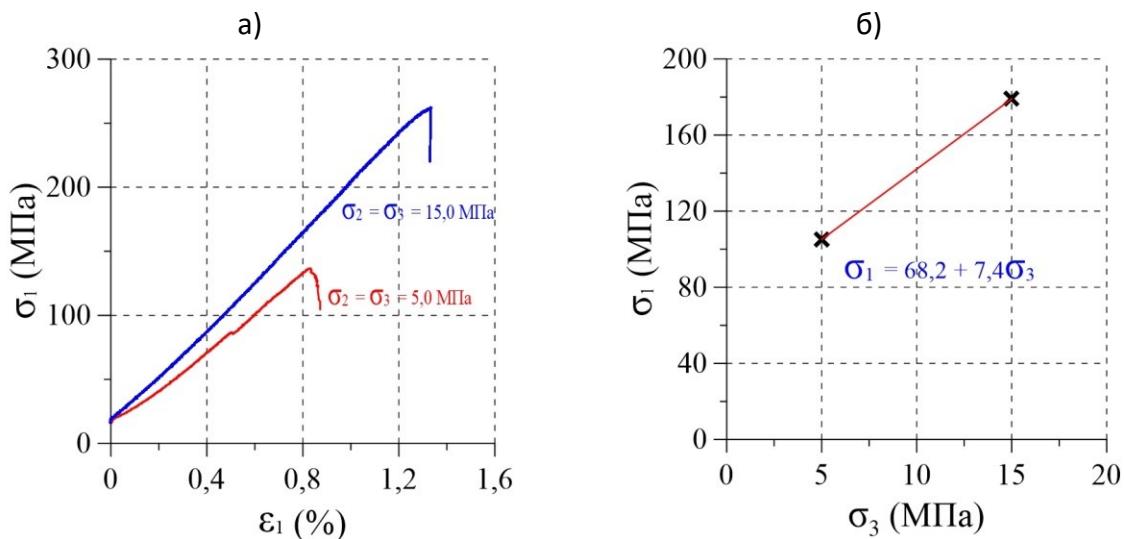
**Рис. 5.** Характерный вид разрушенного образца

По результатам испытания строились полные диаграммы деформирования, пример которых для различных боковых давлений приведен на рис. 6а.

По полученным диаграммам деформирования определялись пределы прочности ( $\sigma_1^{np}$ ) горной породы при заданном боковом давлении, используемые для построения линейной критериальной зависимости (рис. 6б), описываемой уравнением:

$$\sigma_1^{np} = A + B \cdot \sigma_3 \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – параметры зависимости.

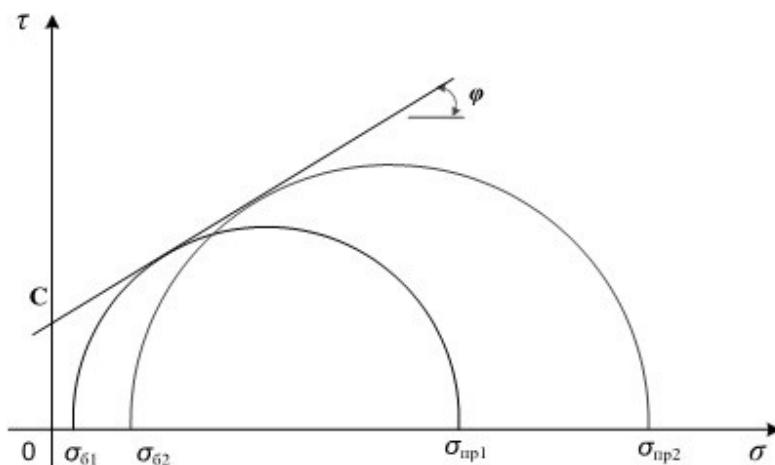


**Рис. 6.** Результаты эксперимента:  
а – диаграммы деформирования при трехосном сжатии;  
б – зависимость изменения предела прочности горной породы от величины бокового давления

Параметры паспорта прочности Кулона-Мора – сцепления ( $C$ ) и угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) – определялись согласно стандарту [4] по формулам:

$$\varphi = \arcsin \frac{B-1}{B+1} \quad (2)$$

$$C = \frac{A}{B-1} \cdot \operatorname{tg}(\arcsin \frac{B-1}{B+1}) \quad (3)$$



**Рис. 7.** Схема построения линейного паспорта Кулона-Мора  
по результатам экспериментов на объемное сжатие

Обобщенные данные по определению прочностных показателей исследуемых литотипов горных пород приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
Результаты определения пределов прочности при объемном сжатии  
и параметров паспорта прочности горных пород

№ п/п	Литотип	Испытано образцов, шт.	Боковое дав- ление $\sigma_2 = \sigma_3$ , МПа	Предел прочности $\sigma_1^{\text{пр.}}$ , МПа	Сцепление C, МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , °
1	Туф	8	5,0	159,5	27,4	44,5
		8	15,0	217,0		
2	Лава	4	5,0	105,2	12,5	49,6
		3	15,0	179,1		
3	Алевролит	10	5,0	205,7	57,2	28,3
		10	15,0	234,2		
4	Медно-колчеданная руда	8	5,0	109,2	14,0	48,6
		9	15,0	179,2		
5	Колчеданно- полиметаллическая руда	9	5,0	155,8	26,4	44,9
		7	15,0	213,4		
6	Туфопесчаник	5	5,0	94,5	13,6	44,9
		7	15,0	152,5		

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить параметры паспорта прочности горных пород 88 проб, испытанных в условиях объемного сжатия. Выявлен интервал изменения предела прочности образцов, составляющий  $94,5 \div 205,7$  МПа ( $\sigma_b = 5$  МПа) и  $152,5 \div 234,2$  МПа ( $\sigma_b = 15$  МПа). Размер величины сцепления составляет от 12,5 до 57,2 МПа. Угол внутреннего трения находится в интервале от 28,3 до 49,6 град.

Дальнейшие исследования в рамках данной тематики планируется направить на изучение деформационных и упругих свойств горных пород Корбалихинского месторождения полиметаллических руд.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки  
и высшего образования РФ в рамках государственного задания  
(рег. номер НИОКР: 124020500031-4).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Савич И.Н., Лилярь-Лаптев А.А., Яковлев А.М., Сыренов М.О., Карасев Г.А. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки с закладкой на Корбалихинском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № S25. – С. 3-14. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-25-3-14.
- ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.
- ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с.
- ISRM: Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1983. – V. 20, № 6. – P. 285-290. – DOI: 10.1016/0148-9062(83)90598-3.