ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):61-73
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831:622.271 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_61

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЛИТОТИПОВ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

К.А. Тур[1], С.П. Бахаева[1]

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия, e-mail: kirill.turik@mail.ru

Аннотация: Достоверность геомеханических расчетов зависит от надежности определения прочностных характеристик горных пород. Цель исследования – оценить возможность объединения биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов в единый расчетный грунтовый элемент по пределу прочности при одноосном сжатии. Исходная выборка включала 146 результатов лабораторных испытаний на одноосное сжатие: 78 для биотитовых и 68 для амфибол-биотитовых гнейсов. Обработка выполнена по стандартизованному алгоритму с использованием разработанного авторами программного обеспечения и включала оценку зависимости показателя от глубины, выявление резко отклоняющихся значений, проверку на нормальный закон распределения, вычисление нормативных и расчетных значений, сопоставление средних и дисперсий. Статистически значимая линейная связь прочности пород с глубиной не установлена; резко отклоняющиеся значения не выявлены; гипотеза о нормальном законе распределения не отвергнута для обоих литотипов. Нормативные значения для амфибол-биотитовых и биотитовых гнейсов составили 129 МПа, расчетные – 120 МПа. Оценкой по критериям Фишера и Стьюдента не выявлены статистически значимые различия между выборками анализируемых литотипов пород. Результаты исследований показали правомерность объединения рассмотренных литотипов в единый расчетный элемент в пределах анализируемого месторождения железистых кварцитов. Для объединенной выборки нормативное и расчетное значения составили соответственно 129 и 123 МПа.

Ключевые слова: предел прочности при одноосном сжатии, вмещающие породы, биотитовый гнейс, амфибол-биотитовый гнейс, статистическая однородность, нормативное значение, расчетное значение, расчетный грунтовый элемент, объединение выборок, инженерно-геологические данные.

Для цитирования: *Тур К. А., Бахаева С. П.* Статистическое обоснование объединения литотипов вмещающих пород по прочности при одноосном сжатии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 61–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_61.

Statistical justification for combining host-rock lithotypes by uniaxial compressive strength

K.A. Tur[1], S.P. Bakhaeva[1]

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia, e-mail: kirill.turik@mail.ru

© К.А. Тур, С.П. Бахаева. 2026.

Abstract: The reliability of geomechanical calculations depends on the accuracy with which the strength characteristics of rocks are determined. The aim of this study was to assess the feasibility of combining biotite and amphibole-biotite gneisses into a single design geotechnical element based on uniaxial compressive strength. The initial dataset comprised 146 results of laboratory uniaxial compression tests: 78 for biotite gneisses and 68 for amphibole-biotite gneisses. The data were processed using a standardized algorithm implemented in software developed by the authors. The analysis included assessing the relationship between the parameter and sampling depth, identifying outliers, testing for normality, calculating standard and design values, and comparing sample means and variances. No statistically significant linear relationship was found between rock strength and sampling depth; no outliers were identified; and the hypothesis of a normal distribution was not rejected for either lithotype. The characteristic values for amphibole-biotite and biotite gneisses were 129 MPa, and the design values were 120 MPa. Fisher's and Student's tests revealed no statistically significant differences between the samples of the analyzed rock lithotypes. The results supported the validity of combining the considered lithotypes into a single design geotechnical element within the analyzed ferruginous quartzite deposit. For the combined sample, the characteristic and design values were 129 and 123 MPa, respectively.

Key words: uniaxial compressive strength, host rocks, biotite gneiss, amphibole-biotite gneiss, statistical homogeneity, standard value, design value, design geotechnical element, sample pooling, engineering geological data.

For citation: Tur K. A., Bakhaeva S. P. Statistical justification for combining host-rock lithotypes by uniaxial compressive strength. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1):61-73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_61.

Введение

Достоверность геомеханических расчетов в значительной степени определяется качеством исходных данных о физико-механических свойствах горных пород. Даже современные методы моделирования не обеспечивают надежного результата, если исходные данные не отражают природную изменчивость породного массива [1, 2]. Прочностные характеристики зависят от минерального состава, структуры, текстуры, степени выветрелости, трещиноватости и других неоднородностей горных пород [3, 4]. Поэтому оценка расчетных значений физико-механических свойств каждого литотипа требует анализа представительной совокупности экспериментальных данных.

В процессе длительной эксплуатации месторождений накапливаются значительные объемы результатов лабораторных испытаний, полученных различными организациями в разные периоды инженерно-геологического изучения. Повторное использование таких данных позволяет повысить обоснованность принимаемых проектных решений и сократить объем дополнительных исследований. Вместе с тем совместная обработка архивных результатов осложняется различиями в структуре и полноте исходных материалов, условных обозначениях пород и отсутствием сведений о местах отбора проб. Некорректное формирование выборок без учета литологической принадлежности и пространственной изменчивости показателя может привести к искажению расчетных значений характеристик горных пород [5—7].

Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасно-

сти «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» предусматривается необходимость инженерно-геологического изучения и районирования породного массива на различных стадиях освоения месторождения. Методы и критерии статистической обработки результатов испытаний, определения нормативных и расчетных значений характеристик, а также возможность объединения инженерно-геологических элементов (ИГЭ) в расчетный грунтовый элемент (РГЭ) установлены ГОСТ 20522-2012. При значительном объеме данных предусмотренная стандартом последовательность расчетов трудоемка и чувствительна к ошибкам ручного переноса данных и повторного пересчета.

Для автоматизации статистической обработки авторами разработана программа для ЭВМ «GOST 20522» [8], в которой реализованы формирование выборок, вычисление статистических характеристик, выявление резко отклоняющихся значений и оценка возможности объединения выборок. Автоматизация обеспечивает воспроизводимую последовательность операций и снижает вероятность вычислительных ошибок.

Предложенный подход апробирован на материалах инженерно-геологического изучения месторождения железистых кварцитов. Накопленный массив включал более двух тысяч определений физических, прочностных и деформационных характеристик пород. В статье рассмотрена процедура определения нормативных и расчетных значений предела прочности при одноосном сжатии биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов, являющихся наиболее распространенными литотипами вмещающих пород анализируемого месторождения. Выбор данного показателя обусловлен его использованием в качестве одной из основных прочностных характеристик при выполнении геомеханических расчетов, а также наличием представительной совокупности результатов испытаний. На значение показателя влияют масштаб и форма образца, скорость нагружения, состояние породы и методика испытаний, что подтверждается современными отечественными исследованиями [5, 9—14] и обзором методов испытаний [15], а также работами, посвященными особенностям проведения испытаний и косвенным методам определения прочности [16, 17].

В зарубежных работах развиваются вероятностные методы и методы машинного обучения для оценки предела прочности, позволяющие учитывать неопределенность, пространственную изменчивость и ограниченность выборок [6, 7, 18—21]. Вместе с тем вопрос статистического обоснования объединения близких литотипов на основе накопленных архивных результатов испытаний остается недостаточно формализованным. Научная новизна настоящей работы состоит в применении регламентированной статистической процедуры к значительному массиву архивных данных для обоснования возможности объединения близких литотипов в единый расчетный грунтовый элемент.

Цель исследования — статистически обосновать возможность объединения биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов в единый расчетный грунтовый элемент по пределу прочности при одноосном сжатии.

Объект и исходные данные

Исследование выполнялось на материалах инженерно-геологического изучения месторождения железистых кварцитов, разрабатываемого с 1955 г. Глубина карьера около 400 м. Вмещающие породы представлены преимущественно метаморфическими образованиями, среди которых наиболее распростране-

Таблица 1

Объемы испытаний по определению предела прочности при одноосном сжатии
Volumes of uniaxial compressive strength tests

Этап	Организация	Годы испытаний	Источник отбора проб	Биотитовые гнейсы, шт.	Амфибол-биотитовые гнейсы, шт.
1	Палесмозерская ГРП	1964–1966	керн скважин	21	9
2	ИГД МЧМ СССР	1988–1989	керн скважин	46	54
3	ИГД СО РАН	2023	обнажения откоса	3	5
4	ИГД СО РАН	2024	керн скважин	8	—
Всего				78	68

ны биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы. Кроме метаморфических пород, в пределах месторождения развиты жильные образования, представленные гранит-порфиритами, гранит-пегматитами, габбро и долеритами.

Согласно геологической документации, биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы составляют около 90% общего объема вмещающих пород. Значительная распространенность данных литотипов, а также наличие представительных выборок результатов лабораторных испытаний обусловили их выбор в качестве объекта статистического анализа.

Физико-механические свойства (ФМС) горных пород исследовались на протяжении нескольких этапов инженерно-геологического изучения и доизучения месторождения в процессе его эксплуатации. Первые систематические работы выполнены Палесмозерской геологоразведочной партией в 1964–1966 гг. В 1988–1989 гг. лабораторные исследования продолжены ИГД МЧМ СССР. Современный этап представлен исследованиями ИГД СО РАН: в 2023 г. испытаны образцы, отобранные из обнажений горных пород, в 2024 г. — образцы, изготовленные из керна инженерно-геологических скважин (табл. 1).

Всего в анализируемый массив включено 146 результатов определения предела прочности при одноосном сжатии, в том числе 78 определений для биотитовых и 68 — для амфибол-биотитовых гнейсов. Основную часть массива (130 определений, или 89% от общего количества испытаний) составили результаты исследований 1964–1966 и 1988–1989 гг. На современный этап исследований 2023–2024 гг. пришлось 16 определений, или 11%. Значительная продолжительность периода накопления исходных данных и различия в источниках отбора образцов обусловили необходимость их предварительной систематизации и унификации перед статистической обработкой.

Подготовка исходных данных и алгоритм их обработки

Результаты лабораторных испытаний сведены в единую электронную ведомость. Каждая строка сформированной базы данных соответствовала отдельному испытанию и содержала сведения об организации, дате проведения исследований, литотипе и значении предела прочности при одноосном сжатии. При наличии соответствующей информации фиксировались место отбора пробы, номер скважины или обнажения, глубина отбора и характер разрушения образца.

На этапе подготовки исходных данных унифицированы наименования литотипов и выполнена проверка на наличие повторяющихся записей, пропусков и явных ошибок ввода. Исходные значения приведены к Международной си-

стеме единиц (СИ): предел прочности выражен в мегапаскалях из соотношения 1 кгс/см^2 = 0,0980665 МПа.

Статистическая обработка сформированных выборок выполнялась с использованием программы «GOST 20522» [8] в соответствии с методами и критериями ГОСТ 20522-2012 (рис. 1).

Оценка зависимости предела прочности от глубины

На начальном этапе статистической обработки сформированных выборок оценивалось наличие изменения предела прочности при одноосном сжатии в зависимости от глубины отбора проб. Анализ выполнялся раздельно для амфибол-биотитовых и биотитовых гнейсов путем построения диаграмм рассеяния и линейных регрессионных зависимостей (рис. 2). Теснота линейной связи оценивалась коэффициентом корреляции Пирсона r и коэффициентом детерминации R^2 при уровне значимости α = 0,05.

Сведения о глубине отбора имелись для 10 из 68 результатов определения предела прочности амфибол-биотитовых гнейсов, что составило 14,7% исходной выборки, и для 36 из 78 результатов ис-

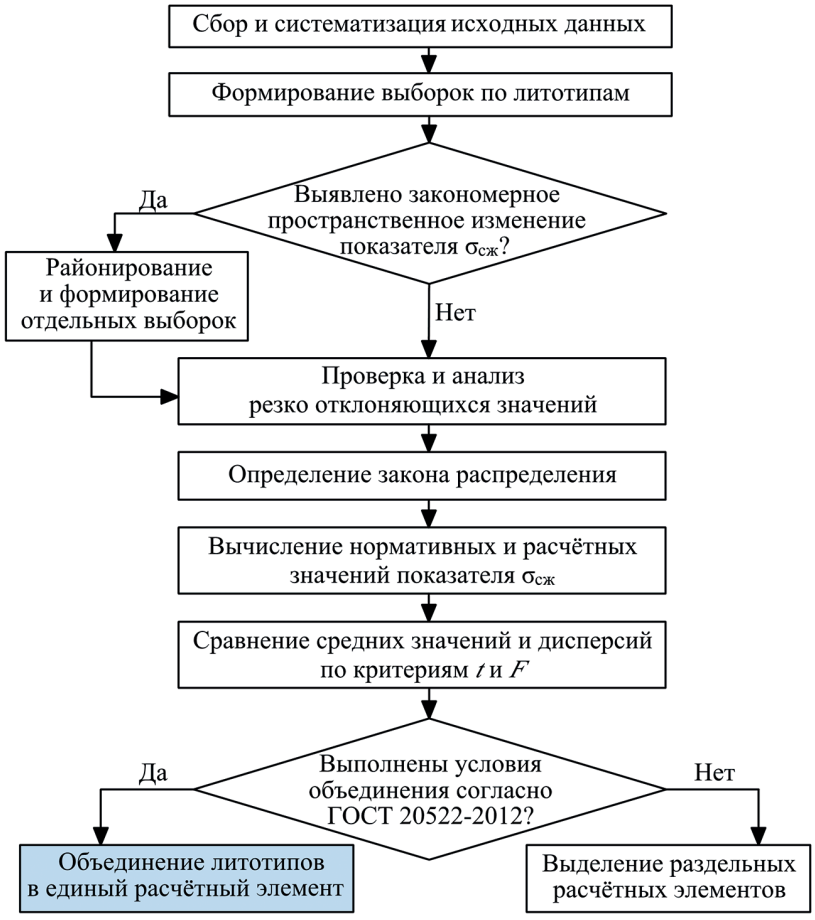


Рис. 1. Блок-схема подготовки и статистической обработки результатов определения предела прочности при одноосном сжатии

Fig. 1. Workflow for preparing and statistically processing uniaxial compressive strength data

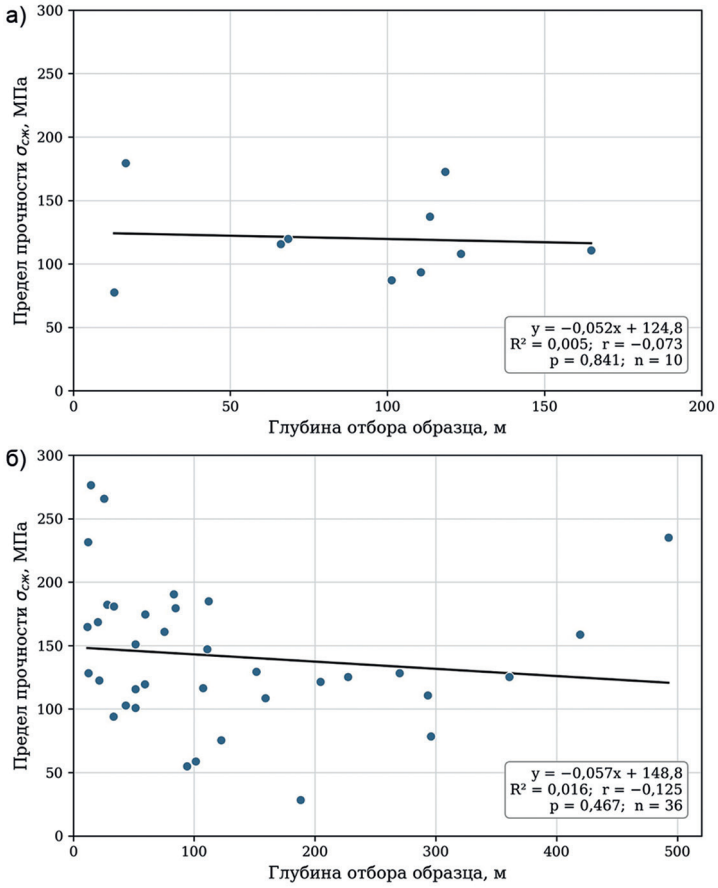


Рис. 2. Облако точек распределения пределов прочности при одноосном сжатии от глубины отбора проб: амфибол-биотитовых (а); биотитовых гнейсов (б)

Fig. 2. Scatter plots of uniaxial compressive strength versus sampling depth: amphibole-biotite gneisses (a); biotite gneisses (b)

пытаний биотитовых гнейсов — 46,2%. Остальные архивные результаты не содержали привязки проб по глубине, поэтому в корреляционном анализе не учитывались.

Для обеих выборок линейная связь между пределом прочности при одноосном сжатии и глубиной отбора статистически незначима: уровни значимости составили p = 0,841 для амфибол-биотитовых и p = 0,467 для биотитовых гнейсов.

Линейным изменением глубины объясняется приблизительно 0,5% изменчивости предела прочности амфибол-биотитовых и 1,6% изменчивости предела прочности биотитовых гнейсов, поэтому в пределах имеющихся данных разделение сформированных выборок по глубине не выполнялось.

Ограниченный объем результатов, имеющих привязку к глубине, особенно для амфибол-биотитовых гнейсов, не позволяет сделать вывод о полном отсутствии пространственных закономерностей. Сделанный вывод свидетельствует только о том, что для имеющейся совокупности данных статистически значимый линейный тренд изменения предела прочности с глубиной не установлен.

Выявление резко отклоняющихся значений

Для каждого литотипа выполнялась проверка результатов определения предела прочности при одноосном сжатии на наличие резко отклоняющихся значений по критерию Граббса при уровне значимости α = 0,05.

Для минимального и максимального значений вариационного ряда рассчитывалась статистика по формуле

$$G_i = \frac{\left|X_i - \bar{X}\right|}{S}, \qquad (1)$$

где X_i — проверяемое значение предела прочности, МПа; $\bar{X}$ — среднее арифметическое значение показателя; S — среднеквадратическое отклонение.

Проверяемое значение исключалось из выборки при выполнении условия

$$G_i > G_{кр}. \qquad (2)$$

Поскольку объемы исходных выборок превышали 50 определений, критическое значение рассчитывалось через соответствующий квантиль распределения Стьюдента по формуле

$$G_{кр} = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t^2_{\alpha/(2n),n-2}}{n-2+t^2_{\alpha/(2n),n-2}}}. \qquad (3)$$

где n — число определений; $t_{\alpha/(2n),n-2}$ — критическое значение распределения Стьюдента при числе степеней свободы $n-2$.

Проверка выполнялась циклично: после исключения каждого резко отклоняющегося значения среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение и критическое значение критерия рассчитывалось повторно. Процедура анализа завершалась, когда минимальное и максимальное значения удовлетворяли условию $G_i \leqslant G_{кр}$.

При проверке сформированных выборок резко отклоняющиеся значения не выявлены. Для амфибол-биотитовых гнейсов расчетные значения критерия Граббса для минимального и максимального результатов составили соответственно 2,567 и 2,667 при критическом — 3,247. Для биотитовых гнейсов соответствующие значения составили 1,941 и 2,828 при критическом — 3,297. Во всех случаях расчетные значения критерия не превысили критических, поэтому все результаты испытаний приняты для последующей обработки: 68 определений для амфибол-биотитовых гнейсов и 78 — для биотитовых гнейсов.

Проверка закона распределения результатов испытаний

После проверки по критерию Граббса сформированные выборки результатов определения предела прочности при одноосном сжатии проверялись на соответствие теоретическому закону распределения.

Для каждой выборки строилась гистограмма эмпирического распределения (число интервалов определялось по формуле Стерджесса). По форме полученных гистограмм выдвигалась гипотеза о соответствии распределения результатов испытаний нормальному закону. Сопоставление эмпирических и теоретических распределений приведено на рис. 3.

Проверка гипотезы проводилась при уровне значимости α = 0,05 с использованием критериев согласия Пирсона и Колмогорова. Гипотеза о нормальном распределении не отвергалась, если фактические значения критериев не превышали соответствующих критических.

Для амфибол-биотитовых гнейсов фактическое значение критерия Пирсона составило $\chi_ф^2$ = 5,171 при критическом — $\chi_{кр}^2$ = 11,071; критерия Колмогорова — $\lambda_ф$ = 0,429 при критическом — $\lambda_{кр}$ = 1,358.

Для биотитовых гнейсов фактические значения: $\chi_ф^2$ = 7,755 и $\lambda_ф$ = 0, 436

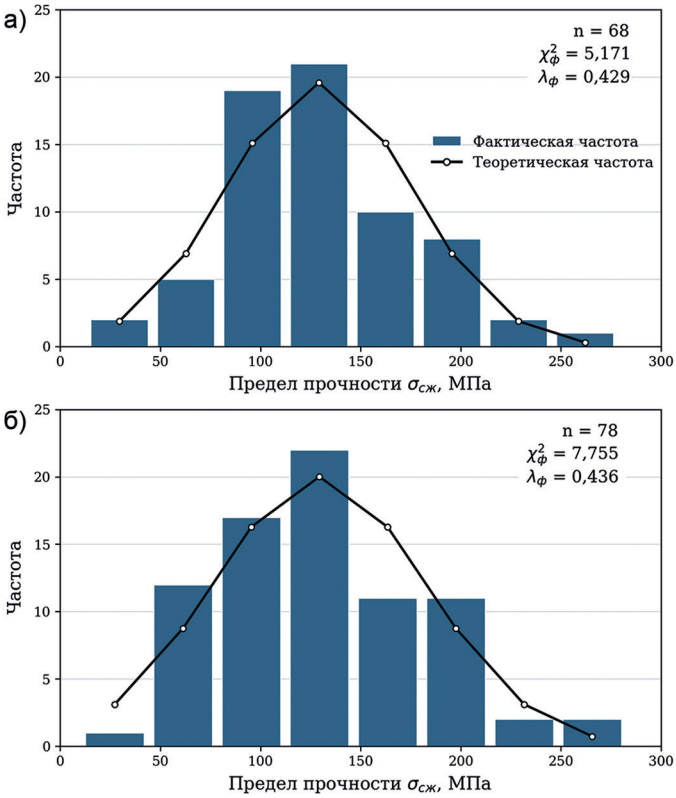


Рис. 3. Сопоставление эмпирического и теоретического распределений предела прочности при одноосном сжатии: амфибол-биотитовые гнейсы (а); биотитовые гнейсы (б)

Fig. 3. Comparison of empirical and theoretical uniaxial compressive strength distributions: amphibole-biotite gneiss (a); biotite gneiss (b)

также не превысили критических $\chi_{кр}^2$ = = 11,071 и $\lambda_{кр}$ = 1,358 по обоим критериям.

Таким образом, для обеих выборок нет основания отвергать гипотезу о нормальном распределении значений предела прочности при одноосном сжатии. Нормальный закон распределения принят для последующего вычисления нормативных и расчетных значений показателя.

Определение нормативных и расчетных значений предела прочности на сжатие

Поскольку для обеих выборок гипотеза о нормальном распределении не отвергнута, нормативное значение равно среднему арифметическому — X_n = = $\overline{X}$.

Расчетное значение определялось как нижняя односторонняя доверительная граница нормативного значения при доверительной вероятности P = 0,95 по формуле

$$X = \frac{X_n}{\gamma_g} = X_n\left(1-\rho_\alpha\right), \qquad (4)$$

где γ_g — коэффициент надежности по грунту; ρ_α — показатель точности среднего значения, определяемый по формулам

$$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \gamma_g = \frac{1}{1-\rho_\alpha}, \qquad (5)$$

где t_α — коэффициент Стьюдента, принимаемый в зависимости от довери-

Таблица 2

Нормативные и расчетные значения предела прочности при одноосном сжатии
Characteristic and design values of uniaxial compressive strength

Литотип	*n*	X_n, МПа	*S*, МПа	*V*	ρ_α	γ_g	*X*, МПа
Амфибол-биотитовые гнейсы	68	129	45	0,348	0,070	1,076	120
Биотитовые гнейсы	78	129	52	0,402	0,076	1,082	120

тельной вероятности и числа степеней свободы $n-1$; $V = S/X_n$ — коэффициент вариации; S — средне-квадратическое отклонение; n — число определений.

Результаты вычисления нормативных и расчетных значений предела прочности при одноосном сжатии приведены в табл. 2.

Нормативные и расчетные значения для рассматриваемых литотипов различаются менее чем на 1 МПа (соответственно на 0,2 и 0,4%). Полученные результаты свидетельствуют о близости прочностных характеристик двух литотипов. Вместе с тем близость нормативных и расчетных значений сама по себе не является достаточным основанием для объединения выборок, поэтому дополнительно проверялись гипотезы о равенстве их средних значений и дисперсий.

Оценка возможности объединения литотипов в расчетный грунтовый элемент

На заключительном этапе статистической обработки оценивалась возможность объединения выборок биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов в РГЭ по показателю предела прочности при одноосном сжатии. Проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ последовательным сопоставлением дисперсий и средних значений двух выборок.

Гипотеза о равенстве дисперсий проверялась критерием Фишера по формуле

$$F = \frac{S^2_{max}}{S^2_{min}}, \qquad (6)$$

где S^2_{max} и S^2_{min} — соответственно бóльшая и меньшая выборочные дисперсии. Гипотеза о равенстве дисперсий не отвергалась при выполнении условия $F < F_{кр}$.

Гипотеза о равенстве средних значений проверялась критерием Стьюдента по формуле

$$t = \frac{\left|\bar{X}_1 - \bar{X}_2\right|}{S_p\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}}, \qquad (7)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}}$$

где $\bar{X}_1$ и $\bar{X}_2$ — средние значения предела прочности; S_1 и S_2 — среднеквадра-

Таблица 3

Результаты проверки возможности объединения выборок в расчетный грунтовый элемент
Results of testing whether the samples can be combined into a single design soil element

Критерий	Расчетное значение	Критическое значение	Условие	Статистический вывод
Фишера, *F*	1,339	1,483	$F < F_{кр}$	гипотеза о равенстве дисперсий не отвергается
Стьюдента, *t*	0,031	1,977	$t < t_{кр}$	гипотеза о равенстве средних не отвергается

тические отклонения; n_1 и n_2 — объемы выборок; $S_р$ — объединенное среднеквадратическое отклонение. Гипотеза о равенстве средних значений не отвергалась при выполнении условия $t < t_{кр}$.

Для критерия Фишера числа степеней свободы составили 77 и 67, для критерия Стьюдента — 144. Результаты проверки статистических гипотез приведены в табл. 3.

Расчетное значение критерия Фишера не превысило критического, следовательно, различие дисперсий двух выборок статистически незначимо. Расчетное значение критерия Стьюдента также существенно меньше критического, поэтому основание отвергать гипотезу о равенстве средних значений отсутствует.

В рамках принятых статистических критериев выборки предела прочности при одноосном сжатии биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов не имеют значимых различий по их среднему значению и дисперсии. Это условие позволяет объединить результаты их испытаний в единую выборку и рассматривать указанные литотипы как единый РГЭ по исследуемому показателю. Объединенная выборка включала 146 определений предела прочности при одноосном сжатии; нормативное значение составило 129 МПа, средне-квадратическое отклонение — 49 МПа, коэффициент вариации — 0,377. При доверительной вероятности P = 0,95 и коэффициенте надежности по грунту 1,054 расчетное значение предела прочности при одноосном сжатии составило 123 МПа.

Заключение

Приведен алгоритм автоматизированной статистической обработки результатов испытаний физико-механических свойств горных пород, реализованный в программе для ЭВМ «GOST 20522» с использованием методов и критериев ГОСТ 20522-2012.

По результатам испытаний биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов, выполненных в 1964–2024 гг. на месторождении железистых кварцитов, статистически обоснована возможность объединения рассматриваемых литотипов в единый расчетный грунтовый элемент по пределу прочности при одноосном сжатии и определены нормативное и расчетное значения исследуемого показателя. Для имеющейся совокупности данных статистически значимая линейная связь предела прочности с глубиной отбора проб не установлена.

Авторы выражают признательность специалистам геологической службы предприятия за содействие в сборе исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Павлович А. А.*, *Коршунов В. А.*, *Бажуков А. А.*, *Мельников Н. Я.* Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 502—509. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.

2. *Бахаева С. П.*, *Тур К. А.*, *Илюшкин В. Д.* Геомеханическое обоснование устойчивости отвала при совместном складировании вскрышных песчано-глинистых пород и отходов обогащения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2020. — № 4. — С. 49—59. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-49-59.

3. *Копытов А. И.*, *Масаев Ю. А.*, *Масаев В. Ю.* Исследование влияния физических свойств горных пород на прочностные показатели породных обнажений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2023. — № 4 (158). — С. 92—101. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-92-101.

4. *Carbillet L.*, *Wadsworth F. B.*, *Heap M. J.*, *Baud P.* Microstructural controls on the uniaxial compressive strength of porous rocks through the granular to non-granular transition // Geophysical Research Letters. 2023, vol. 50, no. 21, article e2023GL104678. DOI: 10.1029/2023GL104678.

5. *Корнилков С. В.*, *Харисов Т. Ф.*, *Масальский Н. А.*, *Коптяков Д. А.* Исследование физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО «Ураласбест» // Проблемы недропользования. — 2025. — № 1 (44). — С. 16—24. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.016.

6. *Han L., Wang L., Zhang W., Chen Z.* Quantification of statistical uncertainties of unconfined compressive strength of rock using Bayesian learning method // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2022, vol. 16, no. 1, pp. 37—52. DOI: 10.1080/17499518.2021.1952612.

7. *Chen F., Zhang W.* Influence of spatial variability on the uniaxial compressive responses of rock pillar based on three-dimensional random field // ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering. 2021, vol. 7, no. 3, article 04021035. DOI: 10.1061/AJRUA6.0001162.

8. *Тур К. А.*, *Кашлинов Е. А.* «GOST 20522»: программа для ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024692278. Зарегистрировано 27.12.2024.

9. *Супрун В. И.*, *Левченко Я. В.*, *Колотовкин А. С.*, *Ворошилин К. С.* Влияние масштабного фактора на прочность горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 10. — С. 5—19. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_5.

10. *Коршунов В. А.*, *Шоков А. Н.*, *Дорджиев Д. Ю.*, *Черских О. И.* Исследование прочностных свойств слабых хрупких горных пород при испытании образцов сосредоточенной нагрузкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11-1. — С. 97—115. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_97.

11. *Петров Д. Н.*, *Абашин В. И.*, *Карасев М. А.*, *Селихов А. А.* Исследование возможности применения методов неразрушающего контроля для оценки прочностных свойств горных пород в условиях подземного рудника Гремячинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 12-1. — С. 227—244. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_227.

12. *Морозов И. А.* Уточнение коэффициента формы соляных пород Гремячинского месторождения // Горное эхо. — 2022. — № 3. — С. 19—24. DOI: 10.7242/echo.2022.3.4.

13. *Козырев А. А.*, *Кузнецов Н. Н.*, *Пак А. К.* Оценка влияния скорости нагружения на прочность скальных горных пород при одноосном сжатии и характер их разрушения // Горная промышленность. — 2024. — № 1. — С. 126—131. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-126-131.

14. *Рысин А. И.*, *Нуртдинов А. С.*, *Румянцева Н. А.*, *Лебедева А. М.* Оценка влияния формы испытательного образца хлоридных пород на точность определения предела прочности на одноосное сжатие // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2026. — Т. 337. — № 3. — С. 192—201. DOI: 10.18799/24131830/2026/3/5097.

15. *Xie W.-Q., Liu X.-L., Zhang X.-P., Liu Q.-S., Wang E.-Z.* A review of test methods for uni-axial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1889—1905. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.003.

16. *Burbaum U.* Stress-rate dependency of uniaxial compressive strength of hard rock with regard to test procedure standards // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2023, vol. 82, article 4. DOI: 10.1007/s10064-022-03024-z.

17. *Šancer J., Široký T., Krenžel V.* Determination of the uniaxial compressive strength of rocks from the strength index // GeoScience Engineering. 2022, vol. 68, no. 2, pp. 158—166. DOI: 10.35180/gse-2022-0078.

18. *Aladejare A. E.*, *Idowu K. A.*, *Ozoji T.* Reliability of Monte Carlo simulation approach for estimating uniaxial compressive strength of intact rock // Earth Science Informatics. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 2043—2053. DOI: 10.1007/s12145-024-01262-1.

19. *Aladejare A. E.*, *Alofe E. D.*, *Onifade M.*, *Lawal A. I.*, *Ozoji T. M.*, *Zhang Z.-X.* Empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock: Database of simple, multiple, and artificial intelligence-based regressions // Geotechnical and Geological Engineering. 2021, vol. 39, no. 6, pp. 4427—4455. DOI: 10.1007/s10706-021-01772-5.

20. *Xue X.* A novel model for prediction of uniaxial compressive strength of rocks // Comptes Rendus Mécanique. 2022, vol. 350, pp. 159—170. DOI: 10.5802/crmeca.109.

21. *Hassan M. Y.*, *Arman H.* Several machine learning techniques comparison for the prediction of the uniaxial compressive strength of carbonate rocks // Scientific Reports. 2022, vol. 12, article 20969. DOI: 10.1038/s41598-022-25633-0. ГИАБ

REFERENCES

1. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov A. A., Melnikov N. Ya. Evaluation of rock mass strength in openpit mining. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 502 — 509. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.

2. Bakhaeva S. P., Tur K. A., Ilyushkin V. D. Geomechanical justification of dump stability during joint storage of sandy-clayey overburden and processing waste. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020, no. 4, pp. 49 — 59. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-49-59.

3. Kopytov A. I., Masaev Yu. A., Masaev V. Yu. Influence of physical rock properties on the strength characteristics of rock outcrops. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023, no. 4 (158), pp. 92 — 101. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-92-101.

4. Carbillet L., Wadsworth F. B., Heap M. J., Baud P. Microstructural controls on the uniaxial compressive strength of porous rocks through the granular to non-granular transition. *Geophysical Research Letters*. 2023, vol. 50, no. 21, article e2023GL104678. DOI: 10.1029/2023GL104678.

5. Kornilkov S. V., Kharisov T. F., Masalsky N. A., Koptyakov D. A. Study of physical and mechanical properties of rocks in the pit-wall rock mass of PAO Uralasbest. *Problems of Subsoil Use*. 2025, no. 1 (44), pp. 16 — 24. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.016.

6. Han L., Wang L., Zhang W., Chen Z. Quantification of statistical uncertainties of unconfined compressive strength of rock using Bayesian learning method. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2022, vol. 16, no. 1, pp. 37 — 52. DOI: 10.1080/17499518.2021.1952612.

7. Chen F., Zhang W. Influence of spatial variability on the uniaxial compressive responses of rock pillar based on three-dimensional random field. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2021, vol. 7, no. 3, article 04021035. DOI: 10.1061/AJRUA6.0001162.

8. Tur K. A., Kashlinov E. A. «GOST 20522»: Computer Program. *Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2024692278*, registered 27.12.2024. [In Russ].

9. Suprun V. I., Levchenko Ya. V., Kolotovkin A. S., Voroshilin K. S. Size effect on rock strength. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 10, pp. 5 — 19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_5.

10. Korshunov V. A., Shokov A. N., Dordziev D. Yu., Cherskikh O. I. Studyng the strength properties of weak brittle rocks when testing a point load specimens. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 11-1, pp. 97 — 115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_97.

11. Petrov D. N., Abashin V. I., Karasev M. A., Selikhov A. A. Non-destructive testing applicability in rock mass strength estimation in underground mine at the Gremyachinsk deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 12-1, pp. 227 — 244. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_227.

12. Morozov I. A. Refinement of the shape factor for salt rocks of the Gremyachinskoye deposit. *Gornoe ekho*. 2022, no. 3, pp. 19 — 24. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.3.4.

13. Kozyrev A. A., Kuznetsov N. N., Pak A. K. Assessment of the loading-rate impact on the uniaxial compressive strength of hard rocks and their failure behavior. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 1, pp. 126 — 131. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-126-131.

14. Rysin A. I., Nurtdinov A. S., Rumyantseva N. A., Lebedeva A. M. Effect of chloride-rock specimen shape on the accuracy of uniaxial compressive-strength determination. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2026, vol. 337, no. 3, pp. 192 — 201. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2026/3/5097.

15. Xie W.-Q., Liu X.-L., Zhang X.-P., Liu Q.-S., Wang E.-Z. A review of test methods for uni-axial compressive strength of rocks: Theory, apparatus and data processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1889 — 1905. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.05.003.

16. Burbaum U. Stress-rate dependency of uniaxial compressive strength of hard rock with regard to test procedure standards. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2023, vol. 82, article 4. DOI: 10.1007/s10064-022-03024-z.

17. Šancer J., Široký T., Krenžel V. Determination of the uniaxial compressive strength of rocks from the strength index. *GeoScience Engineering*. 2022, vol. 68, no. 2, pp. 158 — 166. DOI: 10.35180/gse-2022-0078.

18. Aladejare A. E., Idowu K. A., Ozoji T. Reliability of Monte Carlo simulation approach for estimating uniaxial compressive strength of intact rock. *Earth Science Informatics*. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 2043 — 2053. DOI: 10.1007/s12145-024-01262-1.

19. Aladejare A. E., Alofe E. D., Onifade M., Lawal A. I., Ozoji T. M., Zhang Z.-X. Empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock: Database of simple, multiple, and artificial intelligence-based regressions. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021, vol. 39, no. 6, pp. 4427—4455. DOI: 10.1007/s10706-021-01772-5.

20. Xue X. A novel model for prediction of uniaxial compressive strength of rocks. *Comptes Rendus Mécanique*. 2022, vol. 350, pp. 159—170. DOI: 10.5802/crmeca.109.

21. Hassan M. Y., Arman H. Several machine learning techniques comparison for the prediction of the uniaxial compressive strength of carbonate rocks. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 20969. DOI: 10.1038/s41598-022-25633-0.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тур Кирилл Андреевич[1] — заместитель заведующего лабораторией,
e-mail: kirill.turik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7293-3964,
Бахаева Светлана Петровна[1] — д-р техн. наук, профессор,
профессор, e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru, ORCID ID: 0009-0003-1764-2341,
[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева.
Для контактов: Тур К.А., e-mail: kirill.turik@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

K.A. Tur[1], Deputy Head of Laboratory,
e-mail: kirill.turik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7293-3964,
S.P. Bakhaeva[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,
e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru, ORCID ID: 0009-0003-1764-2341,
[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia.
Corresponding author: K.A. Tur, e-mail: kirill.turik@mail.ru.

Получена редакцией 08.09.2026; получена после рецензии 13.10.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 08.09.2026; received after the review 13.10.2026; accepted for printing 20.10.2026.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www. gornaya-kniga.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
(2026, № 7, СВ 27, 40 с.)

Истомин П. А. Определение потребности в резервном горнотранспортном оборудовании в условиях роста логистических рисков поставок техники, запасных частей и комплектующих изделий 3

Эзан Жиан-Увес Аристид Об определении минимальной и оптимальной длины активного фронта горных работ 23

OPTIMIZATION OF PARAMETERS AND ELEMENTS OF MINING ENGINEERING SYSTEMS

Istomin P. A. Determining the need for backup mining equipment in the context of increasing logistical risks of supplies of machinery, spare parts and components 3

Ezan Zhian-Uves Aristide On determining the minimum and optimal length of the active mining front 23