

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ ГОРНЫХ ПОРОД НАГРУЖЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ СФЕРИЧЕСКИМИ ИНДЕНТОРАМИ

Д. Г. Петраков¹, В. А. Коршунов¹, А. Н. Шоков¹, Д. А. Карманский¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия, e-mail: Korshunov_VA@pers.spmi.ru

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований прочностных свойств горных пород при кратковременных и длительных механических испытаниях в условиях одноосного и объемного сжатия. Для определения длительной прочности пород по результатам испытания образцов сферическими инденторами предлагается использовать традиционный подход, учитывающий влияние структурных изменений в деформируемой породе. Разработан ускоренный метод определения предела длительной прочности при одноосном сжатии, основанный на измерении напряжений в образце на границе зоны интенсивной трещиноватости вблизи контактов со сферическими инденторами. Исследованы закономерности изменения показателей длительной прочности пород при объемном сжатии. Установлено, что сцепление при объемном сжатии и максимальное касательное напряжение отличаются от аналогичных значений при кратковременных испытаниях в одинаковой мере, определяемой коэффициентом длительной прочности. При этом соответствующие углы внутреннего трения при кратковременных и длительных испытаниях равны. Разработан расчетный метод определения показателей длительной прочности пород при объемном сжатии нагружением образцов сферическими инденторами. Метод основан на подобии процессов структурных изменений при кратковременном и длительном режимах нагружения в различных напряжённых состояниях. Изучена взаимная связь показателей длительной прочности при объемном сжатии с прочностью на сжатие и хрупкостью пород, на основе которой предложены зависимости для вычисления показателей паспорта длительной прочности при объемном сжатии.

Ключевые слова: горная порода, трещина, сферические инденторы, одноосное сжатие, объемное сжатие, длительная прочность, угол внутреннего трения, сцепление, хрупкость.

Благодарность: Работа выполнена в рамках исследований термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах – FSRW-2024-0008

Для цитирования: Петраков Д. Г., Коршунов В. А., Шоков А. Н., Карманский Д. А. Определение длительной прочности при сжатии горных пород нагружением образцов сферическими инденторами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 38–56. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_38.

Determination of long-term compressive strength of rocks by loading samples with spherical indenters

D. G. Petrakov¹, V. A. Korshunov¹, A. N. Shokov¹, D. A. Karmanskiy¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: The article presents the results of experimental studies of the strength properties of rocks during short-term and long-term mechanical tests under uniaxial and volumetric compression. To determine the long-term strength of rocks based on the results of testing samples with spherical indenters, it is proposed to use a traditional approach that takes into account the influence of structural changes in the deformed rock. An accelerated method for determining the limit of long-term strength under uniaxial compression has been developed, based on measuring stresses in a sample at the boundary of an intense fracturing zone near contacts with spherical indenters. The regularities of changes in the long-term strength of rocks under volumetric compression have been investigated. It has been established that the adhesion under volumetric compression and the maximum shear stress differ from similar values in short-term tests to the same extent, determined by the long-term strength coefficient. In this case, the corresponding angles of internal friction in short-term and long-term tests are equal. A calculation method has been developed for determining the long-term strength of rocks under volumetric compression by loading samples with spherical indenters. The method is based on the similarity of structural change processes under short-term and long-term loading conditions in various stress states. The mutual relationship of long-term strength indices under volume compression with compressive strength and brittleness of rocks is studied, on the basis of which dependencies are proposed for calculating long-term strength passport indices under volume compression.

Key words: rocks, crack, spherical indenters, uniaxial compression, volumetric compression, long-term strength, internal friction angle, adhesion, brittleness.

Acknowledgment: The work was carried out within the framework of the state assignment "Study of thermodynamic processes of the Earth from the position of hydrocarbon genesis at great depths", FSRW-2024-0008.

For citation: Petrakov D. G., Korshunov V. A., Shokov A. N., Karmanskiy D. A. Determination of long-term compressive strength of rocks by loading samples with spherical indenters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):38–56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_38.

Введение

Механические процессы деформирования и разрушения породного массива разнообразны по характеру воздействия внешних сил и продолжительности протекания [1–3]. Поэтому при определении параметров длительно эксплуатируемых объектов в качестве исходных данных расчетов прочности пород массива наряду с показателями прочности, определяемыми при стандартных кратковременных испытаниях образцов, используются данные о длительной прочности пород в объемном напряжённом состоянии в условиях естественного залегания [4–6].

Длительная прочность (ДП) горных пород в массиве зависит от многих факторов, в том числе от их петрографического состава, особенностей структурного ослабления, вида напряжённого

состояния, режима деформирования [7–9]. Из-за сложности геомеханических процессов, протекающих в породных массивах, при их исследовании на образцах применяются методы физического моделирования [10–12]. При этом упрощенные модели длительных процессов учитывают только наиболее существенные особенности деформирования пород в естественных условиях [13–15].

Разрушение пород в массиве происходит в условиях неоднородного напряженного состояния путем развития сложных процессов, включающих возникновение сети микротрещин, прорастание магистральных трещин, формирование в породах неравномерной блочной структуры. Поэтому при определении ДП оценивают критические напряжения с учетом структурных изменений в деформируемой породе [3, 16, 17].

Применяется два основных подхода к определению ДП породы: прямой метод испытаний на ползучесть и косвенные методы кратковременных испытаний на сжатие.

Прямой метод определения ДП трудоемок, так как основан на результатах многочисленных и продолжительных испытаний образцов-близнецов. При определении показателей ДП методом объемного сжатия сложность и трудоемкость испытаний на ползучесть увеличиваются [17–19]. Внедрение специальных режимов испытания (приложение нагрузок ступенями, испытания в ползуче-релаксационном режиме, вибрационные испытания) позволяет сократить их продолжительность, но не способствует повышению точности определения показателей ДП [20–22].

Альтернативным подходом к определению ДП является ее косвенная оценка по данным об интенсивности изменения разнообразных показателей механических свойств (объемной деформации образца, скорости распространения колебаний, акустической эмиссии и т. п.) в процессе деформирования образцов при кратковременных испытаниях на сжатие [23–25]. Косвенные методы обеспечивают оперативное определение ДП при решении практических задач. Однако возможности применения подобных методов ограничены из-за неоднозначности результатов испытаний при использовании различных «структурно-чувствительных» показателей [2, 3, 26]. Поэтому на практике нередко предусматривается дополнительное экспериментальное подтверждение полученных данных [27, 28].

В связи с изложенным актуальной является разработка достоверных доступных методов ускоренной оценки ДП пород при сжатии в различных напряжённых состояниях. В статье

представлены результаты исследований, направленных на разработку методов ускоренного определения показателей ДП пород в одноосном и объемном напряжённом состоянии нагружением образцов неправильной формы сферическими инденторами (СИ).

Среди методов ускоренного определения ДП горных пород преобладают методы, использующие особенности развития процесса трещинообразования [18]. Современные методы косвенного определения предела ДП породы основаны на гипотезе о его соответствии началу процесса интенсивного распространения микротрещин в деформируемом образце [16, 17]. Реализация этого подхода трудоемка и связана с применением специального оборудования.

Известно, что в деформируемом образце микротрещины возникают задолго до потери им несущей способности и неравномерно распределяются по объему в зависимости от особенностей напряженного состояния. Из-за неоднозначности связи параметров трещинообразования с критическими напряжениями применяются различные подходы к оценке предела ДП пород на основе упрощенных моделей процессов структурных изменений в образце.

Распространение получил подход к оценке ДП пород, основанный на определении объемной деформации образца. Согласно этому подходу, предел ДП соответствует напряженному состоянию перехода к нестабильному распространению микротрещин в образце. При испытаниях это проявляется в постепенном разуплотнении породы.

Предложены разнообразные варианты этого подхода применительно к испытаниям на сжатие или срез. При этом, как правило, о достижении состояния предела ДП судят по рез-

кому изгибу экспериментальной кривой на графике зависимости напряжений (нормального при сжатии или касательного при срезе) от деформации [3, 16]. Поэтому применение подхода затруднено для тех пород, которым при испытаниях присущ плавный переход от уплотнения к разуплотнению (это характерно для песчано-глинистых пород). Недостатком этого подхода также является его невысокая точность из-за сложности измерения деформации в образцах, в которых происходят структурные изменения.

Г. Л. Фисенко предложена упрощенная модель процесса структурных изменений, позволяющая оценивать ДП по изменению показателей прочности в процессе деформирования образца за пределом ДП [2, 18]. Модель учитывает, что при сжатии образца из-за развития микротрещин порода частично или полностью утрачивает связность.

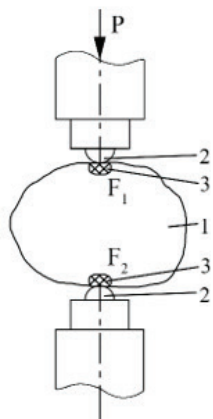
ДП породы зависит от вида и уровня напряжённого состояния. Для определения показателей ДП пород при объемном сжатии прямым методом испытаний на ползучесть применяется специальное оборудование, реализующее режимы длительного ступенчатого нагружения цилиндрических образцов осевым давлением при регулируемом боковом давлении [17, 29]. Учитывая значительную сложность и трудоемкость подобных испытаний для определения показателей ДП в объемном напряженном состоянии, нередко практически оправданным признается приближенное определение показателей ДП [30, 31]. В подобных случаях распространенным подходом является использование закономерностей, обобщающих взаимную связь параметров прочности и учитывающих влияние основных факторов.

Данные экспериментальных исследований свидетельствуют о подо-

бии процессов структурных изменений в кратковременном и длительном режимах нагружения образцов пород при различных видах напряженного состояния [3, 17, 30]. Полученные результаты используются для экспериментального обоснования ускоренных методов определения показателей ДП при одноосном и объемном сжатии. Ю. М. Карташовым установлено, что на диаграмме прочности Мора огибающая кругов предельных напряжений при длительных испытаниях слабых пород расположена параллельно огибающей кругов предельных напряжений при кратковременных испытаниях. С учетом равенства соответствующих углов внутреннего трения при кратковременном и длительном испытании пород предложена упрощенная расчетная методика определения показателей объемной ДП слабых пород по данным кратковременных объемных испытаний пород и значению предела ДП на одноосное сжатие [17]. Аналогичный вывод о подобии криволинейных огибающих предельных касательных напряжений при длительных и кратковременных испытаниях сделан Б. В. Титовым в результате анализа данных объемных испытаний соляных пород. Эта закономерность положена в основу ускоренного метода определения показателей ДП соляных пород при одноосном и объемном сжатии [3].

Эффективным подходом для ускоренной оценки прочности пород признан метод испытаний образцов сосредоточенной нагрузкой. На основе метода испытания образцов СИ в Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II разработан экспресс-метод построения паспортов предельной и остаточной прочности для пород различной структуры [32, 33]. Сущность метода испытаний заключается в сжатии образца

а)



б)



Рис. 1. Испытание образца эпоксидной смолы сферическими инденторами: а – схема испытания; б – распределение напряжений в образце [составлено авторами]:

1 – образец; 2 – сферические инденторы; 3 – зоны интенсивной трещиноватости;

P – разрушающая сила; F_1 и F_2 – площади поверхностей зон интенсивной трещиноватости
Fig. 1. Testing of an epoxy resin sample with spherical indenters: a – test scheme; b – stress distribution in the sample [compiled by the authors]: 1 – sample; 2 – spherical indenters; 3 – zones of intense cracking; P – load; F_1 and F_2 – surface areas of zones of intense cracking

двумя встречно направленными СИ до образования поверхности отрыва, проходящей через ось нагружения, и измерении разрушающей силы P , площади поверхности отрыва S и площади поверхностей зон ИТ породы на контакте с СИ F_1 и F_2 (рис. 1).

К достоинствам метода относятся техническая простота реализации и доступность к применению в полевых условиях, благодаря возможности использовать образцы неправильной формы. Метод испытаний СИ перспективен также и для определения показателей паспорта ДП по аналогии с расчетной методикой построения паспорта прочности при кратковременных испытаниях.

Экспериментальная часть

Методика исследований

Методика исследований включала в себя анализ и обобщение известных научных результатов по изучаемым вопросам, экспериментальные иссле-

дования прочностных свойств горных пород при кратковременных и длительных механических испытаниях по известным и предлагаемым методам, сопоставительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных.

В ходе исследований были изучены следующие вопросы:

1) механизм развития микротрещин в образце породы при нагружении СИ;

2) установление оптимальных параметров режима нагружения образцов СИ при определении предела ДП пород при одноосном сжатии;

3) связь показателей ДП при объемном сжатии с параметрами прочности при испытаниях СИ. Установление зависимостей, связывающих показатели прочности при кратковременных и длительных режимах нагружения, по данным испытаний СИ;

4) влияние на показатели ДП при объемном сжатии прочности и хрупкости пород.

Исследованы прочностные свойства более 50 проб горных пород и подобных им материалов, разнообразных по составу (кембрийская глина, гипс, мел, мергель, аргиллит, алевролит, известняк, песчаник, соляные породы, эпоксидная смола и т.д.), механическим и упругопластическим свойствам (от мягких пород до пород выше средней прочности с пределом прочности на сжатие от 2 до 160 МПа и коэффициентом хрупкости от 5 до 15).

Для обоснования методов ускоренного определения показателей ДП пород выполнен комплекс сопоставительных механических испытаний, включающий испытания образцов СИ и испытания цилиндрических образцов на одноосное и трехосное сжатие и на срез со сжатием при различных заданных скоростях нагружения или деформации.

Испытания образцов нагружением СИ диаметром 15 мм проведены при скорости нагружения от 0,02 до 0,50 кН/с в нагрузочном устройстве БУ-11 (Россия), установленном в универсальной испытательной машине Insight 200 (США); при этом площадь поверхности разрыва образцов варьировала от 5 до 20 см².

Испытания цилиндрических образцов на одноосное сжатие проведены со скоростью нагружения 0,5–1,0 МПа/с в сервогидравлической системе MTS 816 (MTS, США), а испытания на объемное сжатие проведены со скоростью деформации 0,002 мм/с в стабилometре БВ21 (Россия), нагружаемом в гидравлической универсальной испытательной машине ZD100 (Германия).

Испытания цилиндрических образцов пород при срезе со сжатием проведены в устройстве косо́го среза МА 3 (Россия) со скоростью срезающих напряжений 1–5 МПа/с.

Обсуждение результатов исследований

Основная цель исследований, выполненных в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, заключалась в обосновании возможности определения ДП породы по результатам испытаний образцов СИ с учетом влияния структурных изменений в деформируемой породе для разработки расчетных методов ускоренного определения показателей ДП породы в одноосном и объемном напряжённом состоянии.

Теоретической основой предлагаемых методов является применение к испытаниям образца СИ упрощенной модели структурных изменений, происходящих в процессе деформирования за пределом ДП, предложенной Г. Л. Фисенко [2]. Анализ процессов, протекающих при разрушении образца СИ, подтвердил их соответствие этой модели.

Установлено, что образование микротрещин при нагружении СИ начинается задолго до разрушения образца и протекает в условиях сложного неоднородного напряженного состояния. При этом центральная часть образца находится в исходном ненарушенном состоянии, аналогичном по структуре состоянию одноосно сжимаемого цилиндрического образца до предела ДП, в то время как зоны ИТ породы под СИ увеличиваются с ростом нагрузки на образец аналогично развитию сети микротрещин в цилиндрическом образце после превышения напряжениями величины предела ДП.

Установлено, что процессы, протекающие в образце при нагружении СИ, обладают рядом особенностей. Во-первых, зоны ИТ сосредоточены

непосредственно под СИ и имеют в первом приближении форму боковой поверхности шарового сегмента, что упрощает измерение размеров зон и повышает их точность. Во-вторых, по мере внедрения СИ в породе происходит регулярное разрушение срезом вдоль текущих поверхностей зоны ИТ породы вблизи контактов с СИ (см. рис. 1, б). Установлено (рис. 2), что локальным разрушениям в образце соответствуют достижения состояния предела прочности при сжатии σ_{ci} , которое может быть вычислено как сумма частных значений p_i и C_{0i} , действующих вдоль поверхностей среза. При этом если на начальной стадии имеет место разброс данных, вероятно, связанный с влиянием неровности поверхности образцов и пористости материала, то по мере продолжения вдавливания СИ происходит постепенная стабилизация параметров процесса «регулярного» среза (значений p_i и σ_{ci}) до момента раскалывания образца вдоль оси нагружения.

Это позволяет при массовых испытаниях по определению показателей прочности ограничиться измерением только разрушающей нагрузки и остаточной деформации в зонах ИТ в расколотом образце и за счет этого существенно упростить испытания.

В соответствии с моделью Г. Л. Фисенко процесс постепенного уменьшения породой связности (сцепления) по мере развития микротрещин при деформировании образца за пределом ДП может быть описан зависимостью предела прочности при одноосном сжатии σ_c от предела ДП σ_{∞} и остаточного сцепления $C_{ост}$ в интервале напряжений между состояниями длительной σ_{∞} и кратковременной σ_c прочности. При этом величина остаточного сцепления $C_{ост}$ зависит от скорости нагружения образца и уменьшается

при замедлении испытания до предельного нулевого значения.

$$\sigma_c = \sigma_{c\infty} + C_{ост} \cdot \quad (1)$$

По структуре формула (1) аналогична формуле (2) для вычисления предела прочности при одноосном сжатии σ_c по результатам кратковременного испытания образца СИ [32]:

$$\sigma_c = p + C_0, \quad (2)$$

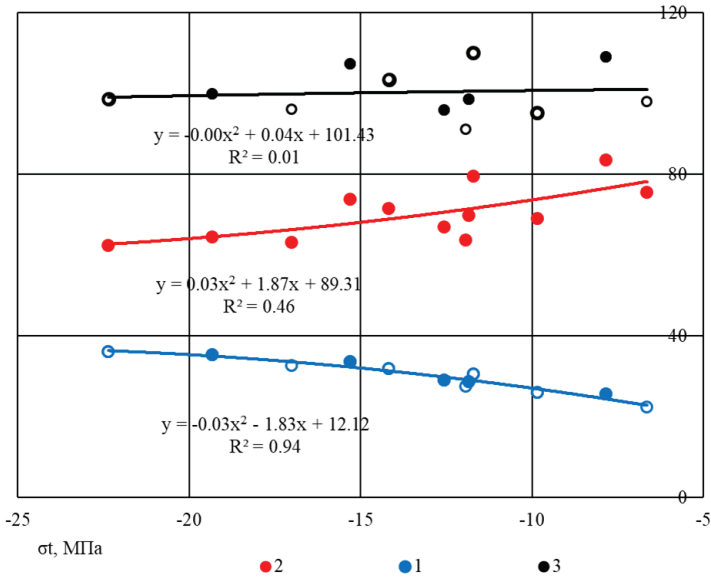
где p и C_0 — сжимающая составляющая предельного напряженного состояния и предельное сопротивление срезу на границе раздела ненарушенной породы в центральной части образца и большей из зон ИТ породы вблизи контактов с СИ, соответственно. Учитывая это, предлагается в качестве предела ДП σ_{∞} принимать сжимающую составляющую p предельного напряженного состояния на границе большей из зон ИТ вблизи контактов с СИ:

$$\sigma_{c\infty} = p. \quad (3)$$

Формула (3) отражает физическую сущность предела ДП как порога, разделяющего два различных структурных состояния нагружаемого образца — центральную часть образца в исходном ненарушенном состоянии и зоны развития микротрещин под СИ, на которые оказывают влияние особенности процесса нагружения. При этом напряжения на границе раздела соответствуют сжимающей составляющей p предельного сопротивления срезу монолитной породы.

Экспериментальным обоснованием принятия в качестве предела ДП при одноосном сжатии величины среднего сжимающего напряжения вдоль поверхности большей из зон ИТ породы в зонах контакта с СИ служат результаты сопоставительных испытаний более 40 проб различной прочности и хрупкости по определению предела

a)



b)

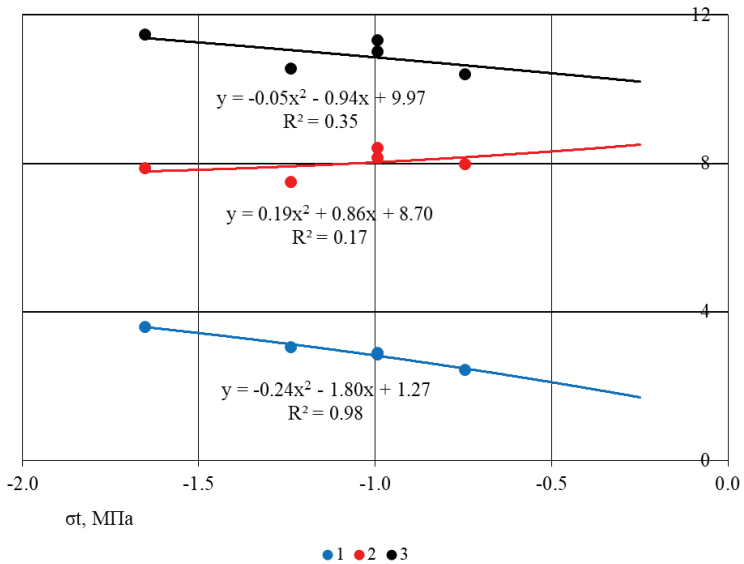


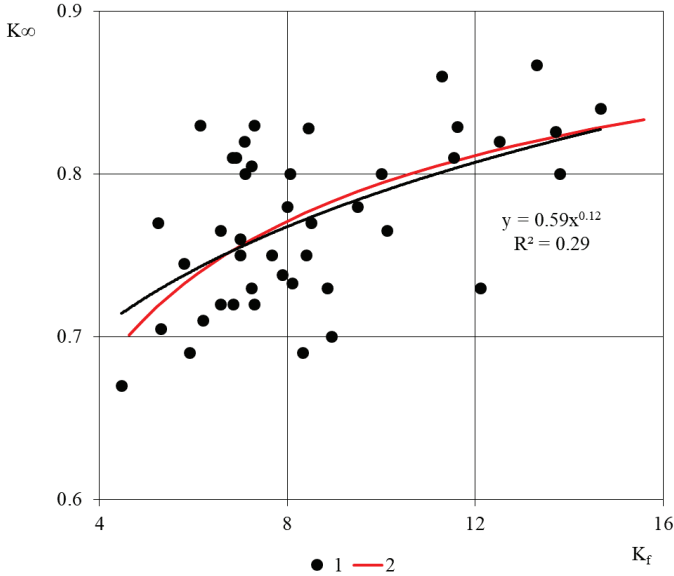
Рис. 2. Зависимость параметров прочности от растягивающего напряжения σ_t при испытании сферическими инденторами образцов эпоксидной смолы (a) и гипса (б) [составлено авторами]: 1 – C_0 ; 2 – p ; 3 – σ_c

Fig. 2. Dependence of strength parameters on tensile stress σ_t during testing of epoxy resin (a) and gypsum (b) samples with spherical indenters [compiled by the authors]: 1 – C_0 ; 2 – p ; 3 – σ_c

ДП СИ и методом измерения объемных деформаций при одноосном сжа-

тии цилиндрических образцов (рис. 3). При этом в качестве показателя ДП

a)



б)

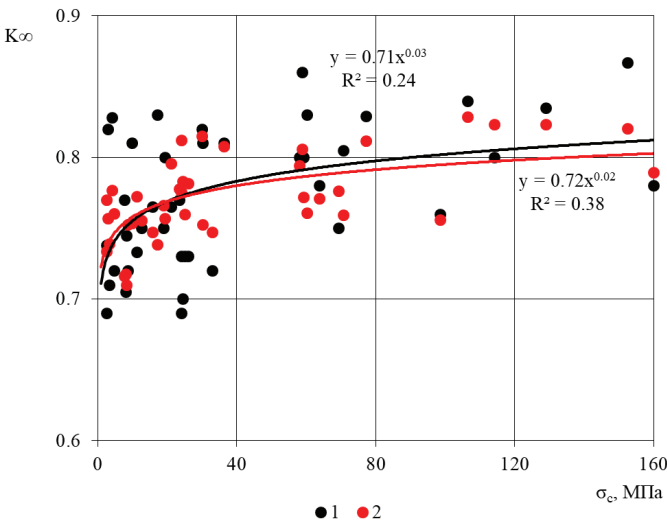


Рис. 3. Зависимость коэффициента длительной прочности K_∞ от коэффициента хрупкости K_f (а) и предела прочности при одноосном сжатии (б) [составлено авторами]: 1 – метод измерения объемных деформаций; 2 – метод сферических инденторов
Fig. 3. Dependence of the coefficient of long-term strength K_∞ on the coefficient of brittleness K_f (a) and the ultimate strength under uniaxial compression (b) [compiled by the authors]: 1 – method of measuring volumetric deformations; 2 – method of spherical indenters

был принят коэффициент ДП K_∞ , представляющий предел ДП $\sigma_{c\infty}$ в долях

от значения σ_c , а в качестве показателя хрупкости – коэффициент хрупкости

K_f , измеряемый отношением предела прочности при одноосном сжатии и растяжении. При этом значения K_∞ , вычисляли для метода нагружения СИ по формуле

$$K_\infty = \frac{P}{\sigma_c}, \quad (4)$$

где p — сжимающая составляющая предельного напряженного состояния на границе большей из зон ИТ вблизи контактов с СИ при скорости нагружения образца не более 0,02 кН/с; σ_c — предел прочности при одноосном сжатии при нагружении образца СИ со скоростью 0,1–0,5 кН/с, рекомендуемой ГОСТ 21153.3.

Установлено, что зависимости коэффициента K_∞ от K_f и σ_c , построенные сравнимаемыми методами, аппроксимируются степенной функцией с близкими параметрами. Отклонение средних значений коэффициента длительной прочности породных проб сравнимаемыми методами не превышает 0,02 (то есть не более 5%), что свидетельствует об их приемлемой сходимости и допустимости использования предлагаемого метода для пород с маловыраженными реологическими свойствами. К таким породам относятся породы не ниже средней прочности (σ_c не менее 15 МПа), а также некоторые мягкие породы прочностью σ_c не менее 4–6 МПа.

Известно, что в породах с хрупко-пластическим типом деформирования (например, в соляных и глинистых породах) при проведении кратковременных испытаний не в полной мере проявляются реологические свойства [18, 20, 34]. Учитывая это, для таких пород с выраженными реологическими свойствами предлагается проводить «медленные» испытания образцов СИ со скоростью не более

0,02 кН/с, способствующей развитию зон ИТ и в большей степени соответствующей длительным процессам релаксации напряжений. При этом для сокращения полного времени испытаний предлагается вначале нагружать образцы в режиме, рекомендуемом ГОСТ 21153.3 (со скоростью нагружения 0,1–0,5 кН/сек), и только при приближении к состоянию предела длительной прочности уменьшать скорость нагружения до оптимального значения [3, 35].

Установлена связь относительных показателей одноосной и объемной длительной прочности (показателей паспорта прочности) горных пород при кратковременном и длительном нагружении по данным испытаний образцов СИ.

Основой для определения показателей ДП пород в объемном напряжённом состоянии по результатам испытаний образцов СИ являются следующие известные результаты:

1) подобие процессов накопления структурных повреждений в соляных породах при кратковременном и длительном режимах нагружения в одноосном и объёмном напряжённом состояниях [3];

2) равенство соответствующих углов внутреннего трения при кратковременном и длительном испытании слабых пород при одноосных и объёмных испытаниях пород [3, 17];

3) равенство предела ДП при одноосном сжатии сжимающей составляющей p предельного напряженного состояния на границе зоны ИТ в образце, нагружаемом СИ, обоснование которого приведено в настоящей статье;

4) существование взаимной связи между показателями прочности породы, согласно которой для построения паспорта прочности достаточно определить два его независимых параметра [30, 32].

В соответствии с этими сведениями разработан расчетный метод определения показателей ДП горных пород по результатам испытаний образцов СИ.

Предлагаемый метод реализует переход от данных испытаний монолитных образцов СИ к показателям паспорта ДП породы. Он включает следующие этапы:

1) проведение испытаний монолитного образца нагружением СИ до его раскалывания со скоростью нагружения не более 20 Н/с и вычисление параметров прочности — растягивающей σ_t и сжимающей p составляющих величины сцепления C_0 .

2) вычисление по результатам испытаний двух независимых показателей ДП породы: предела ДП при одноосном сжатии σ_∞ и угла длительного внутреннего трения при объемном сжатии ϕ_∞ , соответствующих параметрам прочности при кратковременных испытаниях. При этом в качестве предела ДП принимается значение p , а значение угла ϕ_∞ вычисляется через значение его тангенса (коэффициента длительного внутреннего трения $\operatorname{tg} \phi_\infty$), который в свою очередь вычисляется через значение показателя хрупкости K (равного отношению p/σ_t) по формуле

$$\operatorname{tg} \phi_\infty = \frac{\sqrt{K} - 1}{2\sqrt[4]{K}}; \quad (5)$$

3) построение на диаграмме прочности Мора в координатах «предельные касательные напряжения — нормальные напряжения» фрагмента паспорта ДП, соответствующего объемному напряженному состоянию (рис. 4). При этом сначала строится круг, соответствующий пределу ДП при одноосном сжатии со значениями главных нормальных напряжений $(0; p)$. Затем проводится касательная к этому кругу под углом, равным ϕ_∞ . Касательная пересе-

кает ось ординат τ в точке C_∞ , соответствующей длительному сцеплению при объемном сжатии, которое вычисляется по формуле

$$C_\infty = \frac{\sigma_{c\infty}}{2\sqrt[4]{K}} = \frac{p}{2\sqrt[4]{K}}. \quad (6)$$

Для определения максимального касательного напряжения при длительных испытаниях $\tau_{\max\infty}$ предлагается построить круг ДП, соответствующий на диаграмме Мора предельному напряженному состоянию перехода от разрушения срезом к квазипластическому поведению породы при высоких давлениях. Этот круг имеет общую точку с касательной. При этом значение $\tau_{\max\infty}$ может быть также вычислено по формуле (7) через значение максимального касательного напряжения τ_{\max} с учетом значения K_∞ , определяемого по формуле (4):

$$\tau_{\max\infty} = K_\infty \tau_{\max}. \quad (7)$$

Для экспериментального обоснования предлагаемого расчетного метода выполнено сопоставление данных определения показателей ДП при объемном сжатии 8 проб пород и материалов, различных по литологическому составу, прочности и степени хрупкости. В результате сопоставления средних арифметических значений показателей прочности, определенных при испытаниях нагружением СИ и на объемное сжатие, установлено, что отклонение данных определения ДП сравниваемыми методами составляет около 5%, что свидетельствует о допустимости применения предлагаемого расчетного метода (таблица).

Исследованы зависимости показателей ДП при объемном сжатии от прочности на сжатие и хрупкости пород.

Показатели C_∞ и ϕ_∞ являются комплексной характеристикой прочно-

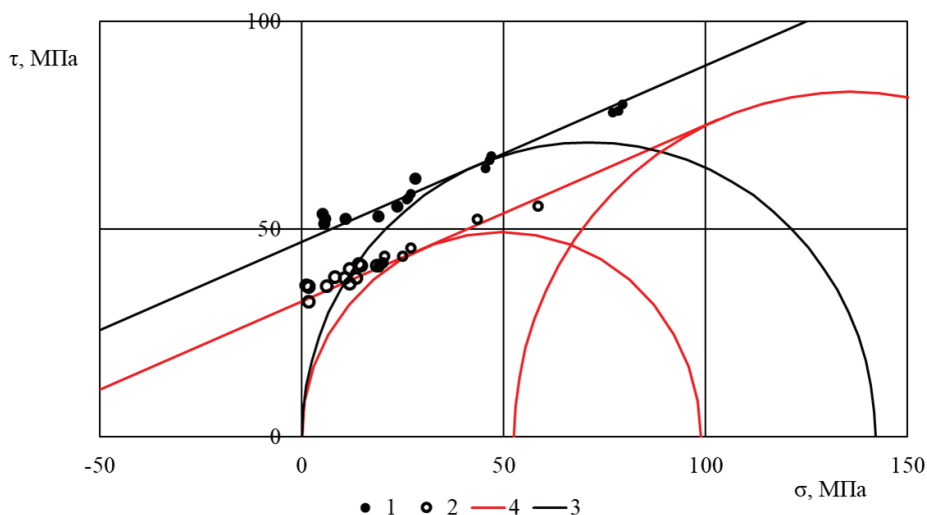


Рис. 4. Построение паспорта длительной прочности эпоксидной смолы [составлено авторами]: 1 – данные кратковременных испытаний на срез со сжатием; 2 – данные длительных испытаний в стабилометре; 3 и 4 – вспомогательные построения по данным испытаний сферическими инденторами, соответствующие кратковременным и длительным испытаниям

Fig. 4. Construction of a passport of long-term strength of epoxy resin [compiled by the authors]: 1 – data from short-term tests on shear with compression; 2 – data from long-term tests in a stabilometer; 3 and 4 – auxiliary constructions according to data from tests with spherical indenters, corresponding to short-term and long-term tests

Экспериментальные и расчетные показатели длительной прочности горных пород Experimental and calculated indicators of long-term strength of rocks

Наименование пробы	Экспериментальный метод объемного сжатия			Расчетный метод		Отклонение данных	
	σ_c , МПа	C_{∞} , МПа	ϕ_{∞} , град	C_{∞} , МПа	ϕ_{∞} , град	ΔC_{∞} , %	$\Delta \phi_{\infty}$, %
Мрамор I	100,1	20,9	38,7	18,7	37,3	10,5	3,5
Мрамор II	59,3	11,8	31,7	12,4	32,9	15,0	4,0
Гипс	8,2	1,9	28,7	1,8	27,7	3,7	3,3
Кембрийская глина	2,6	0,6	28,4	0,6	27,9	1,4	1,7
Каменная соль I	21,9	4,3	33,0	4,7	35,2	8,6	6,6
Каменная соль II	32,7	6,4	33,0	6,8	34,4	5,6	4,2
Сильвинит	27,9	5,5	32,0	5,8	33,3	5,2	4,0
Эпоксидная смола	142,0	32,7	23,4	32,7	23,0	0,1	1,5

сти породы для заданных интервалов предельных напряжений на диаграмме Мора и поэтому их принято рассматривать совместно. В то же время на основании анализа взаимных связей между показателями прочности породы, полу-

ченными по результатам испытания образцов СИ, установлено существование устойчивых связей показателей объемной прочности C_{∞} и ϕ_{∞} с абсолютными и относительными показателями прочности — с σ_c и K_f .

Установлено, что прочность и хрупкость пород оказывают в различной мере влияние на показатели длительной прочности C_{∞} и ϕ_{∞} . В частности, при длительном нагружении абсолютная величина сцепления C_{∞} определяется прочностью породы σ_c (рис. 5, а), в то время как угол внутреннего трения ϕ_{∞} и безразмерная величина сцепления $C_{\infty}/\sigma_{c\infty}$ определяются ее хрупкостью K_f (рис. 5, б, в). В то же время устойчивой зависимости угла длительного внутреннего трения ϕ_{∞} и безразмерной величины длительного сцепления $C_{\infty}/\sigma_{c\infty}$ от прочности не наблюдается.

Заключение

Выполнено обоснование использования традиционного подхода к опре-

делению ДП пород с учетом влияния структурных изменений в деформируемой породе применительно к испытаниям образцов сферическими инденторами.

Разработан ускоренный метод определения предела ДП при одноосном сжатии, основанный на измерении предельных напряжений в образце на границе зоны интенсивной трещиноватости вблизи контактов с СИ.

Разработан расчетный метод определения показателей длительной прочности пород при объемном сжатии нагружением образцов СИ, основанный на подобии процессов структурных изменений при кратковременном и длительном режимах нагружения в различных напряжённых состояниях.

а)

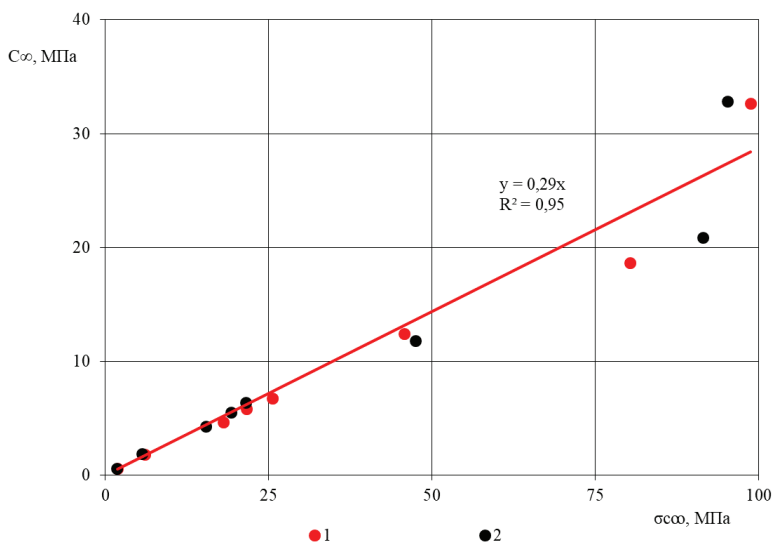
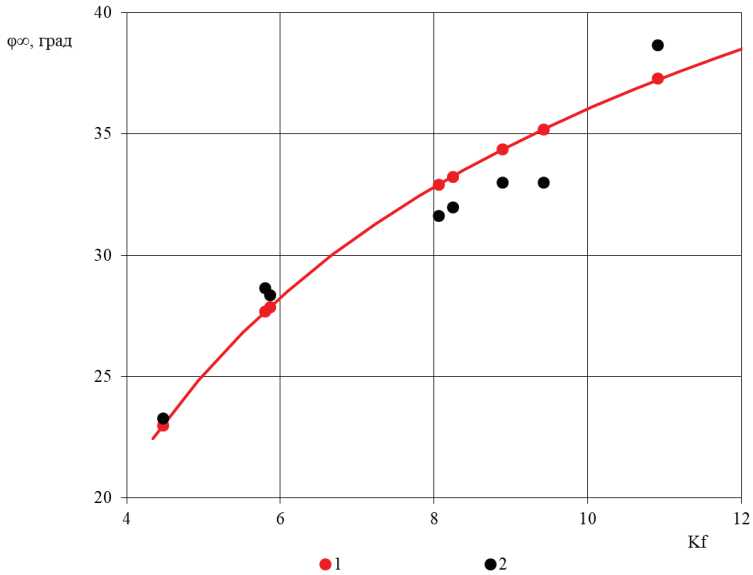


Рис. 5 (начало). Зависимость показателей длительной прочности при объемном сжатии от предела прочности при одноосном сжатии (а) и коэффициента хрупкости K_f (б и в) [составлено авторами]

Fig. 5 (the beginning). Dependence of long-term strength indicators under volume compression on the ultimate strength under uniaxial compression (a) and the brittleness coefficient K_f (b and c) [compiled by the authors]

б)



в)

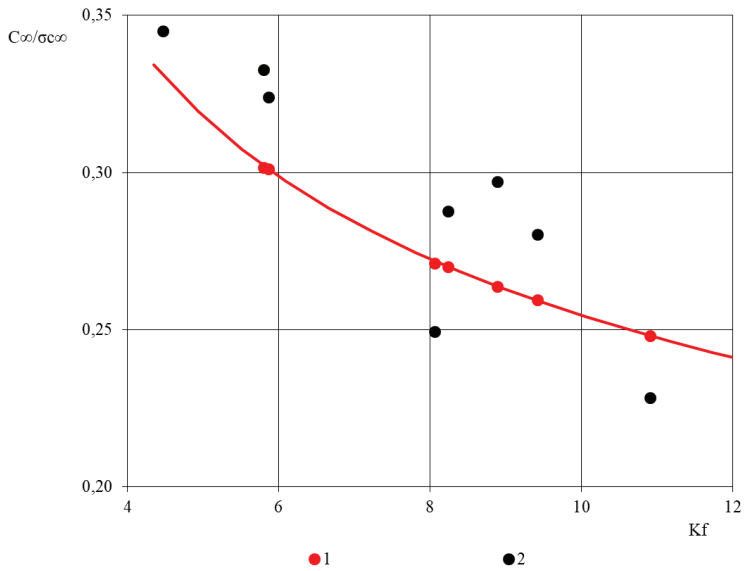


Рис. 5 (окончание). Зависимость показателей длительной прочности при объемном сжатии от предела прочности при одноосном сжатии (а) и коэффициента хрупкости K_f (б и в) [составлено авторами]: 1 – метод сферических инденторов; 2 – метод измерения объемных деформаций

Fig. 5 (the end). Dependence of long-term strength indicators under volume compression on the ultimate strength under uniaxial compression (a) and the brittleness coefficient K_f (b and c) [compiled by the authors]: 1 – method of spherical indenters; 2 – method of measuring volumetric deformations

Установлено, что прочность и хрупкость пород оказывают в различной мере влияние на показатели длительной прочности. Предложены зависимости для вычисления показателей паспорта длительной прочности при объемном сжатии от прочности и хрупкости.

Предлагаемые методы обладают широким диапазоном применения от слабых песчано-глинистых до крепких хрупких горных пород. Они доступны к применению в полевых

условиях на образцах неправильной формы.

Вклад авторов:

Петраков Д. Г., к.т.н. — анализ результатов исследования;

Коршунов В. А., к.т.н. — постановка задачи исследований;

Шоков А. Н., к.т.н. — выполнение работы по систематизации материала;

Карманский Д. А. — получение данных анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодкин Г. И., Мохначёв М. П., Кунтыш М. Ф. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. — М.: Недра, 1971. — 148 с.

2. Фисенко Г. Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. — М.: Недра, 1976. — 272 с.

3. Титов Б. В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Березники: ВНИИГ, Уральский филиал, 1983. — 18 с.

4. Zafar S., Hedayat A., Moradian O. Energy budget of brittle fracturing in granite under stress relaxation and creep // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57(2), pp. 921–943.

5. Чжао Х., Ван Х., Лю Ш., Чен Х., Чен Ч. Характеристики разрушения при сдвиговой ползучести мягких трещиноватых пород // ФТПРПИ. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 5. — С. 61–72. DOI: 10.15372/FTPRPI20240506.

6. Nyungu D., Stacey T. R. Time-dependent tensile strengths of Bushveld Complex rocks and implications for rock failure around mining excavations // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 114, pp. 765–772.

7. Павлович А. А., Хорева А. Ю. Определение прочностных свойств отвальной массы для оценки устойчивости отколов отвалов // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 55–61. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.

8. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022, vol. 37 (1), pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

9. Коврижных А. М., Барышников В. Д., Хмелинин А. П. Определение времени разрушения горных пород по деформационному критерию длительной прочности // ФТПРПИ. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 6. — С. 42–51. DOI: 10.15372/FTPRPI20230604.

10. Зуев Б. Ю., Истомин Р. С., Обожина Е. П. Физическое моделирование нелинейных геомеханических процессов при разработке калийных месторождений // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 75–80. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11.

11. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // *Eurasian Mining*. 2021, no. 2(36), pp. 3–7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01.

12. Поспехов Г. Б., Норова Л. П., Изотова В. А. Сравнение методов определения granulometric composition of gypsum-containing waste of neutralization of sulfuric acid with limestone // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 1729–1742. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1729-1742.

13. Дашко Р. Э., Лохматиков Г. А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 180–190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.
14. Hou R., Cui Q., Wu H., Shi Y. Creep behavior and long-term strength characteristics of pre-peak damaged sandstone under conventional triaxial compression // Scientific Reports. 2023, vol. 13, 3850. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31028-6>.
15. Wang J., Zhang Q., Song Z., Feng S., Zhang Y. Nonlinear creep model of salt rock used for displacement prediction of salt cavern gas storage // Journal of Energy Storage. 2022, vol. 48, article 103951. DOI: 10.1016/j.est.2021. 103951.
16. Bieniawski Z. T. The mechanism of brittle fracture of rock, parts I, II, III // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1967, vol. 4, pp. 396–435.
17. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. — М.: Недра, 1979. — 269 с.
18. Гудман Р. Механика скальных пород. — М.: Стройиздат, 1987. — 232 с.
19. Грищенко А. И., Семенов А. С., Мельников Б. Е. Моделирование процессов деформирования и разрушения керна при его извлечении с больших глубин // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 243–252. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8.
20. Асанов В. А., Паньков И. Л. Изучение особенностей деформирования соляных пород при длительном нагружении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 1. — С. 105–109.
21. Барях А. А., Ударцев А. А., Паньков И. Л. К оценке длительной прочности соляных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_5.
22. Осипов Ю. В., Вознесенский А. С. Исследование реологических свойств горных пород в экспериментах по ступенчатому нагружению цилиндрических образцов // Прикладная механика и техническая физика. — 2022. — Т. 63. — № 2(372). — С. 197–206. DOI: 10.15372/ PMTF20220219.
23. Шкуратник В. Л., Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 20–26. DOI: 10.15372/FTPRPI20190403.
24. Zha E., Zhang Z., Zhang R., Wu S., Li C., Ren L., Gao M., Zhou J. Long-term mechanical and acoustic emission characteristics of creep in deeply buried jinping marble considering excavation disturbance // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 139, art. 104603.
25. Aghajanzadeh M., Masoumi H., Heidarpour A., Alejano L. R. Estimating Time-to-Failure and Long-Term Strength of Rocks Based on Creep Strain Rate Model // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04088-x>.
26. Ударцев А. А., Паньков И. Л. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения // Горное эхо. — 2022. — № 4(89). — С. 54–59. DOI: 10.71242/echo.2022.4.9.
27. Lin H., Oh J., Canbulat I., Hebblewhite B., Masoumi H., Walsh S. Experimental study on borehole size effect and prediction of breakout initiation stress // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 142, art. 104762.
28. Wang Z., Shen M., Ding W., Jang B., Zhang Q. Time-dependent behavior of rough discontinuities under shearing conditions // Journal of Geophysics and Engineering. 2018, vol. 15, issue 1, pp. 51–61. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa83e9>.
29. Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969.
30. Протодьяконов М. М. Обобщенное уравнение огибающих к предельным кругам напряжений Мора // Исследование физико-механических свойств горных пород при-


менительно к задачам управления горным давлением. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. — С. 82–89.

31. Багаутдинов И. И., Беляков Н. А., Севрюков В. В., Рассказов М. И. Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород Яковлевского железорудного месторождения // Горный журнал. — 2022. — № 12. — С. 16–21. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03.

32. Korshunov V. A., Solomoichenko D. A., Bazhukov A. A. Strength Estimation of Fractured Rock Using Compression — A Specimen with Spherical Indenters // ISRM European Rock Mechanics Symposium — EUROCK 2018, 22–26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. 2018, vol. 1, pp. 299–305.

33. Якубовский М. М., Михайлова Е. А., Бажуков А. А. Обоснование эффективности применения фрезерных комбайнов селективной выемки для разработки угольных месторождений в условиях низких температур // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 42–57. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42.

34. Господариков А. П., Трофимов А. В., Куркин А. П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 539–548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87.

35. Агеев В. А. Обоснование оптимальных параметров экспресс-метода определения характеристик ползучести каменной соли: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2020. — 25 с. 

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петраков Дмитрий Геннадьевич¹ — канд. техн. наук, проректор по образовательной деятельности, Petrakov_DG@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0461-1621>;

Коршунов Владимир Алексеевич¹ — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Korshunov_VA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6330-0230>;

Шоков Анатолий Николаевич¹ — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Shokov_AN@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0735-2063>;

Карманский Даниил Александрович¹ — ведущий инженер, Karmanskiy_DA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3214-5322>.

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Для контактов: Коршунов В. А., e-mail: Korshunov_VA@pers.spmi.ru.

REFERENCES

1. Yagodkin G. I., Mokhnachev M. P., Kuntyshev M. F. Strength and deformability of rocks in loading. Moscow: Nauka, 1971, 148 p. [In Russ].

2. Fissenko G. L. The limiting state of rocks around workings. Moscow, Nedra, 1976, 272 p. [In Russ].

3. Titov B. V. Research and development of a method for determining the long-term strength of salt rocks under compression, Candidate's thesis, Berezniki, 1983, 18 p. [In Russ].

4. Zafar S., Hedayat A., Moradian O. Energy budget of brittle fracturing in granite under stress relaxation and creep. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57(2), pp. 921–943.

5. Zhao H., Wang H., Liu S., Chen H., Chen Ch. Characteristics of fracture during shear creep of soft fractured rocks. *Journal of Mining Science*. 2024, no. 5, pp. 61–72. DOI: 10.15372/FTPRPI20240506.

6. Nyungu D., Stacey T. R. Time-dependent tensile strengths of Bushveld Complex rocks and implications for rock failure around mining excavations. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 114, pp. 765–772.

7. Pavlovich A. A., Khoreva A. Yu. Determination of strength properties for slope stability estimate in dumps. *Gornyi zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 55–61. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.08.
8. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022, vol. 37 (1), pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
9. Kovrizhnykh A. M., Baryshnikov V. D., Khmelinin A. P. Determination of the time of rock destruction by the deformation criterion of long-term strength. *Journal of Mining Science*. 2023, no. 6, pp. 42–51. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20230604.
10. Zuev B. Yu., Istomin R. S., Obozhina E. P. Physical simulation of nonlinear geomechanical processes in potash ore mining. *Gornyi zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 75–80. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11.
11. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure mani festation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021, no. 2(36), pp. 3–7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01.
12. Posphehov G. B., Norova L. P., Izotova V. A. Comparing the methods of grain size analysis of gypsum-containing sulfuric acid wastes neutralized with limestone. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1729–1742. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1729-1742.
13. Dashko R. E., Lokhmatikov G. A. The Upper Kotlin clays of the SaintPetersburg region asa foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 180–190. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.
14. Hou R., Cui Q., Wu H., Shi Y. Creep behavior and long-term strength characteristics of pre-peak damaged sandstone under conventional triaxial compression. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, 3850. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31028-6>.
15. Wang J., Zhang Q., Song Z., Feng S., Zhang Y. Nonlinear creep model of salt rock used for displacement prediction of salt cavern gas storage. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 48, article 103951. DOI: 10.1016/j.est.2021. 103951.
16. Bieniawski Z. T. The mechanism of brittle fracture of rock, parts I, II, III. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1967, vol. 4, pp. 396–435.
17. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. Strength and deformability of rocks. Moscow, Nedra, 1979, 269 p. [In Russ].
18. Goodman R. Mechanics of rock formations. Moscow, Stroyizdat, 1987, 232 p. [In Russ].
19. Grishchenko A. I., Semenov A. S., Melnikov B. E. Modeling the processes of deformation and destruction of the rock sample during its extraction from great depths. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 243–252. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8.
20. Asanov V. A., Pankov I. L. Study of the deformation features of salt rocks under prolonged loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 1, pp. 105–109. [In Russ].
21. Baryakh A. A., Udartsev A. A., Pankov I. L. Estimating long-term strength in salt rocks. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024, no. 11, pp. 5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_5.
22. Osipov Yu. V., Voznesenskii A. S. Investigation of the rheological properties of rocks in experiments on stepwise loading of cylindrical samples. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2022, vol. 63, no. 2(372), pp. 197–206. [In Russ]. DOI: 10.15372/PMTF20220219.
23. Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Y. L. Stresses and temperature affecting acoustic emission and rheological characteristics of rock salt. *Fiziko-tekhnicheskije problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 4, pp. 20–26. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20190403.
24. Zha E., Zhang Z., Zhang R., Wu S., Li C., Ren L., Gao M., Zhou J. Long-term mechanical and acoustic emission characteristics of creep in deeply buried jinping marble considering excavation disturbance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 139, 104603.

25. Aghajanzadeh M., Masoumi H., Heidarpour A., Alejano L. R. Estimating Time-to-Failure and Long-Term Strength of Rocks Based on Creep Strain Rate Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04088-x>.

26. Udartsev A. A., Pankov I. L. Study of the nature of sylvinitic deformation under uniaxial compression under various loading conditions. *Gornoe ekho*. 2022, no. 4(89), pp. 54–59. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.4.9.

27. Lin H., Oh J., Canbulat I., Hebblewhite B., Masoumi H., Walsh S. Experimental study on borehole size effect and prediction of breakout initiation stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 142, 104762.

28. Wang Z., Shen M., Ding W., Jang B., Zhang Q. Time-dependent behavior of rough discontinuities under shearing conditions. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, vol. 15, issue 1, pp. 51–61, <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa83e9>.

29. Iljinit'skaya E. I., Teder R. I., Vatolin E. S., Kunt'ysh M. F. Properties of rocks and methods for their determination. Moscow, Nedra, 1969, 392 p. [In Russ].

30. Protodyakonov M. M. Generalized equation of envelopes to limiting circles of Mohr stresses. *Investigation of physical and mechanical properties of rocks in relation to the problems of rock pressure control*. Moscow, Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1962, pp. 82–89. [In Russ].

31. Bagautdinov I. I., Belyakov N. A., Sevryukov V. V., Rasskazov M. I. Hardening soil model in prediction of plastic deformation zone in soft rock mass of Yakovlevo iron ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 12, pp. 16–21. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03.

32. Korshunov V. A., Solomoichenko D. A., Bazhukov A. A. Strength Estimation of Fractured Rock Using Compression A Specimen with Spherical Indenters. *ISRM European Rock Mechanics Symposium EUROCK 2018*, 22–26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. 2018, vol. 1, pp. 299–305.

33. Yakubovskiy M. M., Mikhailova E. A., Mikhailova E. A., Bazhukov A. A. Reasons of efficiency of surface miners in selective coal cutting under low temperatures. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021, no. 10, pp. 42–57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42.

34. Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 539–548. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.87.

35. Ageenko V. A. Justification of the optimal parameters of the express method for determining the creep characteristics of rock salt, Candidate's thesis, Moscow, 2020, 25 p. [In Russ].

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Petrakov D. G.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Educational Activities, Petrakov_DG@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0461-1621>;

*Korshunov V. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Korshunov_VA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6330-0230>;

*Shokov A. N.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Shokov_AN@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0735-2063>;

*Karmanskiy D. A.*¹, Leading Engineer, Karmanskiy_DA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3214-5322>.

¹ Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

For contact: [Korshunov V. A.](mailto:Korshunov_VA@pers.spmi.ru), Korshunov_VA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 18.06.2025; получена после рецензии 04.10.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 18.06.2025; received after the review 04.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.