

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СЛАБЫХ ХРУПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

В. А. Коршунов¹, А. Н. Шоков¹, Д. Ю. Дорджиев², О. И. Черских³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: maok@bk.ru

² ООО «Восточная горнорудная компания», Москва, Россия

³ ООО «Солнцевский угольный разрез», Шахтерск, Россия

Аннотация: Проведены сопоставительные испытания пород средней и слабой прочности методами сосредоточенной нагрузки образцов, с реализацией многофункционального и упрощенного подходов к определению прочности. Установлено, что в пределах одного литологического типа влияние прочности и плотности породы на величину коэффициента хрупкости по прочности незначительно. Учитывая это, предлагается распространить методы испытаний образцов сосредоточенной нагрузкой на слабые хрупкие породы прочностью на растяжение менее 0,5 МПа. Выполнены исследования прочностных свойств горных пород угленосной толщи и коренных пород Солнцевского бурогоугольного месторождения по данным испытаний сосредоточенной нагрузкой. Определены средние значения коэффициента хрупкости слабых хрупких горных пород месторождения в состоянии природной влажности. Показано, что повышение влажности пород месторождения вызывает снижение прочности и уменьшение их хрупкости (уменьшение коэффициента хрупкости, в среднем, на 1–1,5). Разработана расчетная методика перехода от показателей прочности, определяемых методом Point Load Strength Test, к показателям, определяемым методом разрушения образцов сферическими инденторами. Предлагаются два варианта методики перехода. Первая направлена на реализацию схемы испытаний сферическими инденторами при замене нагрузочных элементов усеченными конусами с закруглениями. Вторая, упрощенная, основана на использовании данных испытаний методом Point Load Strength Test, которые дополняются сведениями о литологическом типе породы и построением корреляционных зависимостей для усредненных параметров. При этом допускается испытание образцов неправильной формы.

Ключевые слова: слабые хрупкие горные породы, сосредоточенная нагрузка, сферические инденторы, конусные инденторы, предел прочности, прочность при сосредоточенной нагрузке, хрупкость, влажность.

Для цитирования: 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.

Studying the strength properties of weak brittle rocks when testing a point load specimens

V.A. Korshunov¹, A.N. Shokov¹, D.Yu. Dordziev², O.I. Cherskikh³

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

² "East Mining Company" LLC, Moscow, Russia

³ "Solntsevsky coal mine" LLC, Shakhtersk, Russia

Abstract: Comparative tests of rocks of medium and weak strength using methods of concentrated loading of samples, implementing multifunctional and simplified approaches to determining strength, have been carried out. It was found that within the limits of one lithological type, the influence of rock strength and density on the value of the brittleness coefficient in strength is insignificant. Taking this into account, it is proposed to extend the methods of testing samples with a concentrated load to weak brittle rocks with a tensile strength of less than 0.5 MPa. Studies of the strength properties of rocks of the coal-bearing stratum and bedrock of the Solntsevo brown coal deposit have been performed according to the data of concentrated load tests. The average values of the fragility coefficient of weak brittle rocks of the deposit in a state of natural humidity are determined. It is shown that an increase in the humidity of weak brittle rocks of the deposit causes a decrease in strength and a decrease in their brittleness (a decrease in the fragility coefficient, on average, by 1–1.5). A calculation method has been developed for the transition from strength indicators determined by the Point Load Strength Test to indicators determined by the method of sample destruction using spherical indenters. Two options for the transition methodology are proposed. The first option implements a scheme of improved tests with spherical indenters when replacing the load elements with truncated conical platens with rounded ends. The second, simplified one, uses the data from Point Load Strength Test, which are supplemented with information about the lithological type of rock and use correlation dependencies for averaged parameters. In this case, the use of samples of irregular shape is allowed.

Key words: weak fragile rocks, point load, spherical indentors, spherically-truncated conical platens, strength limit, point load strength, brittleness, humidity.

For citation: Korshunov V.A., Shokov A.N., Dordziev D.Yu., Cherskikh O.I. Studying the strength properties of weak brittle rocks when testing a point load specimens. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11–1):97–115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_97.

Введение

Традиционным подходом к определению механических свойств горных пород является моделирование реальных геомеханических процессов в лабораторных условиях [1–3] путем проведения многочисленных прямых испытаний ненарушенных образцов цилиндрической формы и стандартных размеров [4, 5]. В случаях, когда проведение трудоемкого комплекса прямых определений механических свойств породы не представляется возмож-

ным, данные испытаний цилиндрических образцов дополняются данными, определяемыми косвенными методами на образцах полуправильной и неправильной формы [6, 7] или расчетным путем по корреляционным зависимостям, учитывающим характеристики ненарушенной породы [8–9]. Для породных массивов характерно одновременное протекание разнообразных процессов деформирования и разрушения в условиях сложного неоднородного напряженного состояния [10–12].

Сложный механизм разрушения породы [13–15] реализуется при лабораторных испытаниях образцов сосредоточенной нагрузкой (СН) путем соосного вдавливания встречно направленных инденторов [16, 17]. Применение подобных методов позволяет сократить объём испытаний за счёт повышения их информативности и снижения требований к размерам и форме образцов [18, 19]. Учитывая это, с целью повышения надежности и достоверности определения исходных данных расчетов при оценке устойчивости бортов разреза и откосов отвалов ООО «Солнцевский угольный разрез» проводится комплексная оценка прочности коренных пород и пород угленосной толщи. Она включает проведение лабораторных испытаний цилиндрических образцов прямыми методами и полевую оценку прочности образцов неправильной формы методом СН.

Стандартные методы испытания образцов СН — метод разрушения образцов сферическими инденторами (СИ) и его зарубежный аналог — Point Load Strength Test (PLT). Они основаны на упрощенной схеме нагружения образца путем вдавливания в породу стальных инденторов с учётом при разрушении образца отрывом только растягивающей составляющей напряжений. Из-за систематических погрешностей методик испытаний, вызванных упрощением реального механизма разрушения образца, данные, определяемые стандартными методами, значительно отличаются от истинных значений. В связи с необходимостью исправления погрешностей методик испытаний, выявленных в процессе их применения на практике, стандартные методы испытания СН нуждаются в модернизации. При этом различие параметров испытаний в расчетных методиках оценки прочности пород

создает проблемы при объединении экспериментальных данных, полученных различными методами испытаний. Учитывая это, актуальным является установление переходных зависимостей между показателями прочности, определяемыми различными методами испытания СН.

Область применения стандартных методов испытания СН ограничена скальными породами не ниже средней крепости. Учитывая эффективность подобных методов при оценке прочности пород различной структуры [19], актуальным является расширение области применения методов испытания СН на слабые хрупкие породы с пределом прочности на растяжение менее 0,5 МПа.

Стандартные методы испытания образцов

При разработке стандартных методов испытания образцов СН применен упрощенный подход к механизму разрушения образца при вдавливании в породу стальных инденторов. Он основан на теоретическом решении задачи о напряженном состоянии в упругом шаре, сжатом по диаметру СН [20–22]. Методы испытаний СН реализуются путем нагружения до раскалывания образца породы возрастающим усилием встречно направленными стальными инденторами (шариков или усеченных конусов, закругленных на конце).

При определении условного показателя прочности на растяжение — индекса прочности I_s — в соответствии со стандартным методом испытаний PLT используется формула вида:

$$I_s = K \frac{P}{D^2}, \quad (1)$$

где P — раскалывающая нагрузка, D — расстояние между точками приложения

нагрузки, K — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и соотношения размеров образца.

При определении условной прочности на растяжение σ_t методом разрушения образцов СИ формула (1) приводится к формуле (2) более общего вида:

$$\sigma_t = K_1 \frac{P}{S} \quad (2)$$

где S — площадь поверхности раскалывания образца (рис. 1); K_1 — коэффициент.

Для учета влияния масштабного фактора значения условной прочности на растяжение приводятся к значениям прочности образца с типовыми размерами: условная прочность на растяжение σ_t — к прочности $\sigma_{t(15)}$ образца с площадью поперечного сечения 15 см^2 (для отечественного метода), а индекс прочности I_S — к его значению $I_{S(50)}$ для образца диаметром 50 мм (для зарубежного аналога метода).

Соотношения между прочностными характеристиками породы (пределами прочности на растяжение, сжатие, срез и т. п.) зависят от ее литологических особенностей [23–25]. По данным прямых испытаний [26–28] коэффициент хрупкости K_f (отношение пределов прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ и растяжении σ_p [29, 30]), изменяется в широком интервале от 5 для мягких глинистых пород до 10 и более для крепких хрупких пород [27].

Для различных пород величина отношения между прочностью при сжатии $\sigma_{сж}$ и индексом прочности $I_{S(50)}$ колеблется в широком интервале от 15 до 50. Наиболее вероятный интервал величины $\sigma_{сж}/I_{S(50)}$ составляет от 16 до 24, при этом для слабых сланцев он может снижаться до 12 [31–33]. Сведения об уменьшении величины $\sigma_{сж}/I_{S(50)}$ для некоторых групп пород проч-

ностью $\sigma_{сж}$ менее 20 МПа приведены также в работах [34, 35].

Аналогичные результаты по данным испытаний горных пород методом нагружения СИ получены Г. В. Михеевым [4]. На их основе было предложено вычислять предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ через условное значение прочности при растяжении по корреляционным зависимостям, характерным для литологических типов, или установленным испытаниями на конкретных породах.

Однако предлагаемый международными обществами ISRM и ASTM стандартный метод испытания СН PLT не предусматривает определения прочности при растяжении, не учитывает влияния на прочность хрупкости породы. В частности, корреляция между условным показателем (индексом) прочности при испытаниях СН методом PLT и пределом прочности на сжатие не учитывает литологических особенностей пород и выражается формулой (3):

$$\sigma_{сж} = 24 I_{S(50)}. \quad (3)$$

Это затрудняет использование данных, полученных альтернативными методами.

Учитывая, что стандартные методы испытаний СН характеризуются невысокой точностью, в Санкт-Петербургском горном университете разработан многофакторный подход к определению показателей прочности твердых пород. Он основан на уточнённой схеме процесса разрушения образца в условиях сложного неоднородного напряжённого состояния. Сущность реализующего этот подход усовершенствованного метода испытаний заключается в нагружении встречно направленными СИ образца до его раскалывания, фиксации разрушающей

нагрузки P и площади поверхности разрушения образца S отрывом и в дополнительном (по сравнению со стандартным методом) измерении размеров зон разрушенной срезом породы F_i . Сложный механизм разрушения иллюстрируют схема испытания и внешний вид образца смолы после раскалывания (рис. 1) [19].

Согласно многофакторному подходу, предельное сопротивление срезу без нормальных напряжений C_0 при раскалывании образцов СИ вычисляется через замеренные значения растягивающих σ_t и сжимающих p составляющих напряжений на границах зон монолитной (S) и разрушенной (F_i) породы под инденторами:

$$\sigma_t = \frac{P}{S}, \quad (4)$$

$$p = \frac{P}{F_i}. \quad (5)$$

На паспорте прочности породы в координатах Мора этому предельному напряженному состоянию соответствует круг напряжений, пересекающий ось ординат в точке C_0 :

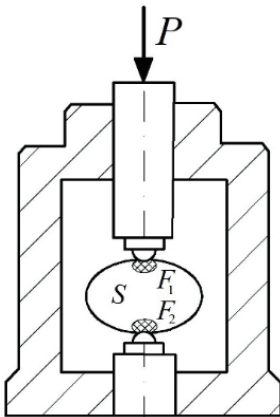
$$C_0 = \sqrt{\sigma_t p}. \quad (6)$$

Многофакторный подход учитывает взаимную связь параметров паспорта прочности с компонентами предельного сопротивления срезу в условиях сложного неоднородного напряженного состояния в образце, нагружаемом сферическими инденторами. Это позволяет по данным о C_0 (σ_t ; p) перейти к значениям пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии σ_p и $\sigma_{сж}$ [19]:

$$\sigma_{сж} = p + C_0, \quad (7)$$

$$\sigma_p = \frac{2p\sigma_t}{(p + \sigma_t)}. \quad (8)$$

а



б

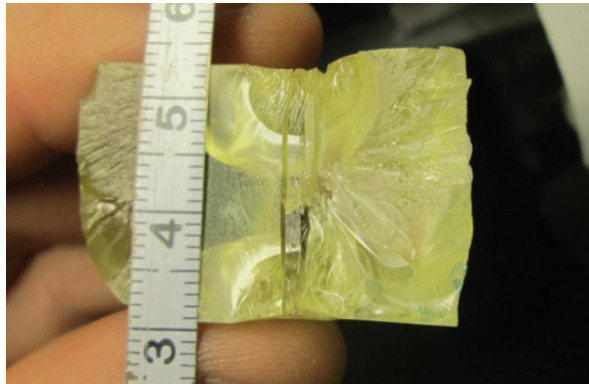


Рис. 1. Испытание сосредоточенной нагрузкой образца эпоксидной смолы: а – схема испытания образца [19]; б – образец после раскалывания [составлено авторами] (P – нагрузка; S – поверхность разрушения отрывом; F_i – поверхности разрушения срезом)

Fig. 1. Point load test of an epoxy resin specimen: а – specimen testing scheme [19]; б – specimen after splitting [compiled by authors] (P – load; S – failure surface by tear-off; F_i – failure surfaces by shearing)

Для повышения точности стандартного метода испытания по ГОСТ 24941 было предложено изменить значения переходных коэффициентов для вычисления прочности при одноосном сжатии с учетом литологического типа пород и скорректировать формулу для вычисления предела прочности при растяжении [19]:

$$\sigma_p \approx 1,8\sigma_t. \quad (9)$$

Экспериментальная часть Методика исследований

В ходе исследований были изучены следующие вопросы:

1. Влияние литологических особенностей породы на результаты испытаний СИ. Оценка параметров зависимостей между показателями прочности при одноосном сжатии и растяжении при СН слабых хрупких пород Солнцевского месторождения.

2. Оценка возможности применения стандартных методов испытаний образцов СН к слабым хрупким породам прочностью на растяжение менее 0,5 МПа.

3. Взаимная связь параметров прочности при испытаниях СН образцов методами разрушения СИ и PLT. Установление переходных зависимостей между показателями прочности, определяемыми методами испытания СН.

Для обеспечения представительности испытаний в отношении литологического состава и механизма разрушения выполнены сопоставительные испытания на раскалывание СН (СИ и усеченными конусами с закруглениями) и на одноосное сжатие более 300 проб различных разновидностей горных пород — от слабых и упруго-пластичных до прочных и хрупких (суглинки, супеси, глины, аргиллиты, алевролиты, мергели, известняки, угли,

соли, известняки и т. д.). При этом предел прочности при одноосном сжатии пород $\sigma_{сж}$ изменялся в широком интервале от 0,1 до 150 МПа, предел прочности при одноосном растяжении σ_p — от 0,05 до 20 МПа, коэффициент хрупкости K_f — от 4 до 12.

Испытания образцов пород СИ были проведены в соответствии с ГОСТ 24941 в нагрузочном устройстве БУ-11 (Россия), установленном в универсальной испытательной машине Insight 200 (USA), рассчитанной на создание сжимающего усилия до 200 кН. Приложение нагрузок к образцам осуществляли в соответствии с ГОСТ 24941 через стальные инденторы диаметром 10 и 15 мм с твердостью по Роквеллу HRC 60–65 единиц.

Испытания СН фрагментов кернов и кусков неправильной формы в соответствии с рекомендациями международного общества ISRM «Suggested Method for Determining Point Load Strength» были выполнены в устройстве Digital Point Load Test Apparatus 77–0115 (ELE International Soiltest Product Division, USA) с применением в качестве нагрузочных элементов усеченных конусов с углом 60° и закругленных на конце с диаметром 10 мм.

Испытания на сжатие были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 21153.2 в жестком нагрузочном устройстве БВ-21 на прессе, создающим сжимающее усилие до 1000 кН.

Результаты исследований

Влияние литологических особенностей породы на результаты испытаний

Для всего объема исследованных горных пород (более трехсот проб в широком интервале свойств) подтверждается отмеченная Хуком (Ноек) тенденция к снижению значений коэффициента хрупкости K_f при переходе от прочных хрупких метаморфических пород к слабым упруго-пластичным

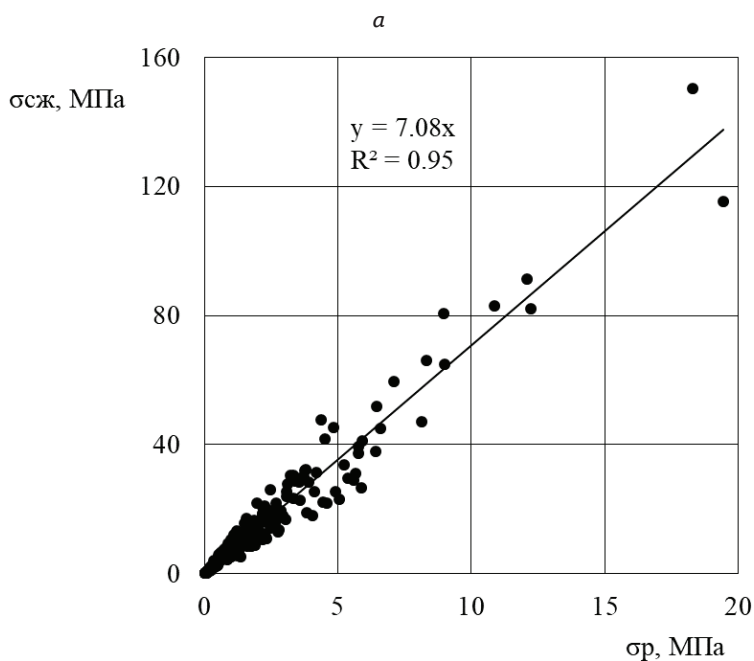


Рис. 2. Зависимость между показателями предельной прочности при одноосном растяжении σ_r и сжатии $\sigma_{сж}$ горных пород: а – в полном диапазоне; б – в диапазоне низких значений прочности [составлено авторами]

Fig. 2. Relationship between uniaxial tensile strength σ_r and compressive strength σ_c of rocks: а – in the full range; б – in the range of low strength values [compiled by the authors]

осадочным породам в интервале значений K_f от 10 до 5 при среднем значении, близком к 7 с $R^2=0,95$ (рис. 2). Однако, эта тенденция не очевидна при выделении конкретных литологических типов.

Установлено, что для пород одного литологического типа, как при высоких, так и при низких значениях прочности, характерны практически одинаковые значения коэффициента хрупкости K_f (рис. 3). При этом на величину K_f пород одного литологического типа не оказывает существенное влияние абсолютная величина прочности образцов и их плотность (рис. 4).

В настоящее время применение стандартных методов механических испытаний образцов СН к слабым хрупким породам прочностью менее 0,5 МПа, соответствующим значениям коэффициента крепости f не более 2, не предусмотрено.

К типичным породам этой категории относятся мягкие сланцы, пористые известняки, выветрелый песчаник, мел, каменная соль, гипс, мергель, каменный и бурый уголь, каменистый и щебенистый грунт, а также разновидности глин, супесей и суглинков.

В результате обработки данных сопоставительных испытаний более 300 проб горных пород в широком диапазоне свойств для выделенных разновидностей горных пород установлена линейная связь между значениями пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии (средний разброс данных около 20%). Эта связь весьма устойчива в широком интервале прочности от пород крепких и средней прочности до весьма слабых хрупких пород (рис. 2, 3). Это позволяет сделать вывод об обоснованности оценки предела прочности при одноосном сжатии по данным о прочности при растяжении, полученным методами СН,

с учетом сведений о литологическом типе породы, и служит основанием для расширения области применения метода испытаний СИ на слабые хрупкие породы.

Результаты испытаний слабых пород Солнцевского бурогоугольного месторождения

Солнцевское бурогоугольное месторождение располагается на западном побережье центральной части о. Сахалин, в Углегорском районе Сахалинской области. Угленосная толща перекрыта четвертичными отложениями, представленными глинами, суглинками, супесями, гравийно-галечниковыми отложениями. Коренные породы в основном представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами.

В результате обработки данных испытаний СН получены характерные значения физико-механических показателей для слабых хрупких пород Солнцевского бурогоугольного месторождения в состоянии природной влажности и в воздушно-сухом состоянии (табл.).

Установлено, что повышение влажности слабых хрупких пород месторождения вызывает не только снижение прочности, но также и уменьшение их хрупкости (коэффициента хрупкости K_f), в среднем, на 1–1,5. Аналогичный вывод сделан на основании результатов испытаний аргиллитов и алевролитов месторождения. Например, при увеличении влажности аргиллитов от 4 до 12% относительная прочность (отношение пределов прочности на сжатие в естественном и воздушно-сухом состоянии) уменьшилась от 0,65 до 0,4, а хрупкость K_f — от 8,5 до 6.

Учитывая экспериментальные данные испытаний СН, для оценки прочности при одноосном сжатии слабых хрупких горных пород Солнцевского

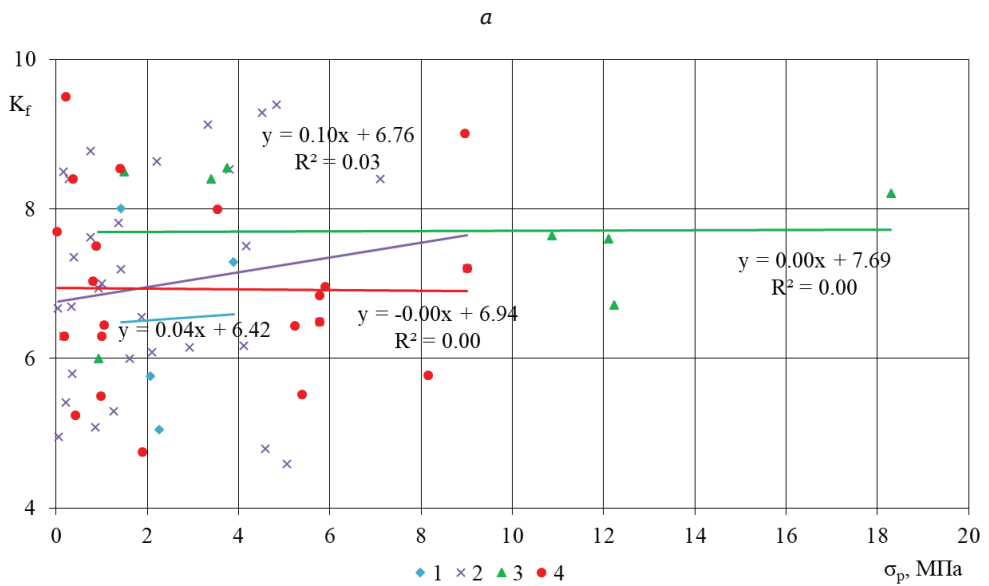


Рис. 3. Зависимость K_f от прочности при растяжении σ_p [составлено авторами]: 1 – мергель; 2 – аргиллит; 3 – известняк; 4 – алевролит; 5 – суглинок тяжелый пылеватый
 Fig. 3. Dependence of K_f on tensile strength σ_p [compiled by the authors]: 1 – marl; 2 – argillite; 3 – limestone; 4 – siltstone; 5 – heavy dusty loam

месторождения в состоянии природной влажности предлагается применять следующие средние значения коэффициента хрупкости K_f :

– для легких суглинков (пылеватых и песчаных) – $K_f=5,5$;

– для тяжелых пылеватых суглинков – $K_f=6$;

– для песчаных щебнистых супесей – $K_f=6$;

– для аргиллитов – $K_f=7$;

– для алевролитов – $K_f=8$.

Таблица

Показатели физико-механических свойств слабых пород Солнцевского бурогоугольного месторождения

Indicators of physical and mechanical properties of weak rocks of Solntsevskoye lignite deposit

Наименование породы	Состояние природной влажности				Воздушно-сухое состояние	
	ρ , г/см ³	W, %	$\sigma_{сж}$, МПа	K_f	$\sigma_{сж}$, МПа	K_f
Легкие пылеватые суглинки	1,8–1,9	22–36	0,15–0,60	5–7	3,25–6,03	6,3–8,5
Легкие песчанистые суглинки	1,9–2,15	10–35	0,13–0,75	5–8	3,13–3,49	7,7
Тяжелые пылеватые суглинки	1,75–1,9	25–35	0,15–0,75	4,5–7	2,96–4,65	6,1–7,8
Песчанистые щебенистые супеси	2,03	21	0,1–0,2	5,9	0,62–1,05	6,9–10,4

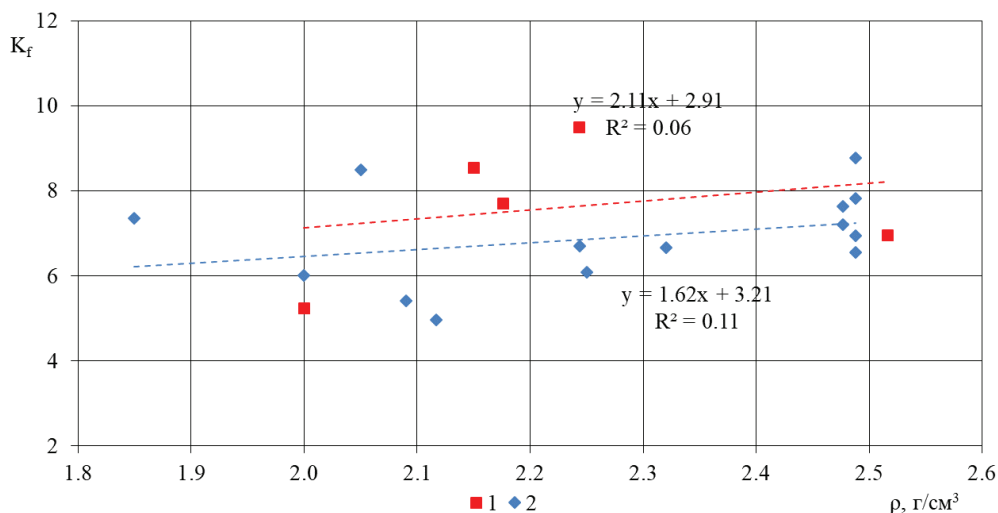


Рис. 4. Зависимость коэффициента хрупкости K_f от плотности ρ [составлено авторами]: 1 – алевролит; 2 – аргиллит

Fig. 4. Dependence of brittleness factor K_f on density ρ [compiled by the authors]: 1 – siltstone; 2 – mudstone

Переходные зависимости между показателями прочности, определяемыми методами испытания СН

С целью повышения информативности метода PLT и допустимости использования его экспериментальных данных для определения показателей прочности при растяжении и сжатии

разработана расчётная методика перехода от показателей прочности пород, определяемых методом PLT, к аналогичным показателям, определяемым стандартным методом разрушения образцов СИ.

Предлагаются два варианта методики перехода.

Первый вариант, предпочтительный, более точный, отличается многофункциональным подходом к испытаниям СН с учетом сложного механизма разрушения образца породы в условиях неоднородного напряженного состояния. Для испытаний может применяться оборудование с нагрузочными элементами в виде усеченных конусов с закруглениями диаметром 10 или 15 мм. Механические испытания монолитных образцов выполняются согласно схеме усовершенствованных испытаний СИ по методике, описанной в работе [19].

При реализации первого варианта переходной методики установлены ограничения, предъявляемые к размерам образцов и способу измерения в них площади поверхности разрыва. Во-первых, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24941 величина площади поверхности раскола ограничивается 10–25 см² при предпочтительной величине (15±3) см². Во-вторых, предлагается измерять фактическую площадь поверхности разрыва в испытанном образце в соответствии с ГОСТ 24941, а не её предполагаемую минимальную величину в соответствии с методом PLT.

Второй, упрощенный, вариант методики позволяет оценить параметры прочности по данным определения $I_s(50)$, выполненным в соответствии со стандартными методами испытаний ISRM или ASTM и дополненным литологическим описанием породы для приблизительной оценки показателя хрупкости K_f . При этом значение коэффициента хрупкости K_f^k предлагается принимать в соответствии с корреляционными зависимостями, приведенными в статье [19], или устанавливать путем проведения сопоставительных испытаний на конкретных породах.

Определение пределов прочности при одноосном растяжении σ_p и сжатии $\sigma_{сж}$ происходит следующим образом.

1) Выполняется пересчет значения $I_{s(50)}$ в значение условной прочности на растяжение $\sigma_{t(15)}$ образца с площадью поперечного сечения 15 см² с учетом масштабной поправки на размеры S (ГОСТ 21153.3) по формуле (10):

$$\begin{aligned}\sigma_{t(15)} &= I_{S(50)} \frac{KM}{\left(\frac{\pi}{4}\right)} = \\ &= 1.36 I_{S(50)},\end{aligned}\quad (10)$$

2) Вычисляется предел прочности при одноосном растяжении σ_p двумя возможными способами:

а) с учетом сведений о значении коэффициента хрупкости K_f (что предпочтительно) — по формуле

$$\begin{aligned}\sigma_p &= \sigma_{t(15)} \left(2 - \frac{1.4}{K_f}\right) = \\ &= I_{S(50)} \left(2.7 - \frac{1.9}{K_f}\right),\end{aligned}\quad (11)$$

б) при отсутствии сведений о K_f — по упрощенной формуле

$$\sigma_p \approx 1.8 \sigma_{t(15)} \approx 2.45 I_{S(15)} \quad (12)$$

3) Вычисляется предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}^k$ с учетом сведений о значении коэффициента хрупкости K_f породы:

$$\sigma_{сж}^k = K_f \sigma_p. \quad (13)$$

Экспериментальные данные сопоставительных испытаний образцов горных пород подтверждают обоснованность предложенного подхода для слабых хрупких пород. Об этом свиде-

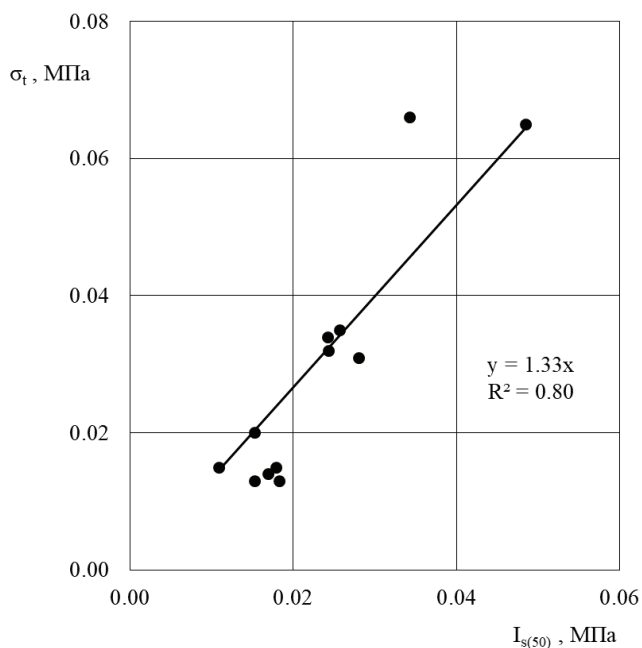


Рис. 5. Взаимосвязь показателей условной прочности при растяжении $I_{s(50)}$ и σ_t для суглинков [составлено авторами]

Fig. 5. Relationship between $I_{s(50)}$ and σ_t for loams [compiled by the authors]

тельствуют испытания проб, отобранных на Солнцевском угольном разрезе (рис. 5, 6). Разброс данных объясняется «условностью» отнесения проб к определенным разновидностям горных пород (литологическим типам) и различной природной влажностью проб.

Заклучение

1. Результаты сопоставительных испытаний более 300 проб пород средней и слабой прочности методами сосредоточенной нагрузки образцов, отличающимися многофункциональным и упрощенным подходами к определению прочности, свидетельствуют о том, что в пределах одного литологического типа влияние прочности и плотности породы на величину коэффициента хрупкости по прочности незначительно. Учитывая это, предлагается распространить методы

испытаний образцов сосредоточенной нагрузкой на слабые хрупкие породы прочностью на растяжение менее 0,5 МПа.

2. Выполнены исследования прочностных свойств горных пород угленосной толщи и коренных пород Солнцевского бурогоугольного месторождения по данным испытаний сосредоточенной нагрузкой. Экспериментально определены средние значения коэффициента хрупкости слабых хрупких горных пород месторождения в состоянии природной влажности. Установлено, что повышение влажности пород месторождения вызывает снижение прочности и уменьшение их хрупкости (уменьшение коэффициента хрупкости, в среднем, на 1–1,5).

3. Разработана расчётная методика перехода от показателей прочности пород, определяемых методом PLT,

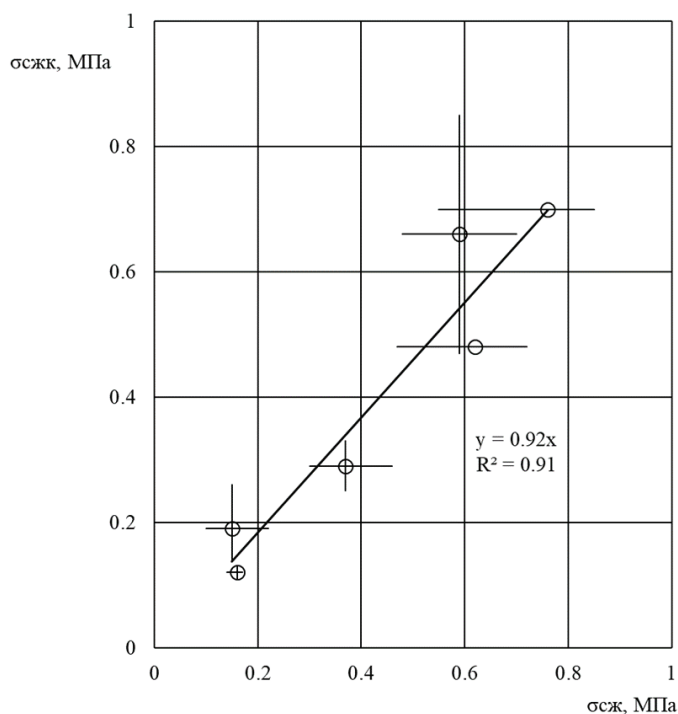


Рис. 6. Результаты сравнения экспериментального $\sigma_{сж}$ и расчетного $\sigma_{сжк}$ значений предела прочности при одноосном сжатии различных проб суглинков [составлено авторами]
 Fig. 6. Results of comparison of experimental $\sigma_{сж}$ and calculated $\sigma_{сжк}$ values of uniaxial compressive strength of different loam samples [compiled by the authors]

к аналогичным показателям, определяемым методом разрушения образцов СИ. Предлагаются два варианта методики перехода. Согласно первому, более точному, реализуется схема усовершенствованных испытаний образцов сферическими инденторами и допускается использование в качестве нагрузочных элементов усеченных конусов с закруглениями. Согласно второму варианту, упрощенному, используются окончательные данные испытаний методом PLT, которые дополняются сведениями

о литологическом типе породы. При этом допускается испытание образцов неправильной формы.

Вклад авторов:

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

Шоков А. Н., к.т.н. — получение данных анализа;

Дорджиев Д. Ю., к.т.н. — выполнение работы по систематизации материала;

Черских О. И., к.т.н. — анализ результатов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barton N., Shen B. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9, Iss. 2. pp. 210–225.

2. *Ismail M. K. A., Mohd-Nordin M. M., Hasan A. S. Md., Albar A., Razali M. N.* Shear strength behaviour of rock joint material influenced by different weathering grade. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1349. Iss. 1. N 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1349/1/012069.

3. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014.* International Society for Rock Mechanics, *Ulusay R.* (editor). Springer International Publishing Switzerland. 2015. DOI 10.1007/978-3-319-07713-0.

4. *Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б.* Прочность и деформируемость горных пород // М., Недра, 1979, 269 с.

5. *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.

6. *Li Y., Oh J., Mitra R., Canbulat I.* A Fractal Model for the Shear Behaviour of Large-Scale Opened Rock Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. Iss. 1, pp. 67–79. DOI: 10.1007/s00603-016-1088-8.

7. *Akram Deiminiat, Li Li, Feitao Zeng, Pabst T., Chiasson P., Chapuis R.* Determination of the Shear Strength of Rockfill from Small-Scale Laboratory Shear Tests: A Critical Review. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. ID 8890237. DOI: 10.1155/2020/8890237.

8. *Molina S. L., Bradfield L., Fityus S. G., Simmons J. V., Lizcano A.* Design of a 720-mm Square Direct Shear Box and Investigation of the Impact of Boundary Conditions on Large-Scale Measured Strength. *Geotechnical Testing Journal*. 2020. Vol. 43. Iss. 6. DOI: 10.1520/GTJ20190344.

9 *Протосеня А. Г., Иовлев Г. А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2020. No 5, С. 128–139. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139).

10. *Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Vilner M. A.* Study of the stress-strain state in the subrectangular tunnel. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Conference Proceedings. Series: Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer, 2020. Vol. 62. pp. 383–388.

11. *Господариков А. П., Трофимов А. В., Киркин 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.2021.2.8](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.8).

12. *Козырев А. А., Кузнецов Н. Н., Макаров А. Б.* О критериях удароопасности горных пород. *Горная промышленность*. 2023; (S1):00–00. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-00-00>.

13. *Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A.* Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises, *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development – Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM 2019, 2020*, С. 330–335.

14. *Trushko V. L., Protosenya A. G., Ochkurov V. I.* Prediction of the geomechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. Iss. 22. pp. 11095–11103.

15. *Жабко А. В.* Фундаментальные проблемы практической геомеханики и возможные пути их преодоления. *Известия Уральского государственного горного университета* 2018. Вып. 4(52). С. 90–107 doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-98-107.

16. *Franklin J. A.* Suggested Methods for Determining Points Load Strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985. Vol. 22. Iss. 2. Pp. 51–60. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.
17. *Kong F., Shang J. A.* Validation Study for the Estimation of Uniaxial Compressive Strength Based on Index Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51 (7). 2289–2297. doi.org/10.1007/s00603-018-1462-9.
18. *Bieniawski Z. T.* Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1974. Vol. 74. No 8, pp. 312–320.
19. *Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н.* Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал, 2023, No 5, С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
20. *Wang M., Zhang C., Xu W.* Study on the mechanical properties of anisotropic red sandstone under point load strength test and uniaxial compression strength. *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences* 2023. 9(2): 025–032. DOI: 10.17352/2455-488X.000064.
21. *Sahin M., Ulusay C., Karaki H.* Point load Strength Index of Half-Cut Core Specimens and Correlation with Uniaxial Compressive Strength. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, April 2020. 53 (8), 3745–3760. doi.org/10.1007/s00603-020-02137-9.
22. *Zhao R., Tao M., Cao W.* Strength and failure characteristics of marble spheres subjected to paired point loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, September 2023. 15 (9). 2282–2290. doi.org / 10.1016/ jrmge. 2022. 11. 019.
23. *Ильинов М. Д., Петров Д. Н., Колонтаевский Е. В., Страупник И. А.* Исследование возможности применения акрилатов в качестве заполнителя кейлькранца при разработке соляных толщ на больших глубинах. *Горный журнал*. 2023. No 8. С. 77–87. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.10.
24. *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.
25. *Kolapo P., Munemo P.* Investigation the correlations between point load strength index, uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength of sandstones. A case study of QwaQwa sandstone deposit. *International Journal of Mining Engineering*, 2021. Vol. 12, No. 1, pp. 67–83. DOI: 10.1504/IJMME. 2021. 114915.
26. *Singh H. K., Basu A.* Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 232. pp. 171–181.
27. *Hoek E.* Rock Mechanics Laboratory Testing in the Context of a Consulting Engineering Organization. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geotech. Abstract* 14 (1977), pp. 93–101.
28. *Ovalle C., Linero S., Dano C., Bard E., Hicher P.-Y., Osses R.* Data Compilation from Large Drained Compression Triaxial Tests on Coarse Crushable Rockfill materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020. Vol. 146, Iss. 9. 06020013. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002314.
29. *Зуев Б. Ю., Истомин Р. С., Обожина Е. П.* Физическое моделирование нелинейных геомеханических процессов при разработке калийных месторождений *Горный журнал*, 2023, No 5, С. 75–80 DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11.
30. *Stigsson M., Mas Ivars D.* A Novel Conceptual Approach to Objectively Determine JRC Using Fractal Dimension and Asperity Distribution of Mapped Fracture Traces.

Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52, pp. 1041–1054. DOI: 10.1007/s00603-018-1651-6.

31. *Kohno M., Maeda H.* Correlation between Point Load Strength Index and Physical Properties of Hydrothermally Altered Rocks. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 2018; 7(1): 1–13 doi: 10.5923/j.mining.2018.070.01.

32. *Alitalesh M., Mollaali M., Yazdani M.* Correlation between uniaxial strength and point load index of rocks. *Japanese Geotechnical Special Publication*. January 2016, 2(12): pp. 504–507. DOI: 10.3208/jgssp.IRN-08.

33. *Endait M., Juneja A.* New correlations between uniaxial compressive strength and point load strength of basalt. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 9, pp. 348–353 doi.org/ 10.1179/1939787914Y.0000000073.

34. *Zingano A. C.* Estimating Coal Strength Based on Historical Laboratory Tests and Geomechanics Classification. *Aspects Min. Miner. Sci.* 5(4). 2020. pp. 620–625. DOI: 10.31031/AMMS:2020.05.000618.

35. *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. – No 10. – С. 42–57. 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42. **ГИАБ**

REFERENCES

1. *Barton N., Shen B.* Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 9, Iss. 2. pp. 210–225.

2. *Ismail M. K. A., Mohd-Nordin M. M., Hasan A. S. Md., Albar A., Razali M. N.* Shear strength behaviour of rock joint material influenced by different weathering grade. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1349. Iss. 1. N 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1349/1/012069.

3. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. International Society for Rock Mechanics, Ulusay R. (editor). Springer International Publishing Switzerland. 2015. DOI 10.1007/978-3-319-07713-0.

4. *Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B.* Durability and deformability of rocks. Moscow: Nedra, 1979, 269 p. [In Russ].

5. *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.

6. *Li Y., Oh J., Mitra R., Canbulat I.* A Fractal Model for the Shear Behaviour of Large-Scale Opened Rock Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. Iss. 1, pp. 67–79. DOI: 10.1007/s00603-016-1088-8.

7. *Akram Deiminiat, Li Li, Feitao Zeng, Pabst T., Chiasson P., Chapuis R.* Determination of the Shear Strength of Rockfill from Small-Scale Laboratory Shear Tests: A Critical Review. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. ID 8890237. DOI: 10.1155/2020/8890237.

8. *Molina S. L., Bradfield L., Fityus S. G., Simmons J. V., Lizcano A.* Design of a 720-mm Square Direct Shear Box and Investigation of the Impact of Boundary Conditions on Large-Scale Measured Strength. *Geotechnical Testing Journal*. 2020. Vol. 43. Iss. 6. DOI: 10.1520/GTJ20190344.

9. *Protosenya A. G., Iovlev G. A.* Prediction of spatial stress-strain behavior of physically nonlinear soil mass in tunnel face area. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020. No 5, p. 128–139 [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–5-0–128–139.

10. *Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Vilner M. A.* Study of the stress-strain state in the subrectangular tunnel. Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Conference Proceedings. Series: Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer, 2020. Vol. 62. pp. 383–388.

11. *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.2021.2.8.

12. *Kozyrev A. A., Kuznecov N. N., Makarov A. B.* On criteria of rock burst hazard. Russian Mining Industry. 2023; (1 Suppl.):00–00. [In Russ]. <https://doi.org/10.30686/1609–9192–2023-S1–00–00>.

13. *Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A.* Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises, Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development – Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM 2019, 2020, C. 330–335.

14. *Trushko V. L., Protosenya A. G., Ochukurov V. I.* Prediction of the geomechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Iss. 22. pp. 11095–11103.

15. *Zhabko A. V.* Underlying problems of practical geomechanics and possible ways to overcome them. News of the Ural State Mining University. 2018. Iss. 4(52), pp. 98–107. [In Russ]. doi.org/10.21440/2307–2091–2018–4-98–107.

16. *Franklin J. A.* Suggested Methods for Determining Points Load Strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985. Vol. 22. Iss. 2. Pp. 51–60. DOI: 10.1016/0148–9062(85)92327–7.

17. *Kong F., Shang J.* A Validation Study for the Estimation of Uniaxial Compressive Strength Based on Index Tests. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. Vol. 51 (7). 2289–2297. doi.org/10.1007/s00603–018–1462–9.

18. *Bieniawski Z. T.* Estimating the strength of rock materials. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1974. Vol. 74. No 8, pp. 312–320.

19. *Ilinov M. D., Korshunov V. A., Pospekhov G. B., Shokov A. N.* Integrated experimental research of mechanical properties of rocks: Problems and solutions. Gornyi zhurnal, 2023, No 5, pp. 11–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.

20. *Wang M., Zhang C., Xu W.* Study on the mechanical properties of anisotropic red sandstone under point load strength test and uniaxial compression strength. Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences 2023. 9(2): 025–032. DOI: 10.17352/2455–488X.000064.

21. *Sahin M., Ulusay C., Karaki H.* Point load Strength Index of Half-Cut Core Specimens and Correlation with Uniaxial Compressive Strength. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, April 2020. 53 (8), 3745–3760. doi.org/10.1007/s00603–020–02137–9.

22. *Zhao R., Tao M., Cao W.* Strength and failure characteristics of marble spheres subjected to paired point loads. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, September 2023. 15 (9). 2282–2290. doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.019.

23. *Ilinov M. D., Petrov D. N., Kolonaevsky E. V., Straupnik I. A.* Usability of acrilates in damp proofing in deep-level salt mining. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No 8, pp. 77–87. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.10

24. *Dashko R. E., Lokhmatikov G. A.* The Upper Kotlin clays of the Saint-Petersburg region as a 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

25. *Kolapo P., Munemo P.* Investigation the correlations between point load strength index, uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength of sandstones. A case study of QwaQwa sandstone deposit. *International Journal of Mining Engineering*, 2021. Vol. 12, No. 1, pp. 67–83. DOI: 10.1504/IJMME. 2021. 114915.

26. *Singh H. K., Basu A.* Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 232. pp. 171–181.

27. *Hoek E.* Rock Mechanics Laboratory Testing in the Context of a Consulting Engineering Organization. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geotech. Abstract 14 (1977)*, pp. 93–101.

28. *Ovalle C., Linero S., Dano C., Bard E., Hicher P.-Y., Osses R.* Data Compilation from Large Drained Compression Triaxial Tests on Coarse Crushable Rockfill materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020. Vol. 146, Iss. 9. 06020013. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002314.

29. *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.

30. *Stigsson M., Mas Ivars D.* A Novel Conceptual Approach to Objectively Determine JRC Using Fractal Dimension and Asperity Distribution of Mapped Fracture Traces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. Vol. 52, pp. 1041–1054. DOI: 10.1007/s00603-018-1651-6.

31. *Kohno M., Maeda H.* Correlation between Point Load Strength Index and Physical Properties of Hydrothermally Altered Rocks. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 2018; 7(1): 1–13 doi: 10.5923/j.mining 2018 070.01.

32. *Alitalesh M., Mollaali M., Yazdani M.* Correlation between uniaxial strength and point load index of rocks. *Japanese Geotechnical Special Publication*. January 2016, 2(12): pp. 504–507. DOI: 10.3208/jgssp.IRN-08.

33. *Endait M., Juneja A.* New correlations between uniaxial compressive strength and point load strength of basalt. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 9, pp. 348–353 doi:.org/ 10.1179/1939787914Y.0000000073.

34. *Zingano A. C.* Estimating Coal Strength Based on Historical Laboratory Tests and Geomechanics Classification. *Aspects Min. Miner. Sci.* 5(4). 2020. pp. 620–625. DOI: 10.31031/AMMS: 2020.05.000618.

35. *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 Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):42–57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коршунов Владимир Алексеевич — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, maok@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6330-0230>;

Шоков Анатолий Николаевич — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), ntl2000@yandex.ru;

Дорджиев Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, руководитель геомеханической службы, ООО «Восточная горнорудная компания», Москва, Россия, dordzhiev@eastmining.ru;

Черских Олег Иванович — канд. техн. наук, директор, ООО «Солнцевский угольный разрез», Шахтерск, Россия.

Для контактов: *Коршунов В. А.*, e-mail: maok@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korshunov V. A., Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, maok@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6330-0230>;

Shokov A. N., Cand. Sci. (Eng.), Leading Senior Researcher, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, ntl2000@yandex.ru;

Dordzhiev D. Yu., Cand. Sci. (Eng.), Head of geomechanical service, “East Mining Company” LLC, Moscow, Russia, dordzhiev@eastmining.ru;

Cherskikh O. I., Cand. Sci. (Eng.), Director, “Solntsevsky coal mine” LLC, Shakhtersk, Russia;

Corresponding author: *Korshunov V. A.*, e-mail: maok@bk.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 08.10.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 08.10.2024; accepted for printing 10.10.2024.

