

ОБОБЩЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СВЕДЕНИЙ О КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ С ИНЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ГОРНЫХ ПОРОД

А.Б. Жабин¹, А.В. Поляков², Е.А. Аверин³, Ю.Н. Линник⁴, В.Ю. Линник⁴

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² ООО «Экспертиза промышленной безопасности», Тула, Россия, e-mail: polyakoff-an@mail.ru

³ ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод», Тула, Россия

⁴ Государственный университет управления, Москва, Россия

Аннотация: Дан обзор методов испытания горных пород в России и за рубежом для получения предела прочности на сжатие, корреляции этого показателя с другими свойствами горных пород и направлений развития научных исследований в области его определения путем компьютерного моделирования. Показано, что отечественный метод испытания горных пород отличается от наиболее распространенного зарубежного геометрическими размерами испытываемого образца. Приведены краткие обзоры на результаты исследований по выявлению корреляционных взаимосвязей между пределом прочности на сжатие и такими величинами как предел прочности на растяжение, контактная прочность, откольная прочность, индекс точечной нагрузки, твердость по Шмидту, скоростью распространения ультразвуковых волн сжатия. Наибольшая корреляция наблюдается с показателем твердости по Шмидту, однако и с другими показателями связь довольно тесная. Учитывая, что индекс точечной нагрузки и твердость по Шмидту в России пока не получили широкого распространения, приводятся краткие сведения об этих показателях и методах их определения. Особый интерес представляет обзор актуальных исследований в области прогнозирования значений предела прочности на сжатие путем компьютерного моделирования.

Ключевые слова: горные породы, предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение, индекс точечной нагрузки, твердость по Шмидту, корреляция между показателями прочности.

Для цитирования: Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Обобщение современных сведений о корреляционных зависимостях предела прочности на сжатие с иными прочностными показателями горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_5.

Generalization of up-to-date information on correlation dependences of ultimate compressive strength and other strength characteristics of rocks

A.B. Zhabin¹, A.V. Polyakov², E.A. Averin³, Yu.N. Linnik⁴, V.Yu. Linnik⁴

¹ Tula State University, Tula, Russia

² LLC «Expertise of Industrial Safety», Tula, Russia, e-mail: polyakoff-an@mail.ru

³ LLC «Skyratovsky Experimental Plant», Tula, Russia

⁴ State University of Management, Moscow, Russia

Abstract: The compression testing methods effective in Russia and abroad are reviewed with the purpose of correlating the ultimate compressive strength with the other properties of rocks and for expanding research in the area of computer modeling of the ultimate compressive strength. The Russian approach to rock testing differs from the common foreign approach in dimensions of the test specimens. A brief overview of research findings on correlation dependences between the ultimate compressive strength, ultimate tensile strength, contact strength, shearing strength, point load index, Schmidt hardness and the ultrasonic compression wave velocity is presented. The highest correlation is observed in case of the Schmidt hardness, though the connection with the other characteristics is also rather tight. Since the point load index and the Schmidt hardness have found narrow attention in Russia yet, this article offers summary information on these characteristics and their determination. A particular interest lies in reviewing the present-date research in the area of prediction of the ultimate compressive strength values by computer modeling.

Key words: rocks, ultimate compressive strength, ultimate tensile strength, point load index, Schmidt hardness, correlation of strength characteristic.

For citation: Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Generalization of up-to-date information on correlation dependences of ultimate compressive strength and other strength characteristics of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_5.

Введение

Изучение горных пород является необходимым для развития горнодобывающей промышленности, горно-перерабатывающей промышленности, строительства и т.д. Особенно активно это научное направление развивалось в последние десятилетия, что привело к появлению множества показателей, характеризующих отдельные свойства горных пород или их комплексы, а также установлению различного рода зависимостей между показателями свойств горных пород, а также свойств пород с показателями эффективности ведения горных работ [1 – 5].

Основные показатели физико-технических свойств горных пород и методы их определения, применяемые в международной практике, собраны в двух книгах [1, 2], подготовленных Международным бюро геомеханики (англ. ISRM – International Society for Rock Mechanics). Среди них выделяется показатель сопро-

тивления горных пород разрушению при одноосном сжатии $\sigma_{ск}$, который является наиболее общей характеристикой прочностных свойств.

Актуальные методы испытаний горных пород на сжатие в России и за рубежом

Основным методом испытаний горных пород на сжатие является метод строительной механики, сущность которого заключается в непосредственном определении максимального напряжения, предшествующего разрушению образца правильной геометрической формы при его одноосном нагружении. Одноосное сжатие образцов цилиндрической, кубической или призматической форм осуществляется нагружением вдоль оси равномерно распределяемым усилием F , которое увеличивают до разрушения образцов (рис. 1).

В настоящее время в России проведение испытаний горных пород на

одноосное сжатие регламентируется ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Стандарт распространяется на твердые (скальные и полускальные) горные породы и устанавливает методы определения предела прочности при одноосном сжатии. При этом ГОСТом предусмотрено два вари-

анта проведения испытаний. В то же время за рубежом широко распространен вариант определения предела прочности горных пород на сжатие по методу ISRM.

В табл. 1 приведены основные особенности перечисленных методов.

Массовое определение предела прочности на сжатие на образцах правиль-

Таблица 1

Основные особенности различных методов для определения предела прочности горных пород на сжатие

Major difference of ultimate compressive strength test methods

Метод	Параметры образца горной породы	Некоторые особенности метода
ISRM	Диаметр образца $d = 40 - 50$ мм; отношение высоты образца к диаметру $h/d = 0,9 - 1,1$. Торцевые поверхности шлифуют, они должны быть строго параллельны друг другу и перпендикулярны к образующим цилиндра.	Образец размещают между нагрузочными дисками, имеющими твердость по Роквеллу не менее HRC58. Нагрузочная машина оснащается сферическим центрирующим устройством. Скорость нагружения $0,5 - 1,0$ МПа/с. Предел прочности рассчитывается путем деления максимальной нагрузки, переносимой образцом во время испытания, на исходную величину площадь поперечного сечения.
ГОСТ 21153.2-84 (вариант 1)	Образцы правильной призматической или цилиндрической формы со стороной квадрата или диаметром 42 ± 2 мм. Торцевые поверхности образцов шлифуют, и они должны быть параллельны друг другу (отклонение не более $0,4$ мм) и перпендикулярны к образующим цилиндра (отклонение $1,0$ мм).	В процессе испытаний образец устанавливают в центре между стальными плитами прессы с центрирующим устройством и нагружают до разрушения. Скорость нагружения $1 \dots 3$ МПа/с. Предел прочности определяется по формуле $\sigma_{сж} = K_B \cdot (F_{max} / S_0)$, где F_{max} — разрушающая нагрузка, кН; S_0 — площадь поперечного сечения образца, $см^2$; K_B — безразмерный коэффициент высоты образца.
ГОСТ 21153.2-84 (вариант 2)	Образцы-плитки в виде дисков с размерами: диаметр от 30 до 100 мм; высота от 10 до 12 мм (для пород с пределом прочности при одноосном сжатии не более 120 МПа) либо от $7,5$ до $8,5$ мм (для пород с пределом прочности при одноосном сжатии свыше 100 МПа). Торцевые поверхности образца должны быть плоскими и параллельными друг другу.	Метод распространяется на породы с пределом прочности при одноосном сжатии от 10 до 150 МПа. Образец размещают между пуансонами нагрузочного устройства. Образец нагружают через пуансоны равномерно до разрушения со скоростью $0,1 - 0,5$ кН/с. Значение предела прочности вычисляют по формуле $\sigma_{сж} = (P / S_y) \cdot 10$, где P — разрушающая образец сила, кН; S_y — условная площадь поперечного сечения образца, $см^2$.

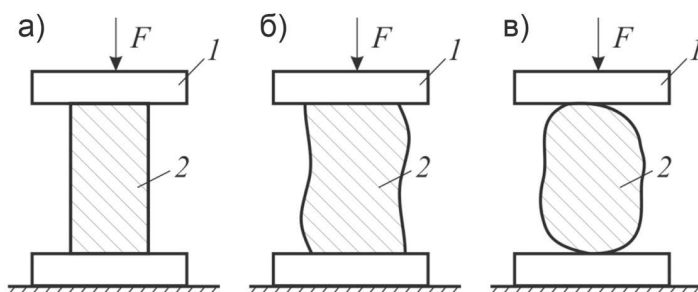


Рис. 1. Схемы испытаний на сжатие образцов горных пород цилиндрической (а), полуправильной (б) и произвольной (в) форм: 1 – давящие плиты; 2 – образец горной породы

Fig. 1. Compression test patterns of different-shape rock specimens: cylindrical (a); semiregular (b); arbitrary (v); 1 – pressing plates; 2 – rock specimen

ной формы затрудняется относительно большой трудоемкостью их подготовки, а также с длительностью операций, с применением квалифицированного труда и громоздкого оборудования. Более того, из многих слабых и трещиноватых аргиллитов, алевролитов, ряда марок углей и других пород практически невозможно изготовить образцы правильной геометрической формы. Они разрушаются еще в процессе их изготовления. Поэтому на слабых горных породах и углях определение прочностных и деформационных характеристик не производится. Между тем для проектирования исполнительных органов горных машин и такие породы представляют практический интерес.

Разные исследователи, применявшие этот метод, сопоставляли величины пределов прочности горных пород при сжатии, полученные на образцах правильной и полуправильной кубических форм, и пришли к заключению, что показатели довольно близки друг другу [6].

Корреляционные связи с деформирующими параметрами

Поскольку проведение опытов по определению прочностных свойств горных пород является трудоемким, а для технико-экономического обоснования за-

частую требуется несколько показателей физико-механических свойств при, как правило, ограниченном количестве образцов, многие специалисты проводили исследования по установлению взаимосвязей между различными показателями физико-механических и физических свойств. При этом свойства горных пород можно условно разделить на те, для установления которых требуется произвести деформирование (вплоть до разрушения) образца, и те, для получения которых деформированию образцов не требуется. Наиболее целесообразным способом для этого является установление корреляционных зависимостей по результатам обширных экспериментов.

В России широко распространены показатели контактной прочности P_k и откольной прочности $P_{отк}$, которые практически не знакомы зарубежным исследователям. Для них получены следующие корреляционные зависимости с пределом прочности на сжатие:

$$P_k = 13 \cdot \sigma_{СК}^{0,94}; \quad (1)$$

$$P_{отк} = 4,22 \cdot \sigma_{СК}^{1,25}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) являются, по сути, единственными зависимостями, связывающими показатели контактной и откольной прочности с пределом прочности на сжатие. Это можно объяснить тем, что достаточно масштабные иссле-

дования для установления взаимосвязей между различными свойствами горных пород в нашей стране проводились в рамках только одной научной школы — ИГД им. А.А. Скочинского. В то же время за рубежом подобные исследования проводились разными исследователями в разных странах и лабораториях, что привело к существованию множества эмпирических зависимостей, как будет показано далее.

К основным показателям прочности горных пород, кроме непосредственно $\sigma_{сж}$, относятся также предел прочности на растяжение σ_p , индекс точечной нагрузки $I_{s(50)}$ и твердость по Шмидту R_L .

Предел прочности на растяжение в России хорошо известен, и для его определения существует ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении». Поэтому не будем останавливаться на нем подробно, а просто приведем наиболее известные выражения, связывающие пределы прочности горных пород на сжатие и растяжение. Они представлены в табл. 2.

Показатель $I_{s(50)}$ в России практически не известен, поэтому рассмотрим его несколько подробнее. Описание методики для определения этой величины по рекомендациям ISRM приведено в работе [8].

Испытаниям могут подвергаться образцы горных пород в форме цилиндров, параллелепипедов или неправильной формы без какой-либо специальной предобработки. Образцы разрушаются путем приложения концентрированной нагрузки через пару сферически усеченных конических пуансонов, находящихся на одной оси по разные стороны от образца. Расстояние между пуансонами регулируется в диапазоне 15–100 мм, чтобы позволять проводить опыты на образцах различных размеров. В процессе испытания пуансоны должны оставаться соосными в пределах $\pm 0,2$ мм. Угол конусности пуансонов должен составлять 60° , а радиус скругления их наконечников 5 мм.

Образец нагружается через валики до тех пор, пока не произойдет его разрушение. При этом тест считается действительным только если плоскость(и) разрушения проходят через обе точки приложения нагрузки, то есть в случае разрушения сколом фрагмента образца с одной из сторон, тест считается недействительным, а его результаты не засчитываются. Измеряется в кН нагрузка F , при которой произошло разрушение.

Далее показатель индекса точечной нагрузки в МПа вычисляется по формуле

Таблица 2

Корреляционные зависимости между $\sigma_{сж}$ и σ_p [7]
Correlation dependences of $\sigma_{сж}$ and σ_p [7]

Год	Автор(ы)	Горные породы	Уравнение	R^2
1999	Тугрул и Зариф	19 образцов гранита	$\sigma_{сж} = 6,67 \cdot \sigma_p + 4,67$	—
2004	Гоксеоглу и Зорлу	—	$\sigma_{сж} = 6,8 \cdot \sigma_p + 13,5$	0,42
2010	Алтындаг и Гюней	Различные типы горных пород, преимущественно известняк	$\sigma_{сж} = 12,38 \cdot \sigma_p^{1,0725}$	0,81
2011	Тахир и др.	15 образцов известняка	$\sigma_{сж} = 7,53 \cdot \sigma_p$	0,44
2013	Назир и др.	20 образцов известняка	$\sigma_{сж} = 9,25 \cdot \sigma_p^{0,947}$	0,9
2015	Караман и др.	37 образцов базальта и известняка	$\sigma_{сж} = 24,301 + 4,874 \cdot \sigma_p$	0,9

$$I_{s(50)} = \frac{F}{D_e^2} \cdot \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45}, \quad (3)$$

D_e – эквивалентный диаметр образца, мм.

В случае проведения испытаний на образцах цилиндрической формы с приложением нагрузки по оси цилиндра эквивалентный диаметр D_e равняется диа-

Таблица 3

Корреляционные зависимости между $\sigma_{сж}$ и $I_{s(50)}$ [7, 9]
Correlation dependences of σ_{com} and $I_{s(50)}$ [7, 9]

Год	Автор(ы)	Горные породы	Уравнение	R^2
1972	Брох и Франклин	–	$\sigma_{сж} = 23,7 \cdot I_{s(50)}$	–
1975	Биениавски	Различные типы горных пород	$\sigma_{сж} = 23 \cdot I_{s(50)}$	–
1991	Гхош и Сривастава	22 образца гранита	$\sigma_{сж} = 16 \cdot I_{s(50)}$	–
1996	Чоу и Вонг	21 образец гранита и туфа	$\sigma_{сж} = 12,5 \cdot I_{s(50)}$	0,53
1997	Смит	75 образцов известняка и песчаника	$\sigma_{сж} = 14,3 \cdot I_{s(50)}$	–
1999	Тугрул и Зариф	19 образцов гранита	$\sigma_{сж} = 15,25 \cdot I_{s(50)}$	0,96
2001	Кахраман	27 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 8,41 \cdot I_{s(50)} + 9,51$	0,72
2001	Сулукуц и Улусай	23 образца горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 15,31 \cdot I_{s(50)}$	0,69
2004	Тсиамбаос и Сабатакакис	188 образцов известняка, песчаника и мергеля	$\sigma_{сж} = 7,3 \cdot I_{s(50)} + 1,71$	0,82
2005	Кахраман и др.	38 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 10,22 \cdot I_{s(50)} + 24,31$	0,75
2005	Фенер и др.	11 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 9,08 \cdot I_{s(50)} + 39,32$	0,74
2006	Басу и Айдин	40 образцов гранита	$\sigma_{сж} = 18 \cdot I_{s(50)}$	0,97
2007	Агуставийая	39 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 13,4 \cdot I_{s(50)}$	0,89
2008	Ыилмаз и Юксек	39 образцов гипса	$\sigma_{сж} = 12,4 \cdot I_{s(50)} - 9,0859$	0,81
2009	Диамантис и др.	32 образца серпентинита	$\sigma_{сж} = 19,79 \cdot I_{s(50)}$	0,74
2010	Басу и Камран	15 образцов сланца	$\sigma_{сж} = 11,103 \cdot I_{s(50)} + 7,66$	0,74
2011	Тахир и др.	15 образцов известняка	$\sigma_{сж} = 21,691 \cdot I_{s(50)}$	0,30
2012	Кохно и Маеда	44 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 16,4 \cdot I_{s(50)}$	0,85
2012	Мишра и Басу	60 образцов гранита, сланца и песчаника	$\sigma_{сж} = 14,63 \cdot I_{s(50)}$	0,88
2013	Ли и Вонг	Мета-алевролиты	$\sigma_{сж} = 19,83 \cdot I_{s(50)}$	–
2014	Кахраман	32 образца пирокластических горных пород различных	$\sigma_{сж} = 14,68 \cdot I_{s(50)} - 8,67$	0,77
2015	Момени и др.	106 образцов известняка, гранита, сланца	$\sigma_{сж} = 13,54 \cdot I_{s(50)} + 14,93$	0,55

метру цилиндра, в противном случае эта величина вычисляется по формуле

$$D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \quad (4)$$

где A — минимальное значение площади поперечного сечения образца между двумя точками приложения нагрузки, мм².

В табл. 3 приведены корреляционные выражения, полученные различными исследователями на различных горных породах, связывающие предел прочности горных пород на сжатие с индексом точечной нагрузки $I_{s(50)}$.

Показатель твердости по Шмидту также плохо известен в России, поэтому приведем краткие сведения о нем. Подробное описание методики для определения этой величины по рекомендациям ISRM приведено в работе [10].

Аппарат для испытаний горных пород на твердость по Шмидту представляет собой подпружиненный поршень, который высвобождается, когда плунжер прижимается к поверхности, как показано на рис. 2.

Воздействие поршня на плунжер с энергией 0,735 или 2,207 Дж (в зависимости от типа аппарата) переносит энергию на образец горной породы. Степень, в которой эта энергия восстанавливается, зависит от твердости породы, которая выражается в процентах как отношение длины пружины после спуска поршня (отскока) к длине пружины в максимально растянутом состоянии до момента выпуска поршня. Образцы горных пород должны иметь форму правильных цилиндров или параллелепипедов с гладкими поверхностями без видимых нарушений сплошности (трещины, поры, каверны и т.п.). Длина образца должны быть не менее 55 мм, а толщина в точке приложения нагрузки — не менее 100 мм. Направление воздействия плунжера должно быть примерно перпендикулярным к поверхности образца (отклонение не должно превышать 5°). Образец должно быть надежно закреплен на стальной раме, вес которой не может быть менее 20 кг, с твердой ровной поверхностью, в которой прорезывается углубление для ус-

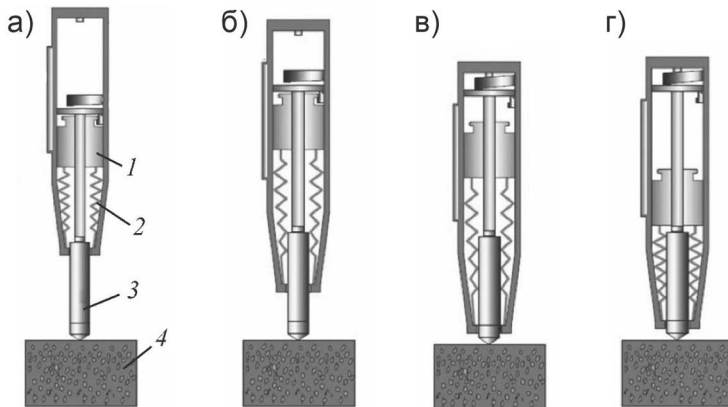


Рис. 2. Аппарат для испытаний горных пород на твердость по Шмидту в разных фазах работы: предварительная установка (а); прижатие прибора к поверхности (б); спуск плунжера (бойка) (в); удар бойка по индентору и отскок (г); 1 — боек; 2 — ударная пружина; 3 — индентор (ударный плунжер); 4 — образец горной породы

Fig. 2. Schmidt hardness testing facility in different working phases: setting (a); forcing down (b); piston falling (v); blow on the indenter and piston recoil (g); 1 — piston; 2 — shock spring; 3 — indenter (percussion ram); 4 — rock specimen

тановки в него образца, в случае если образец цилиндрической формы. Рекомендуемое количество опытов не менее 10, если значения показателя твердости варьируются в пределах ± 2 от среднего значения, или не менее 20 опытов в противном случае.

В табл. 4 приведены корреляционные выражения, полученные различными исследователями на различных горных породах, связывающие предел прочности горных пород на сжатие с твердостью по Шмидту R_L .

Исходя из данных в табл. 2 – 4, можно сделать следующие выводы. Большинство выражений имеют вид линей-

ных зависимостей. Причем почти все корреляционные связи предела прочности на сжатие с индексом точечной нагрузки имеют такой вид, в то время как для связей $\sigma_{сж}$ с твердостью по Шмидту более характерными являются нелинейные выражения, в частности, степенные и экспоненциальные. При этом нелинейные зависимости, как правило, являются более устойчивыми (индексы детерминации R^2 у них выше), что согласуется с выводами, сделанными в работе [11]. В целом, наименее устойчивые связи установлены для пары величин $\sigma_{сж} - I_{s(50)}$, а наиболее устойчивые – для пары $\sigma_{сж} - R_L$. Таким образом, в корреля-

Таблица 4

Корреляционные зависимости между $\sigma_{сж}$ и R_L [7, 9, 12]

Correlation dependences of $\sigma_{сж}$ and R_L [7, 9, 12]

Год	Автор(ы)	Горные породы	Уравнение	R^2
1973	Ауфмус	25 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 0,33 \cdot (R_L \cdot \rho)^{1,35}$	0,80
1989	О'Рурк	Песчаник, алевролит, известняк	$\sigma_{сж} = 4,85 \cdot R_L - 76,18$	0,77
1990	Сацхпазис	33 образца различных карбонатных горных пород	$\sigma_{сж} = 4,29 \cdot R_L - 67,52$	0,96
1990	Каргилл и Шакур	Карбонатные горные породы	$\sigma_{сж} = 18,17 \cdot \exp(0,02 \cdot \rho \cdot R_L)$	0,98
1999	Тугрул и Зариф	19 образцов гранита	$\sigma_{сж} = 8,36 \cdot R_L - 416$	0,87
2002	Ыилмаз и Сендир	20 образцов гипса	$\sigma_{сж} = \exp(0,82 + 0,06 \cdot R_L)$	0,98
2004	Ясар и Эрдоган	Карбонатные горные породы, песчаник, базальт	$\sigma_{сж} = 0,000004 \cdot R_L^{4,29}$	0,89
2005	Айдин и Басу	Гранит	$\sigma_{сж} = 1,4459 \cdot \exp(0,0706 \cdot R_L)$	0,92
2008	Килич и Теймен	Горные породы различных типов	$\sigma_{сж} = 0,0137 \cdot R_L^{2,2721}$	0,93
2008	Кобаноглу и Селик	Известняк, песчаник, цементный раствор	$\sigma_{сж} = 6,59 \cdot R_L - 212,6$	0,65
2009	Гупта	Гранит	$\sigma_{сж} = 1,15 \cdot R_L - 15$	0,95
2009	Гупта	Кварцит	$\sigma_{сж} = 0,64 \cdot R_L + 37,5$	0,98
2009	Гупта	Мрамор	$\sigma_{сж} = 14,1 \cdot R_L - 642$	0,89
2009	Ягиз	9 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 0,0028 \cdot R_L^{2,584}$	0,85
2013	Назир и др.	20 образцов известняка	$\sigma_{сж} = 12,83 \cdot \exp(0,0487 \cdot R_L)$	0,95
2013	Минаеиан и Ахангари	Слабые конгломератные горные породы	$\sigma_{сж} = 0,678 \cdot R_L$	0,93

ционных зависимостях наилучшим предиктором величины предела прочности на сжатие является показатель твердости горных пород по Шмидту, несмотря на его существенные отличия от других показателей прочностных свойств горных пород, таких как отсутствие полного разрушения образца в процессе испытаний. Вместе с тем, хотя испытания горных пород на твердость по Шмидту редко приводят к разрушению образцов, тем не менее, исключать возникновение трещин или прочих нарушений структу-

ры горных пород нельзя, поэтому этот метод относится к деформирующим.

Корреляционные связи с недеформирующими параметрами

Как указано в предыдущем разделе настоящей статьи, даже если контактные методы испытаний не приводят к разрушению образцов горных пород, как правило, они ведут к различным деформациям, что зачастую не позволяет проводить на данных образцах испытания по

Таблица 5

Корреляционные зависимости между $\sigma_{сж}$ и V_p [7, 9]
Correlation dependences of $\sigma_{сж}$ and V_p [7, 9]

Год	Автор(ы)	Горные породы	Уравнение	R^2
1999	Тугрул и Зариф	19 образцов гранита	$\sigma_{сж} = 35,54 \cdot V_p - 55$	0,64
2001	Кахраман	27 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 9,95 \cdot V_p^{1,21}$	0,69
2004	Ясар и Эрдоган	13 образцов различных карбонатных горных пород	$\sigma_{сж} = (V_p + 2,02) / 0,0317$	0,64
2005	Ентвисле и др.	171 образец различных вулканических горных пород	$\sigma_{сж} = 0,78 \cdot \exp(0,88 \cdot V_p)$	0,53
2008	Шарма и Сингх	49 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 0,0642 \cdot V_p - 117,99$	0,90
2008	Кобаноглу и Селик	150 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 56,71 \cdot V_p - 192,93$	0,67
2009	Морадиан и Бехния	64 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 165,05 \cdot \exp(-4,452/V_p)$	0,70
2009	Ханделвал и Сингх	12 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 0,1333 \cdot V_p - 227,19$	0,96
2009	Диамантис и др.	32 образца серпентинита	$\sigma_{сж} = 0,11 \cdot V_p - 515,56$	0,81
2011	Ягиз	9 образцов различных осадочных и мета-осадочных горных пород	$\sigma_{сж} = 0,258 \cdot V_p^{3,543}$	0,92
			$\sigma_{сж} = 49,4 \cdot V_p - 167$	0,89
2012	Верма и др.	15 образцов угля	$\sigma_{сж} = 0,008 \cdot V_p + 3,011$	0,95
2012	Алтындаг	97 образцов преимущественно известняка	$\sigma_{сж} = 12,743 \cdot V_p^{1,194}$	0,58
2013	Ханделвал	12 образцов горных пород различных типов	$\sigma_{сж} = 0,033 \cdot V_p - 34,83$	0,87
2013	Минаеиан и Ахангари	Слабые конгломератные горные породы	$\sigma_{сж} = 0,005 \cdot V_p$	0,94

определению других величин. Это обусловило рост интереса к бесконтактным исследованиям горных пород с целью получения их характеристик, которые можно было бы соотнести с классическими прочностными показателями, такими как предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$.

Среди недеформирующих методов испытаний применительно к горным породам наиболее широкое распространение получил метод исследования путем измерения скорости распространения волн сжатия (продольных упругих волн) в результате ультразвукового воздействия на образец.

В табл. 5 приведены корреляционные выражения, полученные различными исследователями на различных горных породах, связывающие предел прочности горных пород на сжатие со скоростью распространения ультразвуковых волн сжатия V_p .

Как видно из табл. 5, в настоящее время преобладают линейные корреляционные зависимости предела прочности на сжатие и скоростью распространения ультразвуковых волн. Они же, в целом, являются наиболее устойчивыми, однако требуемая для надежного прогнозирования величины $\sigma_{сж}$ точность обеспечивается далеко не всегда.

Компьютерное моделирование

Как понятно из двух предыдущих разделов, корреляционные зависимости только с одним каким-либо параметром, характеризующим физические свойства горных пород, не могут являться надежными инструментами предварительной оценки свойств горных пород на новых объектах. Однако установление характера влияния нескольких параметров на прочностные свойства горных пород экспериментальным путем является чрезвычайно сложным и ресурсоемким процессом. В связи с этим в последние годы активно развиваются способы оп-

ределения физико-механических свойств горных пород путем компьютерного моделирования. Краткая характеристика некоторых исследований по компьютерному моделированию определения предела прочности на сжатие приведена в табл. 6.

В табл. 6: L — твердость по Эквотипу; ρ — плотность горной породы; d — размер зерен; n — пористость; n_e — эффективная пористость; PSV — результаты петрографических исследований; BPI — индекс заблокированного вдавливания; BD — насыпная плотность; S_w — водонасыщенность; q — содержание кварца; cc — выпуклость/вогнутость; I_d — индекс долговечности; W_c — содержание воды; ANN — искусственная нейросеть; FIS — система нечеткого логического вывода; ANFIS — адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода; GA — генетический алгоритм; ANN-GA — адаптивная сеть на основе генетического алгоритма; PSO — оптимизация методом роя частиц; ICA — алгоритм империалистической конкуренции.

Как видно из табл. 6, наибольшее распространение получило компьютерное моделирование на основе методов ANN, FIS и ANFIS, которые развиваются уже более десятилетия. В последнее время применительно к рассматриваемой проблеме также развиваются компьютерные модели на основе GA, PSO и ICA, в основном путем комбинирования с методом ANN, однако делать выводы по ним пока рано.

В работе [13] проведен обобщенный анализ методов ANN, FIS и ANFIS в сравнении с корреляционными и множественными регрессионными моделями для прогнозирования величины предела прочности горных пород на сжатие $\sigma_{сж}$. Анализ показал, что в точности прогнозов методы ANFIS и ANN превосходят корреляционные и регресси-

Таблица 6

Прогнозирование величины $\sigma_{сж}$ методом компьютерного моделирования [7, 12]
Prediction of $\sigma_{сж}$ by computer modeling [7, 12]

Год	Автор(ы)	Метод	Входные параметры	R^2
1999	Меуленкамп и Грима	ANN	L, n, ρ, d	0,95
2001	Сингх и др.	ANN	PSV	—
2004	Гоксеоглу и Зорлу	FIS	$I_{s(50)}, BPI, V_p, \sigma_p$	0,67
2008	Зорлу и др.	ANN	q, ρ, d, cc	0,76
2008	Ыилмаз и Юксек	ANN	$n_e, I_{s(50)}, R_L, I_d$	0,93
2009	Ыилмаз и Юксек	ANFIS	$V_p, I_{s(50)}, R_L, W_c$	0,94
2010	Дэгхан и др.	ANN	$V_p, I_{s(50)}, R_L, n$	0,86
2012	Раббани и др.	ANN	n, BD, S_w	0,96
2012	Монджези и др.	ANN-GA	R_L, ρ, n	0,96
2012	Ягиз и др.	ANN	V_p, n, R_L, ρ, I_d	0,50
2013	Сериян и др.	ANN	I_d, V_p, n_e, PSV	0,88
2013	Бейки и др.	GA	ρ, n, V_p	0,83
2013	Ылесилоглу-Гултекин и др.	ANFIS	σ_p, V_p	0,68
2013	Мишра и Басу	FIS	$V_p, I_{s(50)}, R_L, BPI$	0,98
2014	Резаеи и др.	FIS	R_L, ρ, n	0,95
2015	Тораби-Кавех и др.	ANN	V_p, ρ, n	0,95
2015	Тоннизам Мохамад и др.	ANN-PSO	$BD, V_p, I_{s(50)}, \sigma_p$	0,97
2015	Момени и др.	ANN-PSO	$R_L, \rho, V_p, I_{s(50)}$	0,97
2015	Армагхани и др.	ANFIS	V_p, ρ, PSV	0,98
2016	Армагхани и др.	ICA-ANN	$V_p, n, R_L, I_{s(50)}$	0,92

онные модели, а метод FIS не уступает им. При этом наиболее точным оказался метод ANFIS, что свидетельствует о положительном влиянии использования комбинированных методов компьютерного моделирования применительно к задачам геомеханики. То есть развитие методов ANN-GA, ANN-PSO, ICA-ANN и подобных является целесообразным и перспективным.

По результатам работы [10] из рассмотренных в двух предыдущих разделах настоящей статьи параметров наилучшим предиктором оказался индекс точечной нагрузки $I_{s(50)}$. Чуть хуже были скорость распространения ультразвуковых волн сжатия V_p и твердость по

Шмидту R_L . Однако наилучшим предиктором, заметно превосходящим уже перечисленные величины, оказался индекс блокированного вдавливания BPI. Он пока не получил достаточно широкого распространения на практике, поэтому останавливаться подробно на нем мы не будем. Его описание и методика определения представлены в работе [14]. Также следует отметить, что использование следует использовать несколько предикторов, однако их точный состав или определенные комбинации, позволяющие максимально точно прогнозировать величину предела прочности горных пород на сжатие, в настоящее время не установлены.

Таблица 7

Интегральные показатели физических свойств горных пород на основе предела прочности на сжатие $\sigma_{ск}$ [15, 16]
Integral characteristics of physical properties of rocks based on the ultimate compressive strength σ_{com} [15, 16]

Показатель	Год	Автор(ы)	Дополнительные факторы	Диапазон значений
RMR	1989	Биениавски	Трещиноватость	0 – 100
RMi	1995	Пальмстрём	Трещиноватость	–
RMBI	2011	Эбрахимабади и др.	σ_p , RQD	–
C_{Int}	2017	Жабин и др.	Трещиноватость	1 – 10

Использование показателя предела прочности на сжатие в комплексных параметрах при проектировании горных работ

В практике проектирования горных работ в последнее время особое место занимают интегральные показатели физических свойств горных пород, которые составляют основу простых эмпирических расчетных методик.

В табл. 7 приведены некоторые такие показатели.

Следует отметить, что в табл. 7 под трещиноватостью горных пород понимаются разные показатели и соответствующие им методы определения. Так для показателей RMR и RMi трещиноватость определяется путем комплексного исследования количественных и качественных свойств трещин в горном массиве, а для показателя C_{Int} делается поправка с учетом класса трещиноватости: от +1 для монолитных и слаботрещиноватых пород до –1 для сильно и весьма трещиноватых пород. Показатель RQD, необходимый для определения интегрального показателя RMBI, представляет собой процентное отношение твердой фазы к общему объему керна, и, по сути, является аналогом российского показателя «выход керна».

Таким образом, смысл интегральных показателей заключается в том, что они учитывают тем или иным образом

нарушения горного массива и слагающих его горных пород. Это логично, поскольку различного рода нарушения оказывают существенное влияние на эффективность ведения горных работ, в то время как методы определения классических прочностных показателей, включая предел прочности на сжатие, предусматривают определение их величин для монолитных или слаботрещиноватых пород.

Заключение

Основные выводы на основании изложенного выше материала можно свести к следующим тезисам:

- из российских методов проведения испытаний горных пород на одноосное сжатие международному стандарту в наибольшей степени соответствует 1-й вариант ГОСТ 21153.2-84, с разницей лишь в пропорциях типовых размеров образцов;
- в случае необходимости проведения ряда испытаний в условиях ограниченного количества образцов в качестве предиктора для использования простейших корреляционных зависимостей лучше всего использовать твердость горных пород по Шмидту, аппроксимированную нелинейной функцией (например, степенной или экспоненциальной);
- для компьютерного моделирования прогнозных моделей с целью опре-

деления прочностных свойств горных пород наиболее рационально использовать комбинированные алгоритмы на основе искусственных нейросетей (в настоящее время наилучшие результаты показывает метод ANFIS). При этом в качестве предикторов следует выбирать группы показателей, точный состав которых пока не установлен, но хорошие

результаты достигаются с применением индекса блокированного вдавливания ВРІ и индекса точечной нагрузки $I_{s(50)}$;

- дальнейшее развитие показателя предела прочности на сжатие, по всей видимости, должно вестись путем добавления возможности учета нарушений (например, трещин) в горной породе и/или горном массиве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014*. R. Ulusay (Ed.). Springer, 2015, 280 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0.
2. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ulusay R., Hudson J. A. (Eds.). Compilation arranged by the ISRM and ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 2007, 628 p.
3. Жабко А. В. Критерии прочности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 27–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_27.
4. Жуков В. С. Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 44–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.
5. Рассказов М. И., Цой Д. И., Крюков В. Г., Потапчук М. И., Федотова Ю. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного Албынского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-2. – С. 146–161. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_146.
6. Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
7. Momeni E., Nazir R., Armaghani D. J., Amin M. F. M., Mohamad E. T. Prediction of unconfined compressive strength of rocks: a review paper // Jurnal Teknologi. 2015, vol. 77, no. 11, pp. 43–50. DOI: 10.11113/JT.V77.6393.
8. Franklin J. A. Suggested method for determining point load strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985, vol. 22, no. 2, pp. 51–60. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.
9. Armaghani D. J., Amin M. F. M., Yagiz S., Faradonbeh R. S., Abdullah R. A. Prediction of the uniaxial compressive strength of sandstone using various modeling techniques // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016, vol. 85, pp. 174–186. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.03.018.
10. Aydin A. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version / The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer, 2015, pp. 25–33. DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0_2.
11. Rostami J., Kahraman S., Yu X., Copur H., Balci C., Bamford W., Asbury B. The relation between uniaxial compressive and Brazilian tensile strength / Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future. 2016, pp. 147–152.
12. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Hajihassani M., Yagiz S., Motaghedi H. Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances // Engineering with Computers. 2016, vol. 32, no. 2, pp. 189–206. DOI: 10.1007/s00366-015-0410-5.

13. Jalali S. H., Heidari M., Mohseni H. Comparison of models for estimating uniaxial compressive strength of some sedimentary rocks from Qom Formation // *Environmental Earth Sciences*. 2017, vol. 76, no. 22, pp. 753. DOI: 10.1007/s12665-017-7090-y.

14. Ulusay R., Gokceoglu C., Sulukcu S. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI) // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2001, vol. 38, no. 8, pp. 1113–1119. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00078-8.

15. Жабин А. Б., Аверин Е. А., Поляков А. В. Интегральная оценка сложности проекта проходки горных выработок // *Уголь*. — 2017. — № 11. — С. 60–63. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-11-60-63.

16. Жабин А. Б., Аверин Е. А., Поляков А. В. Показатель эквивалентной прочности горных пород // *Горная промышленность*. — 2018. — № 5. — С. 112–115. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-112-115. **УДК**

REFERENCES

1. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014*. R. Ulusay (Ed.). Springer, 2015, 280 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0.

2. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ulusay R., Hudson J. A. (Eds.). Compilation arranged by the ISRM and ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 2007, 628 p.

3. Zhabko A. V. Rock failure criteria. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11-1, pp. 27–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_27.

4. Zhukov V. S. Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 44–57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.

5. Rasskazov M. I., Tsoi D. I., Kryukov V. G., Potapchuk M. I., Fedotova Yu. V. Albyn gold deposit: Geological features, physical and mechanical properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 146–161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_146.

6. Il'nitskaya E. I., Teder R. I., Vatolin E. S., Kuntysch M. F. *Svoystva gornyykh porod i metody ikh opredeleniya* [Properties of rocks and methods of their determination], Moscow, Nedra, 1969. 392 p.

7. Momeni E., Nazir R., Armaghani D. J., Amin M. F. M., Mohamad E. T. Prediction of unconfined compressive strength of rocks: a review paper. *Jurnal Teknologi*. 2015, vol. 77, no. 11, pp. 43–50. DOI: 10.11113/JT.V77.6393.

8. Franklin J. A. Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1985, vol. 22, no. 2, pp. 51–60. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.

9. Armaghani D. J., Amin M. F. M., Yagiz S., Faradonbeh R. S., Abdullah R. A. Prediction of the uniaxial compressive strength of sandstone using various modeling techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 85, pp. 174–186. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.03.018.

10. Aydin A. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer, 2015, pp. 25–33. DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0_2.

11. Rostami J., Kahraman S., Yu X., Copur H., Balci C., Bamford W., Asbury B. The relation between uniaxial compressive and Brazilian tensile strength. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*. 2016, pp. 147–152.

12. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Hajihassani M., Yagiz S., Motaghedi H. Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances. *Engineering with Computers*. 2016, vol. 32, no. 2, pp. 189–206. DOI: 10.1007/s00366-015-0410-5.

13. Jalali S. H., Heidari M., Mohseni H. Comparison of models for estimating uniaxial compressive strength of some sedimentary rocks from Qom Formation. *Environmental Earth Sciences*. 2017, vol. 76, no. 22, pp. 753. DOI: 10.1007/s12665-017-7090-y.

14. Ulusay R., Gokceoglu C., Sulukcu S. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2001, vol. 38, no. 8, pp. 1113–1119. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00078-8.

15. Zhabin A. B., Averin E. A., Polyakov A. V. Integrated assessment of the complexity of mining projects. *Ugol'*. 2017, no. 11, pp. 60–63. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-11-60-63.

16. Zhabin A. B., Averin E. A., Polyakov A. V. Rock strength equivalent index. *Russian Mining Industry*. 2018, no. 5, pp. 112–115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-112-115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жабин Александр Борисович — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: zhabin.tula@mail.ru,

Тульский государственный университет,

Поляков Андрей Вячеславович — д-р техн. наук,

инженер-эксперт, e-mail: polyakoff-an@mail.ru,

ООО «Экспертиза промышленной безопасности»,

Аверин Евгений Анатольевич — канд. техн. наук,

инженер-конструктор, e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,

ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод»,

*Линник Юрий Николаевич*¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: yn_linnik@guu.ru,

*Линник Владимир Юрьевич*¹ — д-р экон. наук,

профессор, e-mail: d0c3n7@gmail.com,

¹ Государственный университет управления.

Для контактов: Поляков А.В., e-mail: polyakoff-an@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.B. Zhabin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Tula State University, 300012, Tula, Russia,
e-mail: zhabin.tula@mail.ru,

A.V. Polyakov, Dr. Sci. (Eng.), Engineer-Expert,
LLC «Expertise of Industrial Safety»,
300000, Tula, Russia, e-mail: polyakoff-an@mail.ru,

E.A. Averin, Cand. Sci. (Eng.), Engineer-Designer,
LLC «Skuratovsky Experimental Plant»,
300911, Tula, Russia,

e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,

*Yu.N. Linnik*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: yn_linnik@guu.ru,

*V.Yu. Linnik*¹, Dr. Sci. (Econ.), Professor,
e-mail: d0c3n7@gmail.com,

¹ State University of Management, 109542, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.V. Polyakov, e-mail: polyakoff-an@mail.ru.

Получена редакцией 10.03.2022; получена после рецензии 18.03.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 10.03.2022; received after the review 18.03.2022; accepted for printing 10.05.2022.