Оценка предела прочности серпентинитов на сжатие с использованием регрессионного анализа

Харисов Т. Ф.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: timur-ne@mail.ru

Реферат

Введение. В настоящее время все более актуальным и востребованным становится применение экспресс-метода оценки предела прочности пород на сжатие с применением молотка Шмидта. В отличие от лабораторных методов, результатом измерений с применением данного неразрушающего экспресс-метода является величина отскока бойка. Для последующего перехода от величины отскока Hr к пределу прочности на сжатие в образце UCS исследуемого типа породы, необходимо выполнять калибровку применяемого прибора.

Методы исследований. В работе производился отбор штучного материала на бортах Киембаевского карьера хризотил-асбеста для лабораторных испытаний и измерение величины отскока молотка Шмидта Proceq RockShmidt Type N по методике ASTM на локальных участках обнаженного массива. Испытания образцов пород на предел прочности на сжатие выполнялись в лабораторных условиях с применением сервогидравлической испытательной системы Wille Geotechnik.

Результаты исследований. На основании полученных данных установлена эмпирическая формула, описывающая зависимость предела прочности серпентинитов на сжатие в образце UCS от величины отскока Hr молотка Шмидта Type N. Выполнен сравнительный анализ результатов автора с результатами предшественников, полученными с использованием молотка Шмидта Type L при исследовании физико-механических свойств серпентинитов иного месторождения. Расхождение полученных эмпирических формул обусловлено различием физико-механических свойств серпентинитов, слагающих исследуемые массивы месторождений, а также разностью энергии удара применяемых молотков Шмидта.

Ключевые слова: молоток Шмидта; предел прочности на сжатие в образце; величина отскока; скальные породы; эмпирическая формула; зависимость; массив.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме № 0328-2019-0005.

Введение. Предел прочности пород на одноосное сжатие UCS (Uniaxial Compressive Strength) является одной из основных физико-механических характеристик, используемых в горной промышленности и науках о Земле, которая применяется для анализа устойчивости массива горных пород, установки граничных условий в процессе моделирования, а также при классификации в рейтинговых системах RMR (Rock mass rating), MRMR (Mining rock mass rating) и др. [1–5].

Однако процедура определения предела прочности горных пород в лабораторных условиях является трудоемкой, дорогостоящей, требует большого количества оборудования и квалифицированного персонала. Кроме того, для получения достоверных результатов требуется наличие качественно подготовленных образцов. На практике не всегда удается извлечь керны необходимого качества, особенно в сильнотрещиноватых, слоистых и обветренных породах. Все это сильно осложняет оценку прочностных характеристик массива.

В настоящее время все более актуальным и востребованным становится применение экспресс-метода оценки предела прочности пород на сжатие с применением молотка Шмидта, так как он имеет ряд преимуществ: не требуется подго-

товка образцов, испытания проводятся непосредственно на месте с быстрым получением результатов, не требуется высококвалифицированного персонала при использовании оборудования, низкая стоимость оборудования.

Молоток Шмидта был первоначально разработан для испытаний бетона в конце 1940-х годов. В последние годы он также стал применяться в полевых испытаниях на прочность скальных и полускальных пород. Наибольшее распространение получили молотки type L и N, которые обычно используются для определения прочностных свойств горных пород. Type L имеет энергию удара $0,735 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а type N – энергию удара $2,207 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Практика показала, что молоток Шмидта позволяет существенно снизить общие затраты, облегчить и ускорить контроль

Таблица 1. Эмпирические зависимости предела прочности в образце UCS от величины отскока молотка Шмидта Hr

Table 1. Empirical dependences between the compression strength in a UCS sample and the height of Schmidt hammer's striker rebounding Hr

Авторы (год)	Тип пород	Результаты исследований
Ху и др. (1990) [7]	Празиниты, серпентиниты, габбро	$UCS = 2,99e^{(0,06Hr)}$ $UCS = 2,98e^{(0,063Hr)}$ $UCS = 3,78e^{(0,05Hr)}$
Singh и др. (1983) [8]	Уголь	$UCS = 2Hr$
Armaghani и др. (2016) [9]	Граниты	$UCS = -153,6n + 0,01Vp + 7,1Is(50) + 0,54Hr + 63,66$
Liang и др. (2016) [10]	Песчаники	$UCS = 43,36DD + 11,16Is(50) + 1,04Hr - 112,46$
Hebib и др. (2017) [11]	Карбонатные и осадочные породы	$UCS = 2,86e^{(0,063Hr)}$ $UCS = 2,64Hr - 34,05$
Karaman и др. (2015) [12]	Осадочные и магматические породы	$UCS = 0,138Hr^{1,74}$ $UCS = 0,097Hr^{1,88}$
Yagiz (2009) [13]	Известняки, доломиты, сланцы	$UCS = 0,28Hr^{2,58}$
Yasar and Erdogan (2004) [14]	Карбонатные породы, известняки, базальты	$UCS = 0,000004Hr^{4,29}$

DD – плотность сухого образца, Vp – ультразвуковая скорость P -волн

прочности пород, слагающих массив, и тем самым подтвердить или скорректировать результаты инженерно-геологических изысканий и проектно-технических решений. Благодаря широкому применению молотка Шмидта в области механики горных пород, данный неразрушающий метод был принят Международным обществом по механике горных пород (ISRM – International Society for Rock Mechanics) и Американским обществом по испытаниям материалов (ASTM – American Society for Testing and Materials).

В отличие от лабораторных методов определения прочностных характеристик горных пород, результатом измерений с применением данного неразрушающего экспресс-метода является величина отскока бойка Молотка Шмидта. Для последующего перехода от величины отскока Hr к пределу прочности на сжатие в образце UCS исследуемого типа породы необходимо выполнять калибровку применяемого прибора.

Анализ результатов исследований предшественников. В течение последних 50 лет исследованием данного вопроса занимались такие иностранные ученые, как Min Wang, Deer D. U., Aufmuth E. R., Dearman W. R., Beverly B. E., Kidybinski A., Singh R., Sheorey P., Kong K., Hebib R., Azimian A., Xu S. и др. Результатами их исследований являются эмпирические формулы, позволяющие производить расчет UCS на основании значений Hr , полученных с помощью молотка Шмидта. В табл. 1 представлена лишь часть результатов испытаний наиболее распространенных типов пород [5–14].

Российские ученые С. А. Карташов, А. Ю. Прокопов и др. выявили в своих исследованиях высокую сходимость значений, полученных при использовании молотка Шмидта, со значениями, полученными в лабораторных условиях при испытании образцов пород на прессе. Каких-либо зависимостей и эмпирических формул перехода не установлено [15–17].

Рис. 1. Участки отбора штуфового материала на Киембаевском карьере хризотил-асбеста
Fig. 1. Sites of hand specimen collection at Kiembai chrysotile asbestos open pit

Анализ результатов исследований, выполненных ранее, показал, что полученные зависимости, описанные эмпирическими формулами, различаются в широких пределах. Их различия связаны с вариациями типов пород и их характеристик, используемого оборудования, количеством учитываемых переменных параметров (плотность, величина отскока, энергия удара и др.).

Цель и объект исследований. Целью данной работы является определение аналогичных зависимостей для горных пород Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста с целью обеспечения экспресс-оценки прочностных свойств пород и возможностью последующей корректировки значений рейтинга приборного массива MRMR в процессе ведения горных работ.

Исследуемый массив сложен в различной степени серпентинизированными ультраосновными породами, которые соответствуют габбро-перидотитовой формации, точнее ее дунит-гарцбургитовой ассоциации. В Джетыгаринском массиве ультрамафиты подверглись серпентинизации. Визуально выделяются ареалы развития лизардитовых, хризотил-лизардитовых, хризотилитовых серпентинитов.

Таблица 2. Результаты исследования предела прочности на сжатие
Table 2. Results of compression strength study

Из- мера- ния	Тип пород											Среднее значе- ние	Кэф- фициент вариа- ции, %
Родингит													
Hr	61,0	64,5	55,5	60,0	53,5	58,5	51,5	62,5	61,5	59,5	123,70	7,0	
UCS	74,7	129,2	150,2	116,6	139,3	122,2	134,1	134,4	115,6	120,7	58,80	16,45	
Сланец													
Hr	39,5	27,5	36,0	42,5	33,0	40,5	31,5	45,5	42,0	39,5	37,75	14,88	
UCS	160,5	151,3	64,8	133,0	146,5	157,2	141,9	137,7	139,0	150,5	138,24	19,71	
Перидотит													
Hr	63,5	61,5	60,5	70,5	72,5	61,5	72,5	72,5	79,0	65,0	67,90	9,29	
UCS	73,6	126,7	115,7	85,8	147,7	68,2	157,4	121,0	119,2	104,7	112,00	26,34	
Серпентинизированный перидотит													
Hr	70,0	64,0	62,0	68,5	64,5	67,0	66,5	65,5	62,0	66,5	65,65	3,97	
UCS	114,5	46,3	130,9	119,1	120,6	122,0	128,9	118,1	125,8	122,3	114,85	21,41	
Полосчатый комплекс													
Hr	68,5	57,5	57,5	55,5	66,5	57,5	63,5	66,5	64,5	58,0	61,55	7,81	
UCS	76,2	50,5	68,6	45,9	65,6	66,5	59,1	67,0	71,8	64,6	63,58	14,65	
Серпентинит апоперидотитовый													
Hr	67,0	62,0	70,0	71,5	68,0	66,5	59,0	67,0	69,0	64,5	66,45	5,65	
UCS	27,8	53,0	48,4	33,2	38,2	40,9	39,6	30,8	33,0	40,9	38,58	20,32	
Серпентинит аподунитовый хризотил-лизардитовый													
Hr	68,0	56,5	70,5	58,0	63,0	62,0	66,5	59,0	55,5	61,5	62,05	8,1	
UCS	20,2	30,7	29,5	22,0	29,9	22,8	24,5	29,1	27,6	28,7	26,50	14,27	
Серпентинит апоперидотит-лизардитовый													
Hr	67,0	69,5	70,5	64,0	67,5	72,0	66,0	65,5	69,0	66,5	67,75	3,64	
UCS	45,70	44,10	59,40	46,10	64,50	52,30	50,00	54,80	61,90	47,80	52,66	13,74	
Серпентинит аподунитовый лизардитовый													
Hr	49,0	52,5	53,0	62,5	51,0	39,0	42,0	42,0	58,5	55,0	50,45	15,03	
UCS	20,6	5,9	24,0	21,0	21,7	15,9	20,9	22,7	18,1	20,0	19,08	27,01	
Серпентинит лизардитовый асбестоносный													
Hr	50,0	53,0	62,5	56,0	63,0	61,5	56,0	54,0	58,5	59,0	57,35	7,52	
UCS	18,5	24,4	14,7	29,9	23,6	24,0	27,1	18,9	24,5	26,2	23,18	19,6	
Серпентинит лизардитовый													
Hr	56,00	63,00	63,50	71,50	65,00	70,50	65,00	61,00	73,50	73,50	66,25	8,78	
UCS	52,30	45,80	48,70	74,60	52,80	48,00	55,60	45,90	39,10	39,30	50,21	20,17	
Серпентинит лизардитовый оталькованный													
Hr	64,0	67,5	75,5	60,5	63,5	68,0	70,0	59,0	62,5	60,5	65,10	7,87	
UCS	24,4	33,2	32,4	39,1	36,0	33,8	32,1	32,6	29,9	30,6	32,41	11,91	
Серпентинит апоперидотитовый хризотил-лизардитовый													
Hr	76,5	73,0	81,5	77,0	76,5	81,0	81,0	81,5	73,5	65,5	76,70	6,63	
UCS	137,2	106,0	95,5	145,2	166,2	68,2	125,8	129,8	120,1	110,1	120,41	22,78	

Подавляющее большинство ареалов серпентинизации вокруг ультрамафитов лизардитовые, лизардит-хризотилловые. Хризотилловые серпентиниты чаще всего апподунитовые. В пределах массива изредка встречаются жильные дуниты, пироксениты, габбро, горнблендиты. Они залегают в виде даек и жил и имеют крупнозернистую структуру и рвущие контакты с вмещающими ультрамафитами и серпентинитами. Жильные породы не затронуты серпентинизацией, но частично подвержены кальциево-силикатным метасоматическим преобразованиям – родингитизации. Некоторые жильные породы полностью превращены в родингиты. Отмечено также два небольших массива габбро, рвущих вмещающие сланцы и серпентиниты по ультрамафитам. Иногда дуниты и гарцбургиты залегают в виде чередующихся полос мощностью от первых сантиметров до первых метров. Это образование получило название полосчатый комплекс.

Для детального исследования физико-механических свойств пород исследуемого участка массива выполнен отбор штуфового материала на бортах Джетыгаринского карьера. Список пород, подлежащих испытаниям, следующий: родингит, сланец, серпентинизированный перидотит, серпентинит апоперидотитовый, полосчатый комплекс, серпентинит апподунитовый хризотил-лизардитовый, серпентинит апоперидотит-лизардитовый, серпентинит апподунитовый лизардитовый асбестоносный, серпентинит лизардитовый асбестоносный, серпентинит лизардитовый, серпентинит лизардитовый оталькованный, серпентинит апоперидотитовый хризотил-лизардитовый.

Методы исследований. Участки, где производился отбор штуфового материала для лабораторных испытаний и измерения величины отскока молотка Шмидта Proceq RockShmidt Type N, представлены на рис. 1.

Измерения молотком Шмидта производились по методике ASTM на локальных участках обнаженного массива. Сущность методики заключается в серии замеров (не менее 10) на выбранном локальном участке массива площадью 2–3 м², при этом точечные замеры производятся на расстоянии друг относительно друга не более ширины плунжера. Молоток упирается перпендикулярно поверхности в монолитный скальный участок массива, где отсутствуют какие-либо трещины, отшелушивания, нарушения и т. д.

Испытания образцов пород на предел прочности на сжатие выполнялись в лабораторных условиях с применением сервогидравлической испытательной системы Wille Geotechnik. Изготовление образцов из штуфового материала для испытаний выполнялось в соответствии с действующей нормативной документацией. Параметры образцов: длина $L = 65$ мм; диаметр $D = 44$ мм; соотношение высоты к диаметру 1,5 : 1; отклонение от плоскости не более 0,05 мм; отклонение от параллельности не более 0,1 мм; отклонение от перпендикулярности, образующейся по высоте, не более 0,3 мм. В испытаниях использовались только образцы, на которых отсутствовали какие-либо видимые трещины и нарушения.

Результаты исследований и их сравнительный анализ. Результаты комплексного испытания различных типов горных пород, слагающих массив Джетыгаринского месторождения, и их статистическая обработка представлены в табл. 2. Следует отметить, что измерения с использованием молотка Шмидта выполнялись на открытом участке скального массива в Киембаевском карьере, там же, где и производился отбор штуфового материала, а не на подготовленных образцах. Выполнение измерений молотком Шмидта непосредственно на подготовленных образцах дало бы наиболее точные результаты UCS, но обеспечить их абсолютную неподвижность при выполнении измерений не представляется возможным.

Для установления зависимостей были определены средние значения Hr и UCS по каждому типу пород с последующим построением диаграммы отношения между пределом прочности на сжатие в образце UCS, МПа, и величиной отскока молотка Шмидта Hr (рис. 2).

На представленной диаграмме отслеживается корреляция только у серпентинитов. На данном этапе исследования установление зависимостей для остальных типов пород, слагающих массив Джетыгаринского месторождения (родингиты, сланцы, серпентинизированные перидотиты, перидотиты и полосчатый комплекс), невозможно по причине недостаточного количества проб.

Рис. 2. Отношение между пределом прочности в образце UCS и величиной отскока молотка Шмидта Hr

Fig. 2. Relations between the compression strength in a UCS sample and the height of Schmidt hammer's striker rebounding Hr

Создание математической модели зависимости предела прочности в образце UCS от величины отскока молотка Шмидта Hr выполнено с помощью компьютерной программы построения функционально-факторных уравнений нелинейной регрессии «Тренды ФСП-1», разработанной в Институте горного дела УрО РАН [18]. В результате получена формула:

$$USC = 0,0017e^{0,14Hr} + 0,3Hr - 0,0017.$$

Коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,978$.

Сравнительный анализ результатов исследований серпентинитов, полученных в 1990 г. Xu S. с использованием RockShmidt Type L, с результатами автора показал значительные расхождения, особенно на интервалах показаний величины отскока молотка от 27 до 80. Расхождения могут быть обусловлены различием физико-механических свойств серпентинитов, слагающих исследуемые массивы месторождений, а также разностью энергии удара применяемых молотков Шмидта.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Использование молотка Шмидта для определения предела прочности на сжатие скальных пород возможно только после предварительных исследований и тарировки используемого молотка с целью установления зависимостей для каждого вида пород, слагающих конкретное месторождение.

Переход от величины отскока Hr , измеряемой молотком Шмидта Type N, к пределу прочности на одноосное сжатие в образце UCS для серпентинитов Джетыгаринского месторождения выполняется по эмпирической формуле $UCS = 0,0017e^{0,14Hr} + 0,3Hr - 0,0017$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications // Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry. 1977. Vol. 86. A1–A8.
2. Aksoy C. O. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications, and restrictions // Journal of Mining Science. 2008. Vol. 44. No. 51. P. 51–63.
3. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses // In Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock). Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME, 2001. P. 475–481.
4. Панжин А. А., Харисов Т. Ф., Харисова О. Д. Комплексное геомеханическое обоснование углов заоткоски бортов карьера // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 295–306.
5. Deer D. U., Miller R. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock // Deformation Curve AFNL-TR. 1966. P. 65–116.
6. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. 123. P. 1–11.
7. Xu S., Grasso P., Mahtab A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock // 6th International IAEG Congress. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 511–519.
8. Singh R., Hassani F., Elkington P. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations // The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association; 1983. P. 63–67.
9. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Momeni E., Monjezi M., Narayanasamy M. S. Prediction of the strength and elasticity modulus of granite through an expert artificial neural network // Arab J. Geosci. 2016. No. 9. P. 48.
10. Liang M., Mohamad E. T., Faradonbeh R. S., Armaghani D. J., Ghoraba S. Rock strength assessment based on regression tree technique // Eng. Comput. 2016. No. 32. P. 343–354.
11. Hebib R., Belhai D., Alloul B. Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, porosity, and Schmidt hardness // Arab J. Geosci. 2017. 10. P. 383.
12. Karaman K., Kesimal A. A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks // Bull. Eng. Geol. Environ. 2015. No. 74. P. 507–520.
13. Yagiz S. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer // Bull. Eng. Geol. Environ. 2009. No. 68(1). P. 55–63.
14. Yasar E., Erdogan Y. Estimation of rock physicomaterial properties using hardness methods // Eng. Geol. 2004. No. 71(3). P. 281–288.
15. Харисов Т. Ф., Панжин А. А., Харисова О. Д. О проблемах экспресс-метода определения прочности горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 86–91.
16. Гергарт Ю. А. Обзор методов диагностики прочностных свойств горных пород при проходке транспортных тоннелей // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 65–68.
17. Прокопов А. Ю., Гергарт Ю. А. Апробация и оценка точности неразрушающего экспресс-метода определения прочностных свойств породного массива в условиях реконструкции Рокского тоннеля // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 4. С. 101–107.
18. Антонов В. А., Яковлев М. В. О программе для ЭВМ «Тренды ФСП-1» и ее применении в информационных системах горных предприятий // Информационные технологии в горном деле: доклады Всероссийской научной конференции с международным участием. 2012. С. 26–34.

Поступила в редакцию 28 мая 2020 года

Сведения об авторах:

Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН. E-mail: timur-ne@mail.ru

Assessing serpentinite compressive strength using regression analysis

Timur F. Kharisov¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Today, the express method for assessing rock compressive strength using the Schmidt hammer is becoming more and more relevant and demanded. Compared to laboratory methods, measurements by this non-destructive express method result in the height of striker rebounding. The device has to be calibrated for further transition from the rebound height H_r to compressive strength in the UCS sample of the rock type under study.

Research methodology included selection of hand specimen on the slopes of the Kiembai chrysotile asbestos open pit for laboratory tests. The height of striker rebounding was measured of Proceq RockShmidt Type N Schmidt hammer according to the ASTM method in local areas of exposed massif. Compressive strength of rock samples was tested in the laboratory using Wille Geotechnik servo hydraulic testing system.

Research results. Based on the obtained data, an empirical formula has been established describing the dependence between compression strength of serpentinite in the UCS sample and striker height of rebounding of a Schmidt Type N hammer. The author's results were compared to the ones obtained by the predecessors using a Schmidt Type L hammer when studying physical and mechanical properties of serpentinite in another field. The difference in the empirical formulas is due to the difference in physical and mechanical properties of serpentinite building up the deposits under consideration, as well as the difference in impact energy of the working Schmidt hammers.

Key words: Schmidt hammer; compressive strength of the sample; height of rebounding; hard rock; empirical formula; dependence; rock mass.

Acknowledgements. The research has been prepared within the state assignment no. 0328-2019-0005.

REFERENCES

1. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications. *Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*. 1977; 86: A1–A8.
2. Aksoy C. O. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications, and restrictions. *Journal of Mining Science*. 2008. Vol. 44. No. 51. P. 51–63.
3. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies* (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock). Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME, 2001. P. 475–481.
4. Panzhin A. A., Kharisov T. F., Kharisova O. D. Complex geomechanical substantiation of the open pit highwall slope angles. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019; 3: 295–306. (In Russ.)
5. Deer D. U., Miller R. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. *Deformation Curve AFNL-TR*. 1966: 65–116.
6. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. 123. P. 1–11.
7. Xu S., Grasso P., Mahtab A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. *6th International IAEG Congress*. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 511–519.
8. Singh R., Hassani F., Elkington P. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. *The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association*; 1983. P. 63–67.
9. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Momeni E., Monjezi M., Narayanasamy M. S. Prediction of the strength and elasticity modulus of granite through an expert artificial neural network. *Arab J. Geosci.* 2016; 9: 48.
10. Liang M., Mohamad E. T., Faradonbeh R. S., Armaghani D. J., Ghoraba S. Rock strength assessment based on regression tree technique. *Eng. Comput.* 2016; 32: 343–354.
11. Hebib R., Belhai D., Alloul B. Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, porosity, and Schmidt hardness. *Arab J. Geosci.* 2017; 10: 383.
12. Karaman K., Kesimal A. A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2015; 74: 507–520.
13. Yazig S. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2009; 68(1): 55–63.
14. Yasar E., Erdogan Y. Estimation of rock physicomechanical properties using hardness methods. *Eng. Geol.* 2004; 71(3): 281–288.
15. Kharisov T. F., Panzhin A. A., Kharisova O. D. Some problems of the express method of rock strength determination. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 86–91. (In Russ.)
16. Gergart Iu. A. Overview of the methods of diagnosing strength properties of rocks during transportation tunnels driving. *Nauchnoe obozrenie = Scientific Review*. 2013; 11: 65–68. (In Russ.)

17. Prokopov A. Iu., Gergart Iu. A. Approbation and accuracy evaluation of non-destructive express-method of determination of natural rock structural behavior in conditions of the Roki tunnel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 4: 101–107. (In Russ.)

18. Antonov V. A., Iakovlev M. V. Trendy FSP-1 software and its application for mining information systems. In: *Information technologies in mining: proceedings of the All-Russia conference with international participation*. 2012. P. 26–34. (In Russ.)

Received 28 May 2020

Information about authors:

Timur F. Kharisov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Structures Geomechanics, Institute of Mining UB RAS. E-mail: timur-ne@mail.ru

Для цитирования: Харисов Т. Ф. Оценка предела прочности серпентинитов на сжатие с использованием регрессионного анализа // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 45–53. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-45-53

For citation: Kharisov T. F. Assessing serpentinite compressive strength using regression analysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 45–53 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-45-53