Исследование зависимостей физико-механических свойств серпентинитов Джетыгаринского месторождения

Коптяков Д. А.^{1*}, Харисов Т. Ф.^{1,2}

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

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: koptyakov_d@mail.ru

Реферат

Введение. Изученность свойств и параметров горных пород, характеризующих их устойчивость, является неотъемлемой частью обеспечения безопасного недропользования в процессе техногенного воздействия на массив. В целях понимания пространственной изменчивости свойств и параметров серпентинитовых пород проведены исследования, включающие лабораторные испытания с последующим определением и анализом закономерностей изменения их физико-механических свойств.

Методы исследований. В данном исследовании проведены определения и анализ физико-механических свойств горных пород, слагающих прибортовой массив Житикаринского (Джетыгаринского) карьера. Методами исследований являлись лабораторные испытания на прочность при одноосном сжатии, растяжении (бразильский метод), непосредственные измерения удельного веса, а также статистический анализ полученных данных.

Результаты исследований. По результатам испытаний и статистической обработки данных получены значения физико-механических свойств для десяти наименований горных пород, отобранных на участке прибортового массива Житикаринского карьера. На графиках представлен анализ закономерностей их изменения. С увеличением степени серпентинизации значения прочностных характеристик снижаются значительно. Установлены корреляционные связи физико-механических свойств серпентинитовых пород Житикаринского месторождения.

Ключевые слова: серпентинизация; прочность при одноосном сжатии; модуль деформации; прочность при растяжении; серпентинит.

Введение. Серпентиниты являются одними из основных пород, слагающих скальные массивы, и широко распространены в США, Великобритании, Шотландии, Казахстане и т. д. В России серпентиниты наиболее развиты на Кавказе, Урале, в Восточном Саяне, Туве и других регионах. Пространственная изменчивость прочностных характеристик серпентинитовых пород обусловлена особенностью протекания процесса серпентинизации и неоднородностью минерального состава. Согласно классификации А. С. Варлакова, из минералов группы серпентинита встречаются лизардит, антигорит, хризотил, повлен-хризотил (серпофит). Лизардит – самый распространенный вторичный минерал в хромитоносных ультрабазах Урала, а хризотил – самый нехарактерный серпентинит для хромитоносных массивов [1–5].

Исходя из неоднородности массива серпентинитовых пород в решении актуальной в горном деле задачи обеспечения безопасности недропользования в процессе техногенного воздействия на массив возрастает роль изученности пространственной изменчивости свойств и параметров горных пород, характеризующих их устойчивость [6–11]. С этой целью проведены исследования, включающие лабораторные испытания образцов горных пород с последующим определением и анализом закономерностей изменения их физико-механических свойств.

Объект исследований. В работе в качестве одного из характерных примеров процесса серпентинизации горных пород рассмотрено Житикаринское (Джетыгаринское) месторождение Республики Казахстан, которое расположено в массиве ультрамафитов Притобольско-Аккаргинского комплекса, относится к Баженовскому геолого-промышленному типу и является вторым по величине из разведанных запасов хризотил-асбеста.

Рис. 1. Места отбора проб на Житикаринском карьере
Fig. 1. Sites of sample collection at the Zhitikarinsky open pit

Данное месторождение разделено на несколько промышленных залежей хризотил-асбеста. Залежь, содержащая в себе 82 % запасов асбеста всего месторождения, получила название «Основная». Она характеризуется пластообразной формой, мощностью 300–400 м, меридиональной протяженностью 3500 м и падением на восток под углами от 35°–50° до 72°–80°. Висячий бок залежи составляют серпентиниты, серпентинизированные перидотиты. В лежачем боку залегают перидотиты. Контуры висячего бока асбестоносных серпентинитов нечеткие. Лежачий бок примыкает к перидотитовому ядру. Рудное тело представлено серпентинитами с несколькими типами асбестоносности. Распространение серпентинизации увеличивается от ультрамафитового ядра к периферии массива. Зона полностью серпентинизированных пород занимает до 70 % объема залежи. Она составляет восточную и частично осевую ее части. В структурном отношении залежь обусловлена двумя разломами, кроме того, имеются зоны дробления, которые можно выделить по признаку трещиноватости.

В ходе выполнения оценки устойчивости бортов Житикаринского карьера при их постановке в предельное положение по результатам анализа условий месторождения определена совокупность горных пород, подлежащих испытаниям и детальным исследованиям их физико-механических свойств: перидотит, серпентинит аппоперидотитовый, серпентинизированный перидотит, серпентинит апподунитовый хризотил лизардитовый, серпентинит аппоперидотит лизардитовый, серпентинит апподунитовый лизардитовый, серпентинит лизардитовый асбестоносный, серпентинит лизардитовый, серпентинит лизардитовый оталькованный, серпентинит аппоперидотитовый хризотил лизардитовый [12].

Методы исследований. Отбор штучкового материала, который использовался для подготовки образцов, выполнен на бермах восточного и западного

бортов карьера в соответствии с ГОСТ 21153.0-75 «Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний» (рис. 1). Количество штучного материала определялось возможностью получения достаточного количества образцов правильной геометрической формы. Для подготовки цилиндрических образцов диаметром 42 ± 2 мм и отношением высоты к диаметру, равным 1–2, использовались лабораторные колонковые сверла и камнерезные машины. С целью получения наиболее точных результатов обеспечено качество подготовки торцевых и перпендикулярных боковых поверхностей в рамках требуемых допусков в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» и ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении». На основании визуального обследования подготовленных образцов отобраны наиболее изотропные, однородные и наименее выветрелые в количестве не менее десяти штук для каждой пробы исследуемых горных пород.

Испытания проводились при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик», ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии», ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении» [13].

Определялся ряд базовых прочностных характеристик. Удельный вес γ и плотность ρ получены на образцах правильной формы, очищенных от рыхлых частиц, пыли и высушенных до постоянной массы в сушильном шкафу при заданной температуре до установления постоянной массы.

С использованием комплекса оборудования Wille geotechnik выполнено испытание образцов, и расчет предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж\ i}$ для каждого i -го образца выборки имеет вид:

$$\sigma_{сж\ i} = K_B \frac{P}{S} \cdot 10,$$

где P – разрушающая образец сила, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см²; K_B – безразмерный коэффициент, устанавливаемый в зависимости от отношения высоты к диаметру образца.

Во время испытаний на прочность при одноосном сжатии при помощи датчиков вертикальных и радиальных деформаций осуществлялся мониторинг деформирования образцов. Результаты оценки деформаций использовались для определения модуля деформаций E_d :

$$E_d = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon_{1k} - \varepsilon_{1n}},$$

где σ_k и σ_n – значения сжимающего напряжения в диапазонах частичной пригрузки и разгрузки образца соответственно; ε_{1k} и ε_{1n} – относительные продольные деформации в конце и в начале диапазона при нагружении.

С использованием бразильского метода были испытаны цилиндрические образцы серпентинитовых пород с отношением длины образца к его диаметру $1 \pm 0,1$. Определена максимальная разрушающая сила и площадь разрыва образца.

Вычисление предела прочности при растяжении по результатам испытаний произведено по формуле:

$$\sigma_p = 10 \frac{P}{S},$$

где P – разрушающая сила, кН; S – площадь разрыва образца, см².

Таблица 1. Результаты испытаний серпентинитовых пород Житикаринского месторождения

Table 1. The results of testing serpentinite rocks of Zhitikarinsky deposit

Наименование горной породы	γ , кН/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа*	E_d , МПа*	σ_p , МПа
Перидотит	27,7±0,10	112,00±29,5 95,46±28,18	34815,70±12220,6 38328,44±6990,67	6,25±0,53
Серпентинит апоперидотитовый	25,6±0,15	38,58±7,84 32,64±5,98	15062,20±4122,60 13179,50±2344,42	4,84±0,56
Серпентинизированный перидотит	27,6±0,19	114,85±24,59 102,43±26,59	34547,20±6241,88 33021,00±7725,56	5,44±0,61
Серпентинит апподунитовый хризотил-лизардитовый	25,6±0,16	26,50±3,78 21,80±8,02	11933,70±2140,56 7149,00±1207,74	1,45±0,23
Серпентинит апоперидотит лизардитовый	25,9±0,13	48,66±18,07 38,93±19,84	16985,56±4453,68 15083,78±7015,34	3,69±0,52
Серпентинит апподунитовый лизардитовый	25,4±0,3	19,08±5,15 13,69±1,88	6390,33±693,53 5011,10±231,66	1,95±0,34
Серпентинит лизардитовый асбестоносный	25,2±0,3	23,18±4,54 21,63±15,09	8890,80±1991,27 8581,40±3041,60	2,32±0,34
Серпентинит лизардитовый	25,5±0,08	48,21±15,73 48,53±12,36	12419,11±3369,55 12400,60±2326,89	3,40±0,8
Серпентинит лизардитовый оталькованный	25,1±0,15	32,41±3,86 20,35±5,71	11741,00±2200,24 12247,80±4225,85	2,18±0,33
Серпентинит апоперидотитовый хризотил-лизардитовый	26,8±0,21	120,41±27,43 79,80±16,55	43377,00±15601,79 28689,10±8597,51	3,97±0,89

*Верхние значения – для образцов при естественной влажности, нижние – для образцов в водонасыщенном состоянии.

Статистическая обработка результатов, а именно расчет среднего арифметического значения для числа n образцов выборки и стандартного отклонения, выполнялась по формулам:

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i;$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{cp})^2}.$$

Результаты исследований. Полученные результаты испытаний образцов исследуемых горных пород и данные их статистической обработки представлены в табл. 1, прослеживается незначительное снижение удельного веса в зависимости от степени и минерального типа серпентинизации. Значения прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ перидотита, серпентинизированного перидотита варьируют

ся от 37,90 до 157,40 МПа. Значения прочности серпентинитов при одноосном сжатии колеблются в диапазоне от 5,90 до 166,20 МПа. Большой диапазон может быть обусловлен необнаруженными внутренними нарушениями и/или различной степенью серпентинизации и/или петрографическим разнообразием и/или структурной сложностью серпентинитов. Значения прочности при растяжении у перидотитов и серпентинизированных перидотитов варьируются в диапазоне от 4,36 до 6,93 МПа. У серпентинитов значения прочности при растяжении находятся в диапазоне от 1,45 до 5,44 МПа. Как и в случае со значениями прочности при одноосном сжатии, прочность при растяжении снижается в зависимости от степени и минерального типа серпентинизации.

Рис. 2. Зависимости между удельным весом и механическими свойствами
Fig. 2. Dependence between the specific weight and mechanical properties

Для выражения связей между свойствами горных пород и попытки получения надежных эмпирических зависимостей применялся регрессионный анализ результатов. К. Diamantis и соавторы в 2009 г. получили зависимости прочности при одноосном сжатии от физико-механических свойств и степени серпентинизации [14, 15]. А. А. Теймен, А. Ф. Алексеев также предлагают корреляционные зависимости физико-механических свойств пород [16, 17]. В данном исследовании регрессионный анализ использовался для выявления корреляционных связей физико-механических свойств серпентинитов при их естественной влажности.

Известно, что прочностные характеристики увеличиваются с ростом значений удельного веса породы и уменьшаются с ростом серпентинизации. Для исследо-

вания данных зависимостей установлена корреляционная связь между прочностью при одноосном сжатии и удельным весом исследуемых пород, которая представлена на рис. 2, а. Соотношение предела прочности при растяжении и удельного веса пород отображено на рис. 2, б и которое описывается линейной зависимостью, но с более низким коэффициентом детерминации R^2 . На рис. 2, в представлено соотношение двух прочностных характеристик, предел прочности при одноосном сжатии и растяжении исследуемых пород. Кроме того, установлена зависимость между пределом прочности при одноосном сжатии и модулем деформации, которая изображена на рис. 2, г.

Рис. 3. Соотношение значений прочности при одноосном сжатии расчетных и определенных по результатам лабораторных испытаний

Fig. 3. Correlation between the unconfined compressive strength design values and the values determined by laboratory test results

На основе полученных значений физико-механических свойств исследуемых пород, с использованием многофакторной линейной регрессии получена следующая математическая модель зависимости:

$$\sigma_{сж} = -298,385 + 11,957\gamma + 0,002E_d.$$

Проверка путем соотнесения расчетных значений прочности при одноосном сжатии и значений, полученных в результате лабораторных испытаний, представлена на рис. 3.

Выводы. На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что породы, слагающие прибортовой массив Житикаринского карьера, относятся к породам средней и слабой прочности. Высокой прочностью отличаются перидотиты, серпентинизированные перидотиты, серпентиниты аппоперидотитовые хризотил лизардитовые. Наименее прочными из исследованных горных пород являются серпентиниты с хризотилловым, лизардитовым, хризотил-лизардитовым и лизардит-хризотилловым минеральным типом серпентинизации. С увеличением степени серпентинизации значения прочностных характеристик снижаются значительно. Исследуемые горные породы в водонасыщенном состоянии показывают предел прочности в среднем на 17–18 % ниже, чем при естественной влажности [18]. Наблюдается снижение прочностных характеристик при увеличении степени серпентинизации исследуемых пород. Большой диапазон значений прочности при одноосном сжатии серпентинитов обуславливается не только структурной сложностью серпентинитов. Важную роль играет минеральный тип серпентинизации и вещественный состав пород. Серпентинит апподунитовый

хризотил lizardитовый имеет наименьшую прочность при растяжении среди исследуемых серпентинитов. Серпентинит апподунитовый lizardитовый показывает наименьшую прочность при одноосном сжатии. Установлены корреляционные зависимости физико-механических свойств серпентинитовых пород Житикаринского месторождения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брянчанинова Н. И., Макеев А. Б. Серпентиниты Полярного Урала, какие они есть // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2004. № 2(110). С. 15–19.
2. Попов Ю. В., Жабин А. В., Пустовит О. Е. Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа Даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ) // Геология и геофизика юга России. 2019. Т. 9. № 4. С. 38–48.
3. Мелекесцева И. Ю., Зайков В. В., Третьяков Г. А., Филиппова К. А., Котляров В. А. Геологическое строение и минералогия Мечниковского месторождения золота, Южный Урал // Литосфера. 2019. Т. 19. № 1. С. 111–138.
4. Nespereira J., Navarro R., Monterrubio S., Yenes M., Pereira D. Serpentine from Moeche (Galicia, North Western Spain). A stone used for centuries in the construction of the architectural heritage of the region // Sustainability (Switzerland). 2019. Vol. 11(9). No. 2700. P. 1–26.
5. Manuella F. C., Carbone S., Ferlito C., Hovland M. Magma-serpentine interaction as the origin of diatremes: a case study from the Hyblean Plateau (southeastern Sicily) // International Journal of Earth Sciences 2016. No. 105(5). P. 1371–1385.
6. Джафаров Н. Н., Джафаров Ф. Н. Полезные ископаемые Джетыгаринского рудного района (Костанайское Зауралье). Алматы: Алеем, 2002. 244 с.
7. 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.
8. Жаворонкин В. И., Ненахов В. М., Короб В. Н. Физические свойства и петрологические особенности серпентинитов Даховского массива (Западный Кавказ) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле: сб. матер. конф. 2019. С. 104–107.
9. Ulaş K. Shear strength of extremely altered serpentinites based on degree of saturation (Ankara, Turkey) // Journal of Mountain Science. 2019. No. 16(4). P. 944–954.
10. Punturo R., Cirrincione R., Pappalardo G., Fazio E., Bloise A. Preliminary laboratory characterization of serpentinite rocks from Calabria (southern Italy) employed as stone material // Journal of Mediterranean Earth Sciences. 2018. No. 10. P. 79–87.
11. Viti C., Collettini C., Tesi T., Tarling M. S., Smith S. A. F. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites // Minerals. 2018. No. 8(6). P. 241.
12. Калачев В. А., Панфилов П. Е., Зайцев Д. В. Об особенностях роста трещин в вязко-упругой среде с развитой иерархической структурой // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3(41). С. 59–64.
13. 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.
14. Diamantis K., Gartzos E., Migiros G. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations // Engineering Geology. 2009. No. 3–4. С. 199–207.
15. Diamantis K., Migiros G. Estimating the rock mass properties of ultramafic rocks in central Greece using the triaxial tests of intact rock and the geological strength index // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. No. 37(3). P. 1839–1858.
16. Теймен А. Прогнозирование основных механических параметров туфов по результатам испытаний // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 5. С. 18–32.
17. Алексеев А. Ф., Грязнов О. Н. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста // Инженерная геология. 2013. № 4. С. 54–59.
18. Калачев В. А., Панфилов Г. П., Кочанов А. Н., Костандов Ю. А., Зайцев Д. В., Панфилов П. Е. Особенности деформационного поведения малогабаритных образцов горных пород // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. XII Междунар. конф.: сб. матер. 2018. С. 281–282.

Поступила в редакцию 26 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Коптяков Дмитрий Александрович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геотехнических и цифровых технологий в недропользовании Института горного дела УрО РАН. E-mail: koptakov_d@mail.ru
Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН, доцент

кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета.
E-mail: timur-ne@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-29-37

Investigation of dependences of physical and mechanical properties of serpentinites of the Dzhetygarinsky deposit

Dmitrii A. Koptiakov¹, Timur F. Kharisov^{1,2}

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The study of the rock stability properties and parameters is an integral part of ensuring safe subsurface use in the process of human impact on the rock mass. In order to understand the spatial variability of serpentinite rocks properties and parameters, research has been carried out, including laboratory tests with subsequent determination and analysis of laws governing the changes in their physical and mechanical properties.

Research methodology. In this study, physical and mechanical properties of rocks of the Zhitikarinsky (Dzhetygarinsky) quarry were determined and analysed. The research methods included laboratory uniaxial compression-tensile tests, direct measurements of dry unit weight, and the statistical analysis of the data obtained.

Research result. According to the results of tests and statistical data processing, the values of physical and mechanical properties were obtained for ten rock types collected at the marginal area of the Zhitikarinsky quarry. The graphs show an analysis of laws governing the changes. With an increase in the degree of serpentinization, the values of strength characteristics decrease significantly. Correlations of physical and mechanical properties of serpentinite rocks of the Zhitikarinsky deposit are established.

Key words: serpentinization; unconfined compressive strength; modulus of deformation; serpentinite.

REFERENCES

1. Brianchaninova N. I., Makeev A. B. Serpentinites of the Polar Urals. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniia RAN = Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of RAS*. 2004; 2 (110): 15–19. (In Russ.)
2. Popov Iu. V., Zhabin A. V., Pustovit O. E. Mineral composition of serpentinites of the tectonic melange of the Dakhovsky crystalline protrusion (Greater Caucasus). *Geologiya i geofizika iuga Rossii = Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019; 9 (4): 38–48. (In Russ.)
3. Melekestseva I. Iu., Zaikov V. V., Tretiakov G. A., Filippova K. A., Kotliarov V. A. Geological structure and mineralogy of the Mechnikovskoe gold deposit, the Southern Urals. *Litosfera = Lithosphere*. 2019; 19 (1): 111–138. (In Russ.)
4. Nespereira J., Navarro R., Monterrubio S., Yenes M., Pereira D. Serpentine from Moeche (Galicia, North Western Spain). A stone used for centuries in the construction of the architectural heritage of the region. *Sustainability (Switzerland)*. 2019; 11(9): 2700: 1–26
5. Manuella F. C., Carbone S., Ferlito C., Hovland M. Magma-serpentine interaction as the origin of diatremes: a case study from the Hyblean Plateau (southeastern Sicily). *International Journal of Earth Sciences*. 2016; 105(5): 1371–1385.
6. Dzharafarov N. N., Dzharafarov F. N. *Minerals of the Dzhetygarinsky ore district (Kostanay Transural)*. Almaty: Aleem Publishing; 2002. (In Russ.)
7. 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 = Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki = Proceedings of the Tula State University. Natural Science*. 2019; 3: 295–306. (In Russ.)
8. Zhavoronkin V. I., Nenakhov V. M., Korob V. N. Physical properties and petrological features of serpentinites of the Dakhovsky massif (Western Caucasus). In: *The 20th internat. conf. "Physical-chemical and petrophysical researches in the Earth's science": proc. of the conf.* 2019. p. 104–107. (In Russ.)
9. Ulaşış K. Shear strength of extremely altered serpentinites based on degree of saturation (Ankara, Turkey). *Journal of Mountain Science*. 2019; 16(4): 944–954.
10. Punturo R., Cirrincione R., Pappalardo G., Fazio E., Bloise A. Preliminary laboratory characterization of serpentinite rocks from Calabria (southern Italy) employed as stone material. *Journal of Mediterranean Earth Sciences*. 2018; 10: 79–87.
11. Viti C., Collettini C., Tesi T., Tarling M. S., Smith S. A. F. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites. *Minerals*. 2018; 8(6): 241.
12. Kalachev V. A., Panfilov P. E., Zaitsev D. V. On some characteristic features of crack propagation in the viscoelastic medium with developed hierarchy. *Vektor nauki Toliattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*. 2017; 3(41): 59–64. (In Russ.)
13. Kharisov T. F., Panzhin A. A., Kharisova O. D. On the problems of express-method of determining the strength of rocks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 86–91.
14. Diamantis K., Gartzos E., Migiros G. Study on uniaxial compressive strength, point load strength

index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology*. 2009; 3–4: 199–207.

15. Diamantis K., Migiros G. Estimating the rock mass properties of ultramafic rocks in central Greece using the triaxial tests of intact rock and the geological strength index. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019; 37(3): 1839–1858

16. Teimen A. Forecasting the main mechanical parameters of tufa by the research results. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2018; 5: 18–32. (In Russ.)

17. Alekseev A. F., Griaznov O. N. Physical-mechanical characteristics of the serpentinite formation metasomatites of the bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit. *Inzhenernaya geologiya = Engineering Geology*. 2013; 4: 54–59. (In Russ.)

18. Kalachev V. A., Panfilov G. P., Kochanov A. N., Kostandov Iu. A., Zaitsev D. V., Panfilov P. E. Deformational behavior of small-sized rock samples. In: *Mechanics, life and diagnostics of materials and equipment. Proceedings of the 12th internat. conf.* 2018. p. 281–282.

Received 26 March 2020

Information about authors:

Dmitrii A. Koptiakov – PhD student, junior researcher of the Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsurface Use, Institute of Mining of Ural Branch of RAS. E-mail: koptiakov_d@mail.ru
Timur F. Kharisov – PhD (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Geomechanics of Underground Structures, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, associate professor of the Department of Mine Construction, Ural State Mining University. E-mail: timur-ne@mail.ru

Для цитирования: Коптыков Д. А., Харисов Т. Ф. Исследование зависимостей физико-механических свойств серпентинитов Джетыгаринского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 29–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-29-37

For citation: Koptiakov D. A., Kharisov T. F. Investigation of dependences of physical and mechanical properties of serpentinites of the Dzhetygarinsky deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 29–37 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-29-37